Załącznik 2

### Autoreferat przedstawiający opis osiągnięcia naukowego

dr inż. Urszula Marmol

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie Kraków 2017

## Spis treści

1	Imię i	nazwisko	3
2	Posiad	ane dyplomy, stopnie naukowe	3
3	Inform	acje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4	Wskaz	zanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003	r. o
stopniac	h nauko	wych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 20	16 r.
poz. 882	ze zm.	w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):	4
4.	.1 Wy	krywanie obiektów za pomocą falkowego algorytmu krawędziowego	5
	4.1.1	Założenia teoretyczne opracowanego algorytmu	6
	4.1.2	Założenia przyjęte w pracy	7
	4.1.3	Zależność między wykładnikiem Lipschitza a transformatą falkową	8
	4.1.4	Wykrywanie krawędzi na danych symulowanych 2D	10
	4.1.5	Schemat opracowanego algorytmu	12
	4.1.6	Wykrywanie krawędzi na danych rzeczywistych 2D	13
4.	.2 Wy	krywanie obiektów za pomocą falkowego algorytmu teksturalnego	17
	4.2.1	Podstawy teoretyczne falek Gabora	17
	4.2.2	Generowanie banku filtrów Gabora	19
	4.2.3	Ekstrakcja cech na podstawie odpowiedzi filtrów Gabora	20
	4.2.4	Klasyfikacja obiektów	21
	4.2.5	Analiza wybranych próbek testowych	22
4.	.3 Inte	gracja zaproponowanych algorytmów i weryfikacja opracowanej metody	25
4.	.4 Pod	sumowanie i wnioski	26
5	Prezer	tacja głównych obszarów badawczych	30

#### 1 Imię i nazwisko

Urszula Marmol

#### 2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

**A.** Tytuł magistra inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia w specjalności Geoinformatyka i Teledetekcja

Praca magisterska pt: "Opracowanie DTM na fotogrametrycznej stacji cyfrowej", obroniona w 2000 roku z wynikiem celującym.

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Jachimski

B. Tytuł naukowy doktora nauk technicznych w zakresie Geoinformatyki obrazowej i Fotogrametrii
Praca doktorska pt. "Filtrowanie danych wysokościowych pochodzących z lotniczego skanera laserowego", obroniona w 2005 r.
Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Jachimski
Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Zbigniew Sitek
prof. dr hab. inż. Aleksandra Bujakiewicz

Praca zdobyła nagrodę Fundacji Fanni i Teodora J. Blachutów oraz wyróżnienie Ministra Transportu i Budownictwa w dziedzinie geodezji i kartografii.

#### 3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2005 - 2006 Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, asystent

od 2006 – do chwili obecnej Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, adiunkt

# 4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję monografię habilitacyjną (dzieło opublikowane w całości):

Marmol Urszula: "Analiza falkowa danych lotniczego skaningu laserowego w procesie automatycznej ekstrakcji wybranych obiektów". Rozprawy i Monografie 322, Wydawnictwa AGH, Kraków 2017.

Recenzentami w procesie wydawniczym byli: dr hab. inż. Regina Tokarczyk, prof. AGH dr hab. inż. Ireneusz Ewiak, prof. WAT

Tematem monografii jest automatyczne wykrycie podstawowych obiektów pokrycia terenu – budynków i wysokiej roślinności na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning*, ALS, LIDAR).

Podjęta w pracy tematyka jest wyrazem przekonania autorki o kluczowym znaczeniu automatycznej detekcji obiektów we współczesnej fotogrametrii i teledetekcji. Wystarczy spojrzeć na ostatni XXIII kongres The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing w Pradze, gdzie duża grupa publikacji poświęcona była tej tematyce. Rozważenia wymaga też referat zaprezentowany przez profesora Konrada Schindlera z Uniwersytetu Technicznego w Zurichu. Mówił on o powiązaniu metod fotogrametrycznych i teledetekcyjnych z podejściami stosowanymi w dynamicznie rozwijającej się obecnie dziedzinie widzenia komputerowego (ang. *Computer Vision*, CV). Według autora CV i fotogrametria to nauki pokrewne, o czym świadczy wiele własności, poczynając od zbliżonej definicji obu dziedzin, na aspektach badawczych kończąc. W Computer Vision obserwuje się rozwój trzech interesujących obszarów badań (Borkowski i inni, 2012):

 semantyczne zrozumienie obrazu, rozpoznanie obiektu oraz wykrycie obiektu na podstawie zarówno danych obrazowych, jak i chmur punktów ze skaningu laserowego,

- śledzenie i pomiar procesów dynamicznych na podstawie obrazów,

rekonstrukcja 3D.

Jak widać, zagadnienia te są całkowicie zgodne z badaniami prowadzonymi w fotogrametrii i teledetekcji. Computer Vision kładzie duży nacisk na teorie matematyczne, fizyczne i statystyczne i właśnie ścisłe powiązanie tych dziedzin z informacją zawartą w obrazie lub chmurze punktów stanowi przyszłość fotogrametrii.

W wyniku rozwoju technologicznego pozyskiwane są dane pomiarowe o coraz wyższej dokładności i jakości. Generują one tym samym nowe możliwości opisu świata 3D. Problem poprawnego wykrywania i rozróżniania obiektów, z wykorzystaniem różnego rodzaju algorytmów matematycznych i statystycznych, pojawia się obecnie w wielu publikacjach naukowych, co potwierdza, że obrany przez autorkę kierunek badań stanowi aktualne wyzwanie dla naukowców z całego świata.

Celem pracy było opracowanie i przetestowanie metod falkowych, które pozwoliłyby na wykrycie obiektów pokrycia terenu oraz ich rozróżnienie na elementy stanowiące zabudowę i wysoką roślinność.

Jako narzędzie badawcze wybrano analizę falkową, szeroko stosowaną w wielu dziedzinach nauki. Jej zastosowanie w procesie przetwarzania danych lidarowych jest jeszcze w początkowej fazie rozwoju. Jednakże autorka, po gruntownym przeglądzie literatury, dostrzegła potencjał tej metody w obranym kierunku badań. W pracy wykorzystano transformatę falkową – ciągłą i dyskretną, oraz powiązaną z nią analizę wielorozdzielczą. Opis teoretyczny tych zagadnień można znaleźć w rozdziale pierwszym prezentowanej monografii.

W początkowym etapie badań przeanalizowano, które cechy charakterystyczne obiektu mogą być deskryptorami odpowiednio budynków i roślinności. Jako deskryptor geometryczny wybrano krawędzie. Ekstrakcja obiektów z wykorzystaniem krawędzi, pozyskanych na drodze analizy falkowej, jest tematem większości publikacji, których przegląd zawarto w monografii w rozdziale 2. Zaproponowane metody nie pozwalają jednak na identyfikację danej krawędzi i określenie rodzaju obiektu. W prezentowanej pracy postawiono tezę, że krawędzie budynków będą miały inną specyfikę niż krawędzie drzew, a analiza falkowa pozwoli na wyznaczenie parametru pozwalającego na identyfikację tych obiektów.

W kolejnych etapach badań zdecydowano się wykorzystać deskryptor niegeometryczny, jakim jest tekstura w procesie ekstrakcji obiektów. Stwierdzono, że tekstura dla drzew będzie zdecydowanie inna niż tekstura budynków i pozwoli rozróżnić tego typu obiekty. W celu przeprowadzenia tych analiz zdecydowano się na wykorzystanie falek Gabora.

W związku z powyższym w pracy zostały zaproponowane dwa algorytmy wykrywania obiektów: falkowy algorytm krawędziowy i falkowy algorytm teksturalny

#### 4.1 Wykrywanie obiektów za pomocą falkowego algorytmu krawędziowego

Algorytm krawędziowy został zaprezentowany w rozdziale trzecim monografii, gdzie wykorzystano analizę falkową jako filtrację krawędziową. W badaniach kluczowe było określenie parametru Lipschitza α dla wyznaczonych krawędzi. W tym celu wykorzystano teorię Lipschitza przedstawioną między innymi w (Mallat i Hwang, 1992a). Wykładnik α przyjmuje określone wartości dla konkretnych funkcji. W pracy udowodniono, że pozwala on na określenie charakterystycznych zmian wysokości w danych lidarowych, co pozwala na identyfikację rodzaju danej krawędzi.

#### 4.1.1 Założenia teoretyczne opracowanego algorytmu

Pojęcie krawędzi jest ściśle związane z ciągłością funkcji i może być matematycznie zdefiniowane jako lokalna osobliwość. Opisem ilościowym ciągłości funkcji jest regularność Lipschitza. Krawędzie są charakteryzowane przez parametr α, czyli wykładnik Lipschitza (Mallat i Hwang, 1992a).

Zgodnie z (Mallat, 2009) do definicji nieciągłości funkcji wykorzystuje się wzór Taylora. Określa on zależność między różniczkowalnością funkcji f(x) a aproksymacją wielomianową. Zakładając, że f(x) jest *n*-razy różniczkowalna w przedziale  $[x_0 - h, x_0 + h]$ , wielomian Taylora w otoczeniu  $x_0$  wynosi:

$$P_{x_0}(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k$$
(4.1)

Oznacza to, że wyrażenie opisujące błąd aproksymacji  $\varepsilon_{x_0}(x)$  będzie zawierać wszystkie nieciągłości funkcji f(x):

$$\mathcal{E}_{x_0}(x) = \left| f(x) - P_{x_0}(x) \right|$$
(4.2)

Wzór Taylora udowadnia, że błąd aproksymacji spełnia kryterium:

$$\left|\varepsilon_{x_{0}}(x)\right| = \left|f(x) - P_{x_{0}}(x)\right| \le \frac{|x - x_{0}|^{n}}{n!} \sup_{x \in [x_{0} - h, x_{0} + h]} |f^{n}(x)|$$
(4.3)

Funkcja f(x) *n*-razy różniczkowalna w otoczeniu punktu  $x_0$  stanowi górną granicę błędu  $\varepsilon$ , gdy *x* dąży do  $x_0$ .

Teoria Lipschitza uszczegóławia tę górną granicę za pomocą wykładników α.

Wprowadza ona kilka podstawowych warunków:

- Lokalny Lipschitz: niech  $n \le \alpha \le n+1$  dla  $n \in N$ . Funkcja f(x) jest Lipschitz- $\alpha$  w  $x_0$  wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje stała  $K \in R_+$  i wielomian  $P_n(x)$  stopnia n:

$$|f(x) - P_{x_0}(x)| \le K |x - x_0|^{\alpha}$$
 (4.4)

Globalny Lipschitz: niech n ≤ α ≤ n+1 dla n ∈ N. Funkcja f(x) jest globalnie Lipschitz-α w przedziale (a, b) wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje stała K ∈ R<sub>+</sub>, taka że dla każdego x<sub>0</sub> ∈ (a,b) istnieje wielomian P<sub>n</sub>(x) stopnia n:

$$|f(x) - P_{x_0}(x)| \le K |x - x_0|^{\alpha}$$
 (4.5)

– Regularność Lipschitza: regularność Lipschitza f(x) w punkcie  $x_0$  lub w przedziale (a, b) jest górną granicą wszystkich wartości  $\alpha$ , takich że f(x) jest Lipschitz-  $\alpha$  w  $x_0$  lub w przedziale (a, b).

Definicja krawędzi: Zakładamy, że funkcja f(x) jest Lipschitz- $\alpha \le x_0$ ,  $n \le \alpha \le n+1$  dla  $n \in N$ . Wówczas f(x) ma krawędź rzędu  $n \le x_0$ .

Z powyższych analiz wynika, że stosując wykładnik α, można zdefiniować krawędzie różnego rodzaju. Wykładnik Lipschitza charakteryzuje daną osobliwość (krawędź) przez uzyskiwaną wartość i znak.

#### 4.1.2 Założenia przyjęte w pracy

Wykorzystując powyższą teorię, autorka prezentowanej pracy przeprowadziła analizę danych wysokościowych pochodzących z ALS w celu określenia typu krawędzi występujących w zarejestrowanej chmurze punktów. Miały one na celu wytypowanie krawędzi właściwych dla budynków i roślinności. Autorka stwierdziła, że w przypadku dachów budynków będą się pojawiały krawędzie zbliżone do funkcji wartości bezwzględnej, funkcji rampowej i skokowej. W przypadku roślinności będą występowały funkcje takie jak delta Diraca czy biały szum gaussowski.

W tabeli 4.1 zostały zaprezentowane wytypowane charakterystyczne krawędzie danych ALS wraz z odpowiadającymi im funkcjami i z określonym dla nich wykładnikiem Lipschitza.

Przykładowe funkcje i wartość wykładnika Lipschitza						
Funkcja	Wykres	Wartość wykładnika α				
Funkcja wartości bezwzględnej: f(x) = - x		$\alpha = 1$				
Funkcja rampowa: $f(x) = \begin{cases} -x & dla & x \ge 0\\ 0 & dla & x < 0 \end{cases}$		<i>α</i> = 1				
Funkcja skokowa Heaviside'a: $f(x) = \begin{cases} 0 & dla & x < 0 \\ 1 & dla & x > 0 \end{cases}$		$\alpha = 0$				

Tabela 4.1 Przykładowe funkcje i wartość wykładnika Lipschitza



Podsumowując stwierdzono, że poszczególne funkcje mogą być rozróżnione przez wykładnik Lipschitza, który przyjmuje odmienne wartości dla określonego przebiegu sygnału. Założono, że budynki oraz inne obiekty infrastruktury będą przyjmowały dodatni lub zerowy wykładnik Lipschitza, natomiast wartości ujemne będą uzyskiwane dla roślinności.

#### 4.1.3 Zależność między wykładnikiem Lipschitza a transformatą falkową

W celu powiązania wykładnika Lipschitza z transformatą falkową wykorzystano teorię przedstawioną między innymi w (Mallat i Hwang, 1992b), (Mallat i Zhong, 1992).

Zgodnie z (Mallat, 2009) udowodniono, że funkcja f(x) jest Lipschitza- $\alpha$  w przedziale [a, b] wtedy i tylko wtedy, gdy jej transformata falkowa spełnia zależność:

$$|WTf(x)| \le K(s)^{\alpha} \tag{4.6}$$

Jeśli wykładnik Lipschitza jest dodatni, z równania (4.6) wynika, że amplituda modułów transformaty falkowej wzrasta wraz ze wzrostem skali *s*. Odwrotnie – ujemny wykładnik Lipschitza sprawia, że moduł transformacji maleje, gdy skala wzrasta. Dla  $\alpha = 0$  amplituda modułów pozostaje bez zmian (Wang, 2007). Zależności wynikające z równania 4.6 zostały zaprezentowane w tabeli 4.2.

α	Funkcja, znaczenie	Wpływ na
		transformację falkową
0 < α ≤ 1	<ul> <li>f(x) różniczkowalna w x<sub>0</sub></li> <li>wartość bezwzględna –</li> <li>różniczkowalna wszędzie poza</li> <li>punktem x<sub>0</sub></li> <li>zmiany są stopniowe</li> </ul>	Amplituda wzrasta wraz ze skalą
$\alpha = 0$	<ul> <li>Funkcja skokowa</li> <li>f(x) nie jest różniczkowalna w x<sub>0</sub></li> <li>nagłe zmiany i nieciągłości</li> </ul>	Amplituda pozostaje taka sama w różnych skalach
$-1 \le \alpha < 0$	- Delta Diraca $-f(x)$ jest impulsem w $x_0$	Amplituda maleje wraz ze skalą

Tabela 4.2 Zależność między wykładnikiem Lipschitza a transformatą WT

Na rysunku 4.1 zaprezentowano zmiany w transformacji falkowej dla różnych krawędzi w różnych skalach. Jeśli obiekt jest zbliżony do delty Diraca, amplituda transformacji maleje wraz ze wzrostem skali. Dla krawędzi skokowej amplituda nie ulega zmianie wraz ze wzrostem skali. Z kolei dla krawędzi rampowej wartość amplitudy rośnie przy wzroście skali.



Rys. 4.1. Przykłady krawędzi i odpowiadająca im transformata falkowa odpowiednio w skalach: 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup> – licząc od góry. Źródło: Liew i Yan, 2004

Podsumowując przeprowadzoną analizę można stwierdzić, że wykładnik  $\alpha$  powinien być właściwym identyfikatorem dla krawędzi obiektów z danych ALS.

#### 4.1.4 Wykrywanie krawędzi na danych symulowanych 2D

Koncepcję tę zweryfikowano początkowo na danych symulowanych, co opisano w monografii w podrozdziałach 3.8 i 3.9. Na dane rzeczywiste wpływa wiele czynników, które mogą decydować o zakresie możliwości zastosowania danego algorytmu. Dane te zawierają różnego rodzaju zniekształcenia związane ze specyfiką wykorzystanych technik pomiarowych. W przypadku danych lidarowych problemem może być na przykład jednoznaczność odbicia wiązki od krawędzi obiektu dla rozproszonej chmury punktów. Dlatego zasadne jest testowanie założeń algorytmu na danych symulowanych. Zostanie wówczas określona słuszność proponowanej koncepcji. Dopiero po dopracowaniu szczegółów działania algorytmu można przystąpić do testów na danych rzeczywistych.

Pole testowe stanowił sztucznie wygenerowany pojedynczy budynek i drzewo (Rys.4.2)



Rys.4.2. Dane symulowane 2D, zawierające pojedynczy budynek i drzewo

Pierwszy etap to przeprowadzenie ciągłej transformacji falkowej (ang. *Continuous Wavelet Transform*, CWT). Zgodnie z teorią przedstawioną w (Mallat i Zhong, 1992) wybrano falkę będącą drugą pochodną funkcji Gaussa na czterech poziomach dekompozycji. Krawędzie wykryte na pierwszym poziomie dekompozycji zostały zaprezentowane na rysunku 4.3.



Rys.4.3. Krawędzie wykryte na pierwszym poziomie dekompozycji

Analizując rysunek 4.4, na którym przedstawiono efekt detekcji krawędzi, widać, że poszukiwane obiekty zostały zidentyfikowane poprawnie. Kolejny etap to określenie charakteru danego obiektu przez wyznaczenie współczynników α.



Rys.4.4. Krawędzie z wyznaczonymi wykładnikami a

Analizując szczegółowo budynek, można stwierdzić, że krawędzie obiektu zostały wyznaczone prawidłowo. Wykładnik α przyjmuje wartość zero dla krawędzi budynków (rys. 4.5). Jest to zgodne z z założeniami teoretycznymi.



Rys.4.5. Fragment analizowanego budynku z wyznaczonymi wykładnikami α

Rozpatrując wyniki uzyskane dla drzewa (rys. 4.6), można zaobserwować duże rozproszenie pozyskanych krawędzi. Ze względu na charakterystyczną formę, drzewa cechuje heterogeniczność i przebieg krawędzi we wszystkich możliwych kierunkach. Dla analizowanego przypadku uzyskano wartości współczynników  $\alpha$  w przedziale [-1, 1]. Szczegółowa analiza histogramu ujawniła jednakże, że 84% z nich to wartości ujemne, czyli odpowiadające roślinności.



Rys. 4.6. Analizowane drzewo z wyznaczonymi wykładnikami α

Kolejną kwestią do rozważania jest określenie lokalizacji pojedynczych obiektów. W tym celu opracowano algorytm *peaks* składający się z dwóch etapów. W pierwszym kroku zastosowano

aproksymację dyskretnej transformacji falkowej (ang. *Discrete Wavelet Transform*, DWT) na trzecim poziomie dekompozycji z wykorzystaniem falki Symmlet2. Aproksymacja pozwoliła na wygładzenie danych i usunięcie szumów, które mogłyby zostać potraktowane jako lokalne maksima. Na tak skorygowanych danych został przeprowadzony drugi etap, czyli wykrywanie pikseli o wartościach maksymalnych. W oknie o określonym rozmiarze wybierany jest punkt maksymalny jako najbardziej prawdopodobny punkt, który będzie określał przybliżoną lokalizację obiektu. Dodatkowo w celu usunięcia ewentualnych zakłóceń na granicach obrazu zdecydowano się na pominięcie pikseli skrajnych (po dwa piksele graniczne z każdej strony). Rezultat algorytmu został przedstawiony na rysunku 4.7.





Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły na zlokalizowanie dwóch poszukiwanych obiektów oraz rozróżnienie między budynkiem a drzewem. Uzyskane rezultaty są obiecujące, dlatego też w kolejnym kroku zostaną sprawdzone na danych pochodzących z rzeczywistego nalotu ALS.

#### 4.1.5 Schemat opracowanego algorytmu

Zaproponowany algorytm wyodrębniania obiektów składa się z dwóch równoległych etapów.

W pierwszym etapie określonym jako **lokalizacja krawędzi** wyodrębniane są krawędzie na podstawie transformacji CWT. Zdecydowano się na wybór falki będącej drugą pochodną funkcji Gaussa, czyli falki Mexican Hat na określonych *n* poziomach dekompozycji.

Kolejny krok to określenie charakteru danego obiektu przez wyznaczenie współczynników  $\alpha$  dla krawędzi. Zgodnie z teorią przedstawioną w na początku podrozdziału 4.1 wykładnik  $\alpha$  pozwoli na zidentyfikowanie danego obiektu.

Drugi etap został nazwany jako **lokalizacja obiektów** i ma na celu przybliżone określenie położenia obiektów. Zastosowano transformatę DWT z falką Symmlet. Na podstawie powierzchni aproksymacyjnej na *n-tym* poziomie dekompozycji wyznaczono maksima lokalne z wykorzystaniem algorytmu *peaks*.

Schemat opracowanego algorytmu został przedstawiony na rysunku 4.8.



Rys. 4.8 Schemat algorytmu wykrywania obiektów

#### 4.1.6 Wykrywanie krawędzi na danych rzeczywistych 2D

Weryfikację zaproponowanego algorytmu przeprowadzono na danych laserowych, pochodzących z nalotu nad Krakowem w 2006 roku. Wysokość nalotu wynosiła 350 m nad powierzchnią terenu. Uzyskano chmurę punktów o gęstości wynoszącej co najmniej 12 pkt/m<sup>2</sup> dla całego Krakowa. Wybrano cztery pola testowe zawierające budynki i drzewa o różnym stopniu złożoności obiektu i odmiennych charakterystykach danych pomiarowych o gęstości średniej około 20 pkt/m<sup>2</sup>. Dla próbek tych wyinterpolowano siatkę regularną o odstępie między punktami 0,20 m. Jako metodę interpolacji wybrano metodę najbliższego sąsiada, gdyż w omawianym zagadnieniu wprowadzi ona najmniejsze zakłócenia i pozwoli zachować wyraźne różnice między obiektami pokrycia a powierzchnią topograficzną.

Próbki testowe zostały wybrane w następujący sposób:

- próbka testowa nr 1: budynek o nieskomplikowanym kształcie i płaskim dachu (rys. 4.9),



Rys. 4.9. Próbka testowa nr 1

- próbka testowa nr 2: budynek skomplikowany o złożonym dachu (rys. 4.10),



Rys. 4.10. Próbka testowa nr 2

- próbka testowa nr 3: drzewa o koronach rzadkich (rys. 4.11),



Rys. 4.11. Próbka testowa nr 3

– próbka testowa nr 4: drzewa o koronach zwartych (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Próbka testowa nr 4

Analiza próbki testowej nr 1 przyniosła właściwe wydzielenie obiektu. Obliczone wartości współczynników  $\alpha$  również wskazują, że wykryte krawędzie są funkcjami skokowymi, a więc dach analizowanego obiektu jest płaski (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Wyodrębnienie pojedynczego budynku z próbki testowej nr 1

W przypadku próbki testowej nr 2 opracowany algorytm pozwolił na wyodrębnienie krawędzi skomplikowanego budynku. Uzyskane krawędzie nie zawsze są jednoznaczne i w niektórych fragmentach pojawiają się szumy, jednakże przebieg zasadniczych krawędzi jest czytelny i łatwy w interpretacji. Również obliczone współczynniki α pozwalają określić rodzaj danej krawędzi. Zastosowanie algorytmu maksimów lokalnych do aproksymacji DWT pozwoliło na wydzielenie poszukiwanych obiektów (rys. 4.14).



Rys. 4.14. Wyodrębnienie budynku o złożonym kształcie

Dla próbki testowej nr 3, czyli drzew o koronach rzadkich zaproponowany algorytm przyniósł dobre rezultaty. Pozwolił zarówno na ustalenie lokalizacji obiektów, jak i określenie charakteru obiektu – drzewa, ze względu na przeważające wartości ujemne dla wykładnika α (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Współczynniki a wyznaczone dla próbki testowej nr 3

Dla próbki testowej nr 4 algorytm pozwala na wyznaczenie krawędzi dla drzew zwartych, nie zapewnia jednak określenia charakteru tych elementów, gdyż wykładniki α uzyskują wartości zbliżone do wartości w przypadku budynków o skomplikowanym kształcie (rys. 4.16).



Rys. 4.16. Krawędzie z obliczonymi wykładnikami α

Podsumowując, uzyskano rezultaty w większości zgodne z oczekiwaniami, a obliczony wykładnik Lipschitza pozwolił na identyfikację obiektów. W prawidłowy sposób zostały wyodrębnione budynki i drzewa rzadkie, jednakże dla drzew o koronach zwartych wykładnik Lipschitza uzyskał wartości zbliżone do budynków.

Zaproponowany algorytm, ze względu na fakt, że bazuje na wykrywaniu krawędzi – został określony jako falkowy algorytm krawędziowy.

#### 4.2 Wykrywanie obiektów za pomocą falkowego algorytmu teksturalnego

Falkowy algorytm teksturalny został zaprezentowany w rozdziale czwartym monografii, gdzie skupiono się na analizie teksturalnej z wykorzystaniem falek Gabora.

Wprowadzono założenie, że miary teksturalne dla budynku będą znacząco różniły się od parametrów wyznaczonych dla drzew. W obrazach wysokościowych pochodzących ze skaningu laserowego tekstura będzie stanowić lokalną wariancję wysokości. W przypadku budynków wzorzec będzie regularny i gładki, z niewielkimi zmianami w wysokościach. Natomiast dla roślinności tekstura będzie nieregularna z dużymi i nagłymi zmianami wysokości.

#### 4.2.1 Podstawy teoretyczne falek Gabora

Jako filtr w procesie wielokanałowej filtracji wykorzystano falkę Gabora. Ma ona cechy właściwe dla tego typu analiz, czyli prostotę, optymalną lokalizację zarówno w dziedzinie przestrzennej, jak i częstotliwościowej oraz zdolność do symulacji zachowania receptorów w układzie wzrokowym człowieka (Daugman, 1985).

Falki Gabora stanowią optymalną bazę pomocną w wyodrębnianiu cech obiektów z następujących powodów (Shen i Bai, 2006):

- argumentacja biologiczna: kształt falki Gabora jest zbliżony do komórek odbiorczych w układzie wzrokowym człowieka,
- argumentacja matematyczna: transformata Gabora ma właściwości zarówno wielorozdzielcze, jak i wielokierunkowe i jest optymalna w wyznaczeniu lokalnych częstotliwości przestrzennych,
- argumentacja empiryczna: falki Gabora zostały utworzone w celu zapewnienia przestrzeni cech wolnej od odkształceń dla zadań związanych z rozpoznawaniem wzorców.

Falka Gabora jest to sinusoida modulowana funkcją Gaussa. W związku z tym parametrami funkcji Gabora są: częstotliwość i orientacja sinusoidy oraz parametry skalujące funkcji Gaussa (Niya i inni, 2005).

Dekompozycja z wykorzystaniem rodziny falek Gabora charakteryzuje się lokalną skalą, orientacją i fazą. Pojedyncza falka Gabora pozwala przefiltrować obraz, zachowując tylko precyzyjnie dobrany zakres częstotliwości. Filtr może być realizowany zarówno w dziedzinie przestrzennej za pomocą konwolucji z wyliczoną maską, jak i w dziedzinie częstotliwości.

Falka bazowa Gabora g(x, y) w dziedzinie przestrzennej jest sinusoidą o określonej częstotliwości i orientacji s(x, y) (nośnik, ang. *carrier*), modulowaną określonym oknem w(x, y) (koperta, ang. *envelope*):

$$g(x, y) = s(x, y) * w(x, y)$$
(4.7)

Nośnik jest zespoloną sinusoidą (rys. 4.17):

$$s(x, y) = \exp(i2\pi \cdot F \cdot x') = \cos(2\pi \cdot F \cdot x') + i \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot x')$$
(4.8)

gdzie:

 $F = \sqrt{u^2 + v^2}$  - częstotliwość zespolonej sinusoidy,



Rys. 4.17. Rzeczywista (a) i urojona (b) część zespolonej sinusoidy. Parametry: u = v= 1/80 cyklu/piksel. Źródło: Movellan, 2002; Włodarczyk, Matuszczak, 2009

Koperta najczęściej jest funkcją Gaussa (rys. 4.18):

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x \sigma_y} \cdot \exp\left(-\frac{x'^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y'^2}{2\sigma_y^2}\right)$$
(4.9)

gdzie:

 $\sigma_{x}$ ,  $\sigma_{y}$  – parametry skalujące osie funkcji Gaussa,

 $x' = (x - x0) \cos \theta + (y - y0) \sin \theta$ 

- $y' = (x x\theta) \sin \theta + (y y\theta) \cos \theta$
- $(x_0, y_0)$  środek funkcji Gaussa,
- $\theta$  kąt obrotu funkcji Gaussa wokół ( $x_0$ ,  $y_0$ ).



Rys. 4.18. Koperta – funkcja Gaussa. Parametry: x0 = y0 = 0,  $\sigma x = 50$ ,  $\sigma y = 40$ ,  $\theta = -45^{\circ}$ . Źródło: Movellan, 2002

Podsumowując, falkę Gabora można zapisać jako:

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x \sigma_y} exp\left(-\frac{x'^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y'^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp(i2\pi \cdot F \cdot x')$$
(4.10)

#### 4.2.2 Generowanie banku filtrów Gabora

Prawidłowe wyodrębnienie obiektów nastąpi wtedy, gdy we właściwy sposób zostanie określony bank filtrów. W literaturze można spotkać dwa główne podejścia do wyboru filtrów Gabora:

- 1) podejście oparte na banku filtrów,
- 2) podejście oparte na projektowaniu filtrów (Weldon i inni, 1996).

W monografii zdecydowano się na podejście oparte na banku filtrów. W metodzie tej parametry filtru są określane w taki sposób, aby równomiernie pokrywały dziedzinę przestrzennoczęstotliwościową. Generowany jest duży bank filtrów, który może nie być optymalny dla danego zadania i wprowadza redundancję informacji (Haghighat i inni, 2013).

Zdecydowano się na wykorzystanie ośmiu kątów: L = 8 i trzech skal: s = 3. W związku z tym kąty zmieniają się w następujący sposób:  $\theta = 0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3}{8}\pi, \frac{\pi}{2}, \frac{5}{8}\pi, \frac{3}{4}\pi, \frac{7}{8}\pi$ .

Jako częstotliwość maksymalną ustalono wartość  $f_{max} = 1$ . Zatem częstotliwości przyjmują wartości:  $1, \frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{1}{2}$ .

Wielkość funkcji Gaussa, czyli parametry skalujące  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , zostały ustalone na dziewięć pikseli. Powstały bank filtrów (część rzeczywistą i wartość bezwzględną) przedstawiono na rysunkach 4.19 i 4.20.



4.19. Część rzeczywista filtrów Gabora. Prezentowany przykład: trzy skale i osiem orientacji



Rys. 4.20. Wartość bezwzględna filtrów Gabora. Prezentowany przykład: trzy skale i osiem orientacji

#### 4.2.3 Ekstrakcja cech na podstawie odpowiedzi filtrów Gabora

Obrazy powstałe po filtracji podlegają w kolejnym etapie analizie, mającej na celu wyodrębnienie poszukiwanych cech, opisujących poszczególne obiekty. Opracowano wiele metod ekstrakcji cech. Wśród najważniejszych można wymienić algorytmy wykorzystujące:

- odpowiedź filtru (ang. magnitude response) (Bovik i inni, 1990),
- składową rzeczywistą filtru Re (Jain i Farrokhnia, 1991),
- funkcję sigmoidalną (Jain i Farrokhnia, 1991).

Ponadto w wielu publikacjach wykorzystywane są dodatkowe miary teksturalne, takie jak:

- momenty geometryczne i centralne (Bigun i du Buf, 1994),
- entropia (Vazquez-Fernandez i inni, 2010),
- lokalna wariancja (Clausi i Jernigan, 2000),
- miara złożoności (Clausi i Jernigan, 2000).

W niniejszej rozprawie zdecydowano się na wybór odpowiedzi filtru, lokalnej wariancji, miary złożoności i różnicy między poziomami dekompozycji dla odpowiedzi impulsowej, gdyż przeprowadzone wstępne prace badawcze wykazały największe zróżnicowanie informacji o budynkach i roślinności dla tych właśnie parametrów.

Odpowiedź filtru wyrażona jest wzorem:

$$M_f = abs(G_f) \tag{4.11}$$

Lokalna wariancja odpowiedzi filtru określi stopień zmienności. Regularna, niezłożona tekstura ma zwartą postać. Odpowiedź filtrów Gabora na taką teksturę będzie jednorodna. W odróżnieniu od tekstury regularnej, tekstura złożona będzie posiadać fluktuacje w odpowiedzi Gabora. Tekstury z niską wariancją będą miały niski stopień złożoności. Z kolei tekstury z dużą wariancją będą złożone.

$$Var = \sum_{w} (f(x, y) - \mu)^2$$
 (4.12)

gdzie:

w – rozmiar okna

 $\mu$  – wartość średnia w oknie o określonym rozmiarze w.

Dodatkowa cecha określona została jako miara złożoności. Oparta jest ona na stopniowo zwiększającym się rozmiarze koperty (wzrastające parametry skalujące  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ). Jeśli odpowiedź przy zmieniającym się rozmiarze jest stała, wtedy tekstura jest regularna, gdyż ma taką samą odpowiedź w szerszym zakresie przestrzennym. Pojawiające się nachylenie w wartościach odpowiedzi filtrów może być traktowane jako cecha tekstury. Im mniejsze nachylenie, tym tekstura bardziej regularna.

Dodatkowo wyznaczono miarę opartą na różnicy między dwoma kolejnymi poziomami dekompozycji.

#### 4.2.4 Klasyfikacja obiektów

Powstały bank filtrów wraz z dodatkowymi obrazami miar (lokalna wariancja, miara złożoności, różnica poziomów dekompozycji) został wykorzystany w procesie klasyfikacji, czyli wyodrębnienia z obrazu poszukiwanych obiektów (w rozważanych badaniach: budynki, drzewa, powierzchnia terenu).

W pierwszym kroku została zaproponowana klasyfikacja nienadzorowana jako metoda prosta i niewymagająca interwencji użytkownika.

Najpopularniejszym takim algorytmem jest klastrowa segmentacja K-średnich (ang. *K-means*) (Forgy, 1965; Bezdek, 1981). Sposób podziału obrazu na segmenty metodą K-średnich zależy jedynie od wartości piksela, nie uwzględnia ani jego położenia, ani wartości pikseli sąsiednich, dlatego wynikiem takiej segmentacji są w ogólności klastry niespójne (Świta i Suszyński, 2014).

Metoda K-średnich znajduje bardzo szerokie zastosowanie ze względu na szybkość i łatwość implementacji w segmentacji i rozpoznawaniu cech. Jednakże ze względu na prostotę nie we wszystkich przypadkach będzie przynosić satysfakcjonujące wyniki.

W związku z powyższym zdecydowano się włączyć dodatkowo klasyfikację nadzorowaną opartą na drzewach decyzyjnych (ang. *Classification Tree Analysis*, CTA). Klasyfikacja w niniejszej rozprawie jest narzędziem pomocniczym w ocenie możliwości wynikających z analizy falkowej, dlatego też nie przeprowadzano dodatkowych badań. Korzystając z publikacji (Wu i inni, 2008; Fernández-Delgado i inni, 2014) zdecydowano się na wybór metody C4.5 (Quinlan, 1993). Wybrano tę metodę, gdyż proces decyzyjny jest jednoznaczny i może być łatwo interpretowalny przez użytkownika. Ponadto drzewa decyzyjne konstruowane są stosunkowo szybko, a dokładność klasyfikacji porównywalna jest z innymi metodami (Owczarek, 2014).

Metoda drzew klasyfikacyjnych została zaproponowana przez Breimana (Breiman i inni, 1984) – tzw. model CART, i rozszerzona przez Quinlana (Quinlan, 1993) – algorytm C4.5. Drzewem decyzyjnym nazywamy skierowany acykliczny graf o strukturze drzewiastej, reprezentujący proces podziału zbioru obiektów na jednorodne klasy. Składa się on z korzenia, w którym rozpoczyna się proces rekurencyjnego podziału, oraz gałęzi prowadzących od korzenia do kolejnych węzłów. Węzły wewnętrzne opisują sposób podziału na jednorodne klasy. Z każdym węzłem związany jest test sprawdzający wartości atrybutu. Dla każdego z możliwych wyników testu odpowiadająca mu gałąź prowadzi do węzła na niższym poziomie (Krawiec i Stefanowski, 2004). Węzeł ostateczny, zwany liściem, zawiera informację o przynależności danych do konkretnej klasy. Schemat drzewa klasyfikacyjnego przedstawiono na rysunku 4.21.



Rys. 4.21. Schemat drzewa decyzyjnego

#### 4.2.5 Analiza wybranych próbek testowych

W niniejszych badaniach przyjęto założenie, że tekstura budynków i tekstura roślinności będą znacząco się różniły. W przypadku budynków wzorzec będzie regularny i gładki, z niewielkimi zmianami w wysokościach. Natomiast dla roślinności tekstura będzie nieregularna z dużymi zmianami wysokości.

W związku z tym cechy określone na podstawie filtrów Gabora będą w jednym przypadku się uwypuklać, a w drugim zanikać. Aby to było czytelne, zdecydowano się na połączenie próbek testowych z rozdziału 3 w następujący sposób:

próbka 1: budynek o nieskomplikowanym kształcie i płaskim dachu + drzewa o koronach zwartych (rys. 4.22),



Rys. 4.22. Próbka testowa nr 1

- próbka 2: budynek skomplikowany o złożonym dachu + drzewa o koronach rzadkich (rys. 4.23),



Rys. 4.23. Próbka testowa nr 2

Dodatkowo analizie poddano próbkę, w której drzewo częściowo zasłania dach budynku. Falki Gabora, bazując na różnicy tekstur, powinny przynieść pozytywne rezultaty dla tego typu danych – próbka 3 – budynek częściowo zasłonięty drzewem (rys. 4.24).



Rys. 4.24. Próbke testowa nr 3

Dla próbki testowej nr 1 wygenerowano bank filtrów wraz z dodatkowymi miarami tekstur: lokalną wariancją, miarą złożoności i różnicą między poziomami dekompozycji. W pierwszym kroku przeprowadzona klasyfikację nienadzorowaną, która przyniosła rezultaty częściowo zadawalające. Zdecydowano się więc na przeprowadzenie bardziej złożonej klasyfikacji CTA, która poprawnie wyodrębniła analizowany budynek i drzewa. Jedyny błąd związany jest z krawędziami budynku, które zostały błędnie sklasyfikowane jako drzewa (rys. 4.25).



Rys. 4.25. Wynik segmentacji dla próbki testowej nr 1 (kolory: szary – budynek, czerwony – roślinność, biały – powierzchnia terenu)

Dla próbki testowej nr 2 analogicznie wygenerowano bank filtrów z miarami tekstur i przeprowadzono segmentację K-średnich. Analizując wyniki, można stwierdzić, że nastąpiło prawidłowe wydzielenie budynku i drzew. Drobne błędy pojawiają się w przypadku roślinności, jednakże pojedyncze drzewa zostały wydzielone prawidłowo. Podobnie jak w próbce 1 widać błędnie sklasyfikowane krawędzie budynku. W przypadku próbki 2 zdecydowano się na poprzestaniu na klasyfikacji nienadzorowanej, gdyż przyniosła ona prawidłowe rozdzielenie między poszukiwanymi obiektami (rys. 4.26).



Rys. 4.26. Wynik klasyfikacji K-średnich (kolory: szary – budynek, czerwony – roślinność, biały – powierzchnia terenu)

Interesujące jest rozważenie incydentalnej sytuacji, gdy drzewo częściowo zasłania dach budynku. Ze względu na odmienną teksturę budynku i drzewa powinna istnieć możliwość rozróżnienia obydwu obiektów. Dlatego też próbka nr 3 stanowi taki właśnie przykład. Badania przeprowadzono analogicznie jak we wcześniejszych próbkach testowych. Wygenerowano filtry związane z odpowiedzią impulsową, lokalną wariancją, miarą złożoności i różnicą poziomów dekompozycji. Zdecydowano się na przeprowadzenie klasyfikacji nadzorowanej drzew decyzyjnych, która prawidłowo wydzieliła budynek i drzewo. Również w tym przypadku ujawnił się błąd związany z krawędziami budynku, które zostały nieprawidłowo sklasyfikowane jako drzewa (rys. 4.27).



Rys. 4.27. Wynik klasyfikacji CTA dla próbki testowej nr 3 (kolory: szary – budynek, czerwony – roślinność, biały – powierzchnia terenu)

# 4.3 Integracja zaproponowanych algorytmów i weryfikacja opracowanej metody

W rozdziale trzecim i czwartym rozprawy zaprezentowano metody detekcji obiektów z wykorzystaniem analizy falkowej. Zaproponowane algorytmy wykorzystują różne rodzaje falek do wyodrębnienia odmiennych cech obiektów. Każda z metod przynosi konkretne korzyści, ale też ma określone mankamenty. W związku z tym oczywista jest integracja zaprojektowanych algorytmów i kompilacja uzyskanych wyników.

Przeprowadzoną integrację przedstawiono w rozdziale 5. Kompilacja wyników falkowego algorytmu krawędziowego i falkowego algorytmu teksturalnego pozwoliła na poprawę uzyskanych rezultatów i otrzymanie jednoznacznie zdefiniowanych obiektów – czyli budynków i wysokiej roślinności.

Ostatnim etapem prac badawczych była weryfikacja opracowanej metody na polu testowym o większym zasięgu. Opracowana metoda została zaimplementowana w środowisku MATLAB. Celem weryfikacji było sprawdzenie złożoności obliczeniowej opracowanych algorytmów w praktycznych realizacjach dla większej ilości danych. W tym celu wybrano reprezentatywne pole testowe o większym zasięgu. Dane pochodziły z nalotu ALS nad Krakowem z roku 2006. Średnia gęstość punktów dla wybranej próbki wynosiła 20 punktów/m<sup>2</sup>. W związku z tym wyinterpolowano raster o oczku 0,20 m.

Dla próbki tej przeprowadzono kolejno: falkowy algorytm krawędziowy i falkowy algorytm teksturalny. Wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 4.28.



4.28. Integracja algorytmu krawędziowego i teksturalnego dla wybranego pola testowego

Analizując rysunek 4.28, można powiedzieć, że zaproponowana metoda przyniosła zadawalające efekty dla pola testowego o większym zasięgu. Wszystkie budynki zostały zlokalizowane prawidłowo. Błąd algorytmu teksturalnego, związany z nieprawidłowym zaklasyfikowaniem krawędzi budynków do klasy roślinności, został wyeliminowany przez włączenie informacji pochodzącej z algorytmu krawędziowego o współczynniku α, który dla krawędzi budynków przyjął wartości zerowe. Integracja obu algorytmów pozwoliła na poprawę dokładności wykrycia roślinności. Współczynnik α dla drzew przyjął w większości wartości ujemne, co pozwala na prawidłową identyfikację tych obiektów. Dokładny zasięg drzew może zostać określony przez włączenie algorytmu teksturalnego. Analizując szczegółowo powyższy rysunek, widać, że drzewa o bardzo rzadkich koronach nie zostały zidentyfikowane za pomocą algorytmu teksturalnego, jednakże są widoczne jako wynik działania algorytmu krawędziowego.

Kompilacja obu metod pozwoliła na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników i wyeliminowanie niektórych błędów związanych z nieprawidłową klasyfikacją obiektów.

Zaproponowana metoda przebiegała w sposób w pełni automatyczny w środowisku MATLAB, nie wymagała interwencji użytkownika na żadnym etapie opracowania, a czas obliczeń był akceptowalny.

#### 4.4 Podsumowanie i wnioski

Tematyka podjęta w monografii "Analiza falkowa danych lotniczego skaningu laserowego w procesie automatycznej ekstrakcji wybranych obiektów" jest wyrazem przekonania autorki o kluczowym znaczeniu automatycznej detekcji obiektów we współczesnej fotogrametrii i teledetekcji. W wyniku rozwoju technologicznego pozyskiwane są dane pomiarowe o coraz wyższej dokładności i jakości. Generują one tym samym nowe możliwości opisu świata 3D. Problem poprawnego wykrywania i rozróżniania obiektów, z wykorzystaniem różnego rodzaju algorytmów matematycznych i statystycznych, pojawia się obecnie w wielu publikacjach naukowych, co potwierdza, że obrany przez autorkę kierunek badań stanowi aktualne wyzwanie dla naukowców z całego świata.

Celem pracy było opracowanie i przetestowanie metod falkowych, które pozwoliłyby na wykrycie obiektów oraz ich rozróżnienie na elementy stanowiące zabudowę i wysoką roślinność.

Jako narzędzie badawcze wybrano analizę falkową, szeroko stosowaną w wielu dziedzinach nauki. Jej zastosowanie w procesie przetwarzania danych lidarowych jest jeszcze w początkowej fazie rozwoju. Jednakże autorka, po gruntownym przeglądzie literatury, dostrzegła potencjał tej metody w obranym kierunku badań.

W pracy zostały zaproponowane dwa algorytmy wykrywania obiektów: falkowy algorytm krawędziowy i falkowy algorytm teksturalny.

Algorytm krawędziowy został zaprezentowany w rozdziale trzecim, gdzie wykorzystano analizę falkową jako filtrację krawędziową. W badaniach kluczowe było określenie parametru Lipschitza α dla wyznaczonych krawędzi. W tym celu wykorzystano teorię Lipschitza przedstawioną między innymi w (Mallat i Hwang, 1992a). Wykładnik α przyjmuje określone wartości dla konkretnych funkcji. W pracy udowodniono, że pozwala on na określenie charakterystycznych zmian wysokości w danych lidarowych, co pozwala na identyfikację rodzaju danej krawędzi.

Opracowany algorytm zweryfikowano na rzeczywistych próbkach testowych, zawierających typowe obszary z budynkami i roślinnością. Uzyskano obiecujące rezultaty, a obliczony wykładnik Lipschitza pozwolił na przeprowadzenie rozróżnienia między badanymi obiektami. W prawidłowy sposób zostały wyodrębnione budynki proste i skomplikowane oraz drzewa rzadkie, jednakże dla drzew o koronach zwartych wykładnik Lipschitza uzyskał wartości zbliżone do budynków.

Algorytm teksturalny został zaprezentowany w rozdziale czwartym niniejszej rozprawy, gdzie skupiono się na analizie teksturalnej z wykorzystaniem falek Gabora.

Wprowadzono założenie, że miary teksturalne dla budynku będą znacząco różniły się od parametrów wyznaczonych dla drzew. W obrazach wysokościowych pochodzących ze skaningu laserowego tekstura będzie stanowić lokalną wariancję wysokości. W przypadku budynków wzorzec będzie regularny i gładki, z niewielkimi zmianami w wysokościach. Natomiast dla roślinności tekstura będzie nieregularna z dużymi i nagłymi zmianami wysokości. W celu zapewnienia spójności badań do analiz przyjęto te same pola testowe co w rozdziale trzecim. We wszystkich próbkach uzyskano satysfakcjonujące wydzielenie obiektów. Błędy pojawiły się wyłącznie w przypadku krawędzi budynków, które zostały nieprawidłowo sklasyfikowane jako drzewa. Wynika to z faktu, że miary teksturalne obliczane w pobliżu krawędzi mają charakterystykę zbliżoną do charakterystyki drzew.

Integracja wyników algorytmu krawędziowego i teksturalnego pozwoliła na poprawę uzyskanych rezultatów i otrzymanie jednoznacznie zdefiniowanych obiektów – czyli budynków i wysokiej roślinności.

Ostatnim etapem prac badawczych była weryfikacja opracowanej metody na polu testowym o większym zasięgu. W wyniku działania zaproponowanych algorytmów nastąpiło prawidłowe wydzielenie wszystkich budynków i większości drzew na badanym obszarze.

Jak udowodniły zrealizowane w pracy doświadczenia, analiza falkowa okazała się efektywnym narzędziem w procesie wyodrębniania obiektów.

Przeprowadzone prace badawcze pozwalają zdaniem autorki na potwierdzenie postawionej w pracy tezy:

Analiza falkowa danych lotniczego skaningu laserowego umożliwia wykrycie podstawowych obiektów pokrycia terenu – budynków i wysokiej roślinności.

Podsumowując, autorskim rozwiązaniem zaprezentowanym w pracy, niestosowanym dotychczas, jest powiązanie krawędzi wyznaczanych obiektów z wykładnikiem Lipschitza. Pozwala on na określenie, jaka funkcja krawędziowa występuje w laserowych danych pomiarowych, a tym samym na wyznaczenie czy analizowany obiekt to budynek czy roślinność. Wykładnik Lipschitza stanowi zatem nowy istotny wskaźnik informacyjny dla danych laserowych.

#### Literatura:

Bezdek J.C., 1981. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York.

Bigun J., du Buf J.M., 1994. N-folded symmetries by complex moments in Gabor space and their application to unsupervised texture segmentation, IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, 16(1), s. 80–87.

Borkowski A., Bujakiewicz A., Ewiak I., Kaczyński R., Pyka K., 2012. Stan obecny i kierunki rozwoju fotogrametrii, teledetekcji i GIS w świetle XXII Kongresu ISPRS. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 24, s. 31–51.

Bovik A.C., Clark M., Geisler W.S., 1990. Multichannel texture analysis using localized spatial filters, IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, 12, s. 55–73.

Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone Ch., 1984. Classification and Regression Trees. Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton.

Clausi D.A., Jernigan M.E., 2000. Designing Gabor filters for optimal texture separability. Pattern Recognition, 33, s. 1835–1849.

Daugman J.G., 1985. Uncertainty relation for resolution in space, spatial-frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. Journal of the Optical Society of America, 2, 1160–1169.

Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., 2014. Do we Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classication Problems? Journal of Machine Learning Research, 15, s. 3133–3181.

Forgy E., 1965. Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency versus Interpretability of Classification. Biometrics, 21(3), s. 768–769.

Haghighat M., Zonouz S., Abdel-Mottaleb M., 2013. Identification Using Encrypted Biometrics. Computer Analysis of Images and Patterns, Springer Berlin Heidelberg, s. 440–448.

Jain A.K., Farrokhnia F., 1991. Unsupervised texture segmentation using Gabor filters. Pattern Recognition, 16, s. 1167–1186.

Krawiec K., Stefanowski J., 2004. Uczenie maszynowe i sieci neuronowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań.

Liew A. W.-C., Yan H., 2004. Blocking Artifacts Suppression in Block-Coded Images Using Overcomplete Wavelet Representation. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 14(4), s. 450–461.

Mallat S., 2009. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way. Academic Press Elsevier.

Mallat S., Hwang W.L., 1992a. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Transacion on Information Theory, 38(2), s. 617–643.

Mallat S., Hwang W.L., 1992b. Characterization of singularities. W: Byrnes J. S., Hargreaves K. A., Berry K. (Eds.), Probabilistic and Stochastic Methods in Analysis, with Application. Springer Science+Business Media Dordrecht, s. 47–100.

Mallat S., Zhong S., 1992. Characterization of signals from multiscale edges. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(7), s. 710–732.

Movellan J., 2002. Tutorial on Gabor Filters. Open source document.

Niya J.N., Aghagolzadeh A., Tinati M.A., Feizi S., 2005. 2-step wavelet-based edge detection using gabor and cauchy directional wavelets. The 7th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2005, s.115–120.

Owczarek A.J., 2014. Drzewa klasyfikacyjne w medycynie. Annales Academiae Medicae Silesiensis, 68(6), s. 449–456.

Quinlan J.R., 1993. C4.5: Programs for machine learning. Morgan Kauffman, London.

Shen L., Bai L., 2006. A review of Gabor wavelets for face recognition. Pattern Analysis and Applications, 9, s. 273–292.

Świta R., Suszyński Z., 2014. Inicjalizacja segmentacji k-means uwzględniająca rozkład gęstości pikseli. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej, 6, s. 89–98.

Vazquez-Fernandez E., Dacal-Nieto A., Martin F., Torres-Guijarro S., 2010. Entropy of Gabor Filtering for Image Quality Assessment. W: Image Analysis and Recognition. Proceedings of the 7th International Conference, ICIAR, Portugal, Part I, Campilho A., Kamel M. (Eds.), s. 52–61.

Wang Z., Mandal M., Koles Z. 2007. Multiscale Boundary Identification for Medical Images. In: Ghosh A., De R.K., Pal S.K. (eds) Pattern Recognition and Machine Intelligence. PReMI 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4815. Springer, Berlin, Heidelberg.

Weldon T.P., Higgins W.E., Dunn D.F., 1996. Gabor filter design for multiple texture segmentation. Optical Engineering, 35(10), s. 2852–2863.

Włodarczyk M., Matuszczak T., 2009. Rozpoznawanie człowieka przy pomocy wzorca tęczówki oka. Raport z projektu kursu metody i algorytmy sztucznej inteligencji. Politechnika Wrocławska, Wrocław. Wu X., Kumar V., Quinlan J.R., Ghosh J., Yang Q., Motoda H., McLachlan G.J., Ng A., Liu B., Yu P.S., Zhou Z.-H., Steinbach M., Hand D.J., Steinberg D., 2008. Top 10 algorithms in data mining. Knowledge and Information Systems, 14, s. 1–37.

#### 5 Prezentacja głównych obszarów badawczych

Od początku prowadzenia działalności naukowo-badawczej zajmuję się problematyką głównie lotniczego skaningu laserowego (*ang. Airborne Laser Scanning* - ALS), choć w obrębie moich zainteresowań znajduje się także skaning naziemny (ang. *Terrestrial Laser Scanning* - TLS) i mobilny (*ang. Mobile Laser Scanning* - MLS).

Moje badania koncentrują się wokół kilku aspektów. W pierwszym okresie była to filtracja danych wysokościowych pochodzących z ALS w celu pozyskania informacji o NMT. Efektem prac było opracowanie algorytmu filtracji opartego o transformatę Fouriera, przedstawionego i zweryfikowanego w publikacjach:

**Marmol U.**, Jachimski J., 2004. A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 35/B3 s. 1147–1152.

Piechocka N., **Marmol U.**, Jachimski J., 2004. Stereometryczna weryfikacja NMT uzyskanego ze skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 14 s. 447–458.

Założenia algorytmu zostały również zaprezentowane na międzynarodowej konferencji: XX th Congress International Society for Photogrammetry and Remote Sensing w Stambule w 2004 r.

W dalszych pracach przeprowadziłam modyfikację algorytmu, a wyniki zostały opublikowane w:

**Marmol U.**, 2010. The two-stage filtering of airborne laser data in a frequency domain. Geodesy and Cartography vol. 59 no. 2 s. 83–97.

W kolejnych latach głównym tematem moich badań było wykrywanie obiektów antropogenicznych i naturalnych na podstawie danych z lotniczego, naziemnego i mobilnego skaningu laserowego. W tym celu wykorzystywałam różnorodne narzędzia matematyczne, pozwalające na identyfikację poszukiwanych obiektów.

Pierwszą grupą zagadnień jest wykrywanie obiektów na podstawie danych z ALS. W początkowym okresie skupiłam się na wykrywaniu roślinności i pojedynczych drzew. Prace te były prowadzone w ramach projektu badawczego 2 P06L 02229 "Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie". W swoich badaniach bazowałam na algorytmach przetwarzania obrazów, takich jak filtry morfologiczne, transformata WTH czy segmentacja wododziałowa. Rezultaty badań zostały przedstawione w następujących publikacjach:

**Marmol U.**, Będkowski K., 2008. Dokładność określenia wysokości drzew na podstawie numerycznego modelu koron drzew opracowanego z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 18 a s. 377–385.

**Marmol U.**, 2009. Wykrywanie pojedynczych drzew na podstawie zintegrowanych danych lidarowych i fotogrametrycznych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 19 s. 279–286.

Wyniki zaprezentowałam na Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym "Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb" w Międzyzdrojach w 2008 r. oraz na Konferencji Naukowo-Technicznej "Współczesne technologie geoinformacyjne", będącej Konferencją Jubileuszową 90-lecia Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 2009 r.

W kolejnych pracach skupiłam się na wykrywaniu budynków i drzew z wykorzystaniem filtrów teksturalnych:

**Marmol U.,** 2009. Integracja danych lidarowych i fotogrametrycznych w procesie automatycznego wykrywania obiektów. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 20 s. 275–284.

**Marmol U.,** Lenda G., 2010. Filtry teksturalne w procesie automatycznej klasyfikacji obiektów. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 21 s. 235–243.

Wyniki prac przedstawiłam na V Ogólnopolskim Sympozjum Geoinformacyjnym "Geoinformatyka dla środowiska i społeczeństwa – badania i zastosowania" w Krakowie w 2009 r. oraz na XVII Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym PTFiT "Nowoczesne metody pozyskiwania i modelowania danych w fotogrametrii i teledetekcji" we Wrocławiu w 2010 r.

W kolejnych latach zdecydowałam się na wykorzystanie analiz falkowych w procesie wykrywania obiektów z danych ALS. Wykorzystywałam falki Gabora, które umożliwiają detekcję informacji teksturalnej. Bazowałam także na informacji wysokościowej w procesie wykrywania krawędzi dróg. Efektem tych prac są następujące publikacje:

**Marmol U.**, 2011. Use of Gabor filters for texture classification of airborne images and LIDAR data. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 22 s. 325–336.

**Marmol U.**, 2014. Wykrywanie dróg z wykorzystaniem transformaty falkowej. Pomiary, Automatyka, Kontrola vol. 60 nr 3, s. 144–147.

Wyniki prac przedstawiłam na międzynarodowej konferencji: 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology "State of the Art and Trends in Airborne and Land Mobile Mapping Technology" w Krakowie w 2011 r.

Zajmowałam się także opracowaniem oprogramowania typu Open Source o nazwie LIDARView do wizualizacji i klasyfikacji chmur punktów. Efekty prac zostały przedstawione w publikacji:

Twardowski M., **Marmol U.**, 2012. Wizualizacja i przetwarzanie chmury punktów lotniczego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. vol. 23 s. 457–466.

Rezultaty wstępnych prac zaprezentowałam na VI Ogólnopolskim Sympozjum Geoinformacyjnym "Mapa w geoinformacji" w Polanicy-Zdroju w 2011 r.

Kolejnym nurtem prowadzonych przeze mnie badań jest wykrywanie obiektów na podstawie danych z naziemnego i mobilnego skaningu. Prace te były prowadzone między innymi w ramach projektu badawczo-rozwojowego "Opracowanie innowacyjnej metodyki i informatycznego systemu zarządzania dla kodyfikacji linii kolejowej". Zajmowałam się wykrywaniem szyn z wykorzystaniem algorytmu RANSAC oraz wykrywaniem innych obiektów infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem filtrów morfologicznych.

**Marmol U.**, Mikrut S., 2012. Attempts at automatic detection of railway head edges from images and laser data. Image Processing & Communications : an International Journal vol. 17 no. 4 s. 151–160.

**Marmol U.**, 2012. Analiza algorytmów detekcji obiektów infrastruktury kolejowej na podstawie chmury punktów mobilnego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol. 24 s. 211–220.

Uzyskane wyniki przedstawiłam na konferencji Notice "Computer Science with the Purpose and Human-Centred Information System Design"w Słoku k/Bełchatowa w 2012 r oraz na XVIII Ogólnopolskim Fotogrametrycznym Sympozjum Naukowym "Nowe wyzwania dla fotogrametrii, teledetekcji i kartografii w obliczu współczesnych systemów geoinformacji" w Kazimierzu Dolnym w 2012 r.

Jednym z głównym narzędzi moich badań jest analiza częstotliwościowa danych przestrzennych, z wykorzystaniem metod klasycznych, czyli szeregów Fouriera i transformaty Fouriera oraz metod falkowych. W kolejnej publikacji zawarto badania związane z możliwością wykorzystania szeregów Fouriera w procesie interpolacji obiektów powłokowych:

Lenda G., Ligas M., **Marmol U.**, 2014. Determining the shape of the surface of shell structures using splines and alternative methods: kriging and fourier series. KSCE Journal of Civil Engineering vol. 18 no. 2, s. 625–633. Lista Filadelfijska. Baza Web of Science, IF = 0,484.

Oddzielną problematyką moich badań jest określenie dokładności naziemnych skanerów laserowych. W prowadzonych analizach skupiono się na czynnikach mających wpływ na dokładność pomiaru materiałów syntetycznych. Efektem prac jest publikacja:

Lenda G., **Marmol U.**, Mirek G., 2015. Accuracy of laser scanners for measuring surfaces made of synthetic materials. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 5, s. 357-372. Lista Filadelfijska, Baza Web of Science, IF = 0,554.

Urscule Marmal