

**WYKRYWANIE POJEDYNCZYCH DRZEW NA PODSTAWIE
ZINTEGROWANYCH DANYCH LIDAROWYCH I FOTOGRAMETRYCZNYCH**
**DETECTION OF INDIVIDUAL TREES BASED ON THE COMBINATION OF
LIDAR DATA AND PHOTOGRAMMETRIC DATA**

Urszula Marmol

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: lotniczy skaning laserowy, wykrywanie drzew, filtry morfologiczne, filtry krawędziowe, integracja danych

STRESZCZENIE: Lotniczy skaning laserowy to efektywna i wiarygodna metoda pozyskiwania danych dla celów inwentaryzacji terenów leśnych. Niniejszy artykuł przedstawia metodykę wykrywania pojedynczych drzew z wykorzystaniem zintegrowanych danych lidarowych i fotogrametrycznych. Badania prowadzono na terenie uroczyska leśnego Głuchów. W celu wykrycia pojedynczych drzew wykorzystano algorytmy morfologii matematycznej. Morfologia matematyczna jest skutecznym narzędziem przetwarzania danych, umożliwiającym filtrację i detekcję różnorodnych struktur powierzchniowych. Dla poprawy analizy została włączona ortofotomapa w barwach naturalnych. Przeprowadzone badania wykazały, że integracja danych laserowych i fotogrametrycznych pozwala na uzyskanie dokładnych informacji o liczbie drzew i ich wymiarach.

1. WPROWADZENIE

Dane lotniczego skanowania laserowego posiadają ogromny potencjał w określaniu wielu parametrów drzewostanu. Obecnie prowadzonych jest szereg prac badawczych poświęconych tematyce automatycznego wyznaczania pojedynczych drzew. Wykorzystanie w procesie detekcji wyłącznie informacji laserowej okazuje się jednak niewystarczające - liczba drzew może zostać zarówno zaniżona, jak i nadmiernie oszacowana, z powodu zmian wysokości w obrębie pojedynczych koron oraz problemów z jednoznaczną identyfikacją obrysów koron drzew (Kwak et al., 2007). Włączenie w procesie badawczym dodatkowych informacji zawartych w zdjęciach lotniczych wydaje się podejściem logicznym, które z założenia powinno przynieść poprawę rezultatów.

W niniejszym artykule przeprowadzono prace badawcze związane z weryfikacją tezy, że integracja danych laserowych i fotogrametrycznych pozwoli na poprawę wiarygodności wyznaczenia pojedynczych drzew oraz przyczyni się do zwiększenia stopnia automatyzacji procesu.

2. DANE ŹRÓDŁOWE

2.1. Obszar badań

Badania prowadzono na terenie uroczyska leśnego Głuchów (powiat skierniewicki). Uroczysko stanowi część Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie należącego do SGGW w Warszawie. Wybrano obszar o powierzchni 1 ha, porośnięty lasem liściastym.

2.2. Dane laserowe

Obszar badawczy został zarejestrowany w roku 2007 w dwóch terminach: wiosennym (2-3 maja) oraz letnim (9 lipca i 30 sierpnia) za pomocą lotniczego skanera laserowego FALCON II (Toposys, 2009). Nalot wykonano z wysokości około 850 m, a pokrycie poprzeczne pomiędzy pasami wyniosło 50%. Zarejestrowano pierwsze i ostatnie odbicie impulsu lasera od obiektów terenowych. Dodatkowo zostały zapisane informacje dotyczące intensywności impulsu lasera. Średnia gęstość skanowania dla wybranego pola badawczego wyniosła 10 punktów/m².

2.3. Dane obrazowe

Równocześnie z rejestracją skanerową, pozyskano cyfrowe dane obrazowe – zdjęcia lotnicze o rozdzielczości przestrzennej 0.15 m. W okresie wiosennym wykorzystano skaner liniowy RGB/NIR LINE SCANNER firmy TopoSys, a w okresie letnim kamerę cyfrową DMC 2001 produkcji ZI Imaging.

Na podstawie zdjęć wygenerowano ortofotomapę o pikselu 0,20 m w barwach naturalnych oraz ortofotomapę spektrostrefową, które zostały wykorzystane w dalszych analizach.

3. ANALIZA DANYCH LASEROWYCH

3.1. Generowanie Numerycznego Modelu Koron Drzew

Numeryczny Model Koron Drzew, czyli DCM (ang. Digital Canopy Model) został wygenerowany jako różnica pomiędzy DSM i DTM.

W pierwszym etapie został wygenerowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (ang. DSM) według prostego algorytmu przedstawionego w (Marmol, Będkowski, 2008). Ustalono wstępnie, że w celu uzyskania wymaganej w projekcie dokładności, oczko generowanej siatki DSM powinno być wielkości 0,5 m × 0,5 m. W związku z tym dla wybranego interwału dokonano wyboru punktu najwyższego, jako prawdopodobnego punktu pokrycia. Do ustalenia wartości rzędnych zastosowano metodę najbliższego sąsiada.

W celu wyznaczenia punktów terenowych, jako metodę filtracji wybrano algorytm aktywnego modelu TIN zaimplementowany w oprogramowaniu TerraScan firmy Terrasolid Corporation z Finlandii (Axelsson 1999, 2000). Procedura ta pozwoliła na wyodrębnienie z chmury punktów pomierzonych, punktów odpowiedzialnych za przebieg powierzchni topograficznej. Wyselekcjonowane punkty zostały zapisane w siatce

regularnej o rozdzielczości 0.5 m. Model DCM powstał z różnicy dwóch opisanych powyżej modeli.

3.2. Wyznaczenie wierzchołków pojedynczych drzew

Numeryczny Model Koron Drzew w postaci siatki regularnej, może być traktowany jako obraz cyfrowy. W związku z tym algorytmy przetwarzania obrazów mogą znaleźć zastosowanie w procesie wyznaczenia wierzchołków pojedynczych drzew.

Wszystkie etapy badań zaimplementowano w środowisku MATLAB (The Mathworks, 2009). W pierwszym kroku model DCM został poddany morfologicznej operacji otwarcia, która pozwoliła na uwydatnienie maksimum lokalnych. Morfologiczna operacja otwarcia polega na wykonaniu na obrazie erozji a następnie dylatacji (Malina, Smiatacz, 2008):

$$O(I(x, y)) = \max_{r,s \in B} (\min_{r,s \in B} I(r, s)) \quad (1)$$

gdzie:

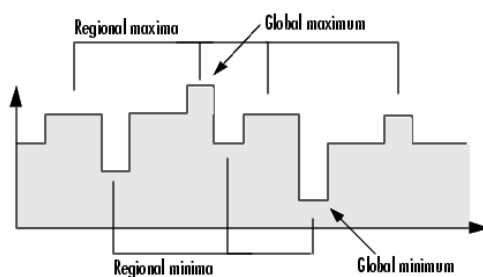
$I(x,y)$ – analizowany obraz,

B – element strukturalny.

Element strukturalny został wybrany w kształcie dysku o promieniu 2 piksele, czyli 1 m, bazując na kształcie i wymiarach najmniejszych drzew na polu testowym.

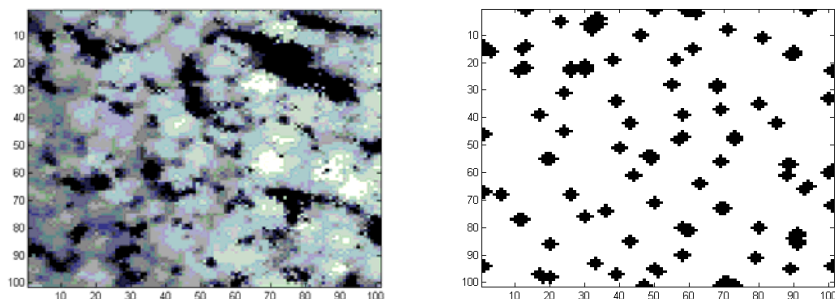
W drugim etapie została przeprowadzona detekcja ekstremów lokalnych za pomocą transformacji WTH (ang. *White-Top Hat*). Jest ona zdefiniowana jako różnica obrazu oryginalnego i jego otwarcia:

$$WTH = I(x, y) - O(I(x, y)) \quad (2)$$



Rys. 1. Lokalne maksima i minima. Źródło: (The Mathworks Inc., 2009)

Transformacja ta wykrywa lokalne maksima jasności (w tym przypadku: wysokości) niezależnie od bezwzględnego poziomu jasności w obrazie, co odróżnia ją od operacji progowania. Uzyskano obraz binarny, gdzie wartość 1 odpowiada wierzchołkom drzew (Rys. 2).



Rys. 2. Wygenerowany DCM (po lewej). Wierzchołki drzew wyznaczone z wykorzystaniem transformacji WTH (po prawej).

4. ANALIZA DANYCH OBRAZOWYCH

4.1. Wyznaczenie obrysów koron drzew na ortofotomapie cyfrowej

W celu wyznaczenia obrysów koron drzew zostały wykorzystane metody wykrywania krawędzi na obrazach cyfrowych. Pozwoliło to na wstępne wyodrębnienie zakresu przestrzennego drzew do dalszej analizy. Badania przeprowadzono w środowisku MATLAB.

Jako metodę detekcji krawędzi wykorzystano operator LoG (*ang. Laplacian of Gaussian*). Operator Laplace'a wydaje się właściwym filtrem wyostrajającym ze względu na możliwość wykrywania krawędzi niezależnie od ich przebiegu na obrazie, co ma miejsce w przypadku wykrywania pojedynczych drzew (Wang *et al.*, 2004). Wykorzystanie jądra Gaussa pozwala na ustalenie skali krawędzi, która podlegać będzie detekcji.

W pierwszym etapie zastosowane jest wygładzenie Gaussa w celu usunięcia szumów:

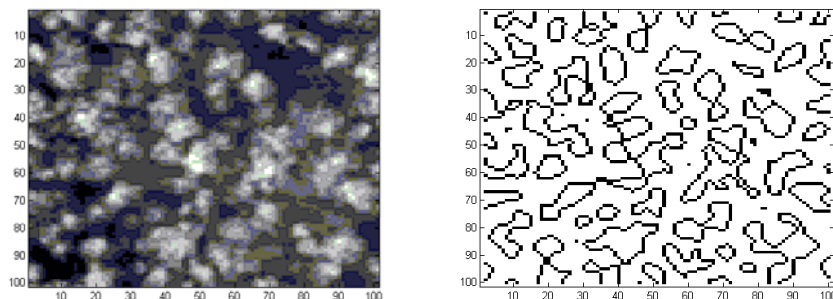
$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

σ – współczynnik wygładzenia w pikselach określający minimalną szerokość krawędzi podlegającej wyodrębnieniu

Kolejny etap to wyznaczenie drugiej pochodnej wygładzonego obrazu:

$$\nabla^2[I(x, y) * G(x, y)] \quad (4)$$

W przeprowadzonych badaniach przyjęto wartość $\sigma = 1$, a szerokość maski równą 5σ . Wynik krawędziowania przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Obszar badawczy na ortofotomapie (po lewej). Obrysy koron wydodrębnione z wykorzystaniem operatora LoG (po prawej).

5. INTEGRACJA DANYCH LIDAROWYCH I OBRAZOWYCH

W dotychczasowych badaniach, prowadzonych na terenie uroczyska Głuchów, przeprowadzono określenie zasięgu pojedynczych drzew wyłącznie z wykorzystaniem danych laserowych, dla których zastosowano transformację wododziałową (Marmol, Będkowski, 2008), lub jej modyfikację – algorytm „kropli deszczu” (Będkowski, Stereńczak, 2008).

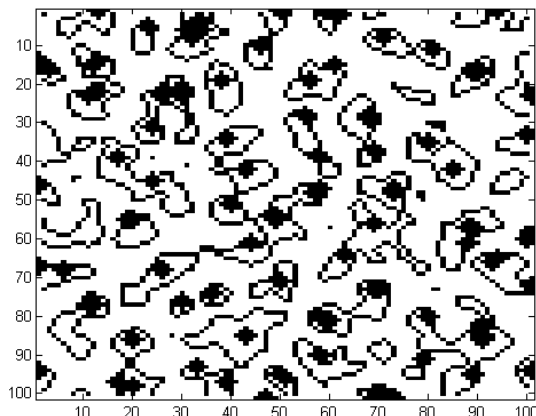
Metoda wododziałowa była testowana także przez innych naukowców (Weinecker *et al.* 2004), (Mei, Durrieu, 2004). Główny mankament algorytmu to zawyżanie powierzchni korony drzew w przypadku terenów o niskim stopniu zadrzewienia.

Włączenie do badań informacji zawartej w zdjęciach lotniczych powinno przyczynić się do uwiarygodnienia procesu wydodrębniania drzew.

Na poniższym rysunku przedstawiono wynik scalenia wierzchołków drzew, wydodrębnionych z danych laserowych i ich zakresów przestrzennych, pozyskanych z ortofotomapy cyfrowej.

Wizualna ocena wyników ujawniła problem związany z występowaniem skupisk drzew. Odzwierciedlił się on poprzez wystąpienie kilku wierzchołków drzew w obrębie pojedynczej korony. Konieczny był subiektywny podział obrysu na pojedyncze segmenty, kierując się występującymi przewężeniami, co nie zawsze było procesem jednoznacznym.

Ostatecznym etapem badań było zastosowanie klasycznej segmentacji wododziałowej. Z powstałych segmentów zostały wybrane te, które spełniały wcześniej opracowane kryteria, czyli segmenty, które posiadały wierzchołek oraz zawierały się w wygenerowanych wcześniej zakresach przestrzennych koron.



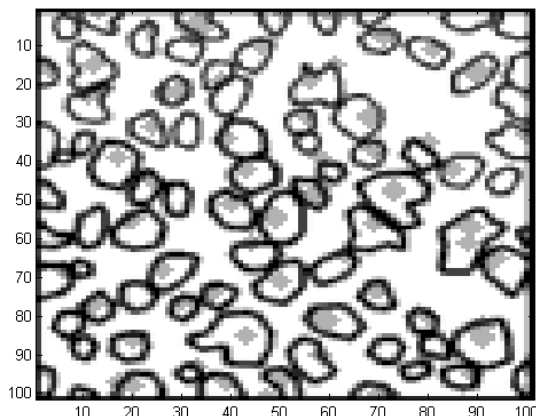
Rys. 4. Wynik scalenia wierzchołków drzew, wyodrębnionych z danych laserowych i ich zakresów przestrzennych, pozyskanych ze zdjęć lotniczych.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Niestety dla prezentowanego obszaru badawczego brakowało niezależnych pomiarów terenowych, które stanowiłyby dane odniesienia dla oszacowania dokładności proponowanych rozwiązań.

W związku z tym dla oceny przedstawionych algorytmów przeprowadzono manualną wektoryzację na ortofotomapie spektostrefowej. Drzewa na polu testowym zostały zdigitalizowane przez dwóch niezależnych operatorów. Wektoryzacja ręczna to niestety proces subiektywny, związany z interpretacją obrazu. W większości przypadków uzyskano dużą zgodność w wydzieleniu drzew przez obydwu operatorów. Jedynie w przypadku zachodzących na siebie koron drzew, ich precyzyjna identyfikacja nie była możliwa i podział koron drzew na poszczególne segmenty przebiegał w sposób subiektywny. Niemniej jednak, całkowita liczba drzew wyznaczona przez obu operatorów była jednakowa i wyniosła 84 obiekty. Wynik wektoryzacji, przeprowadzonej przez jednego z operatorów został przedstawiony na Rys. 5, wraz z symbolicznym przedstawieniem drzew wyodrębnionych w procesie automatycznym.

Na badanym obszarze zostało wyznaczonych automatycznie 68 drzew. Można zatem powiedzieć, że przedstawiona metodyka badań przyniosła zadawalające efekty. Do uzyskanych wyników należy jednak podchodzić z dużą dozą sceptycyzmu, biorąc pod uwagę brak wiarygodnych danych referencyjnych, oraz fakt, że analiza została przeprowadzona na jednym polu testowym.



Rys. 5. Manualna wektoryzacja zasięgów przestrzennych pojedynczych koron drzew. Punkty w kolorze szarym symbolizują drzewa wykryte w sposób automatyczny.

7. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania przyniosły obiecujące rezultaty w procesie wyznaczania pojedynczych drzew. Dla badanego obszaru testowego uzyskano dużą zgodność pomiędzy manualną wektoryzacją, a w pełni automatycznym wyznaczeniem zasięgu przestrzennego drzew.

Przedstawione analizy stanowią przyczynek do udowodnienia tezy, że to właśnie integracja danych będzie stanowić w przyszłości podstawę dla rozwiązań wielu problemów badawczych. Dane laserowe i fotogrametryczne wykazują właściwości komplementarne, można mankamenty jednej z metod, kompensować zaletami drugiej i w efekcie uzyskiwać bardziej wiarygodne i miarodajne wyniki. Zdjęcia lotnicze pozwalają na wyznaczenie obrysów koron drzew, jednakże nie zawsze odbywa się to w sposób jednoznaczny – jak ujawniły badania, gęste skupiska drzew zostają objęte pojedynczym obrysem. Pomiar laserowy pozwala na wykrycie wierzchołków drzew i w związku z tym przyczynia się do zwiększenia wiarygodności określenia liczby drzew.

8. LITERATURA

Axelsson P., 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (54), s. 138-147.

Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, Vol. XXXIII/4B, s. 110-117.

Beucher S., 1992. The watershed transformation applied to image segmentation. *Scanning Microscopy International*, suppl. 6, s. 299-314.

- Będkowski K., Stereńczak K. 2008. Porównanie zasięgów koron drzew wyznaczonych na podstawie danych skanowania laserowego i pomiarów fotogrametrycznych. *Czasopismo Techniczne* z.19 Środowisko z.2-Ś. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Kwak D-A., Lee W-K., Lee J-H., Biling G. S., Gong P., 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LIDAR data. *Journal of Forest Research*, Vol. 12, s. 425-434.
- Malina W., Smiatacz M., 2008. *Cyfrowe przetwarzanie obrazów*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- 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. 18a, s. 377-385.
- Mei Ch., Durrieu S. ,2004. Tree crown delineation from digital elevation models and high resolution imagery. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2: Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Niemcy.
- The MathWorks Inc., 2009: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- TopoSys, 2009. www.toposys.de.
- Wang L., Gong P., Biging G. S., 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), s.351-357.
- Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R., 2004, Development of Filtering, Segmentation and Modelling Modules for LIDAR and Multispectral data as a Fundament of an Automatic Forest Inventory System. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Niemcy.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.949

DETECTION OF INDIVIDUAL TREES BASED ON THE COMBINATION OF LIDAR DATA AND PHOTOGRAMMETRIC DATA

KEY WORDS: aerial laser scanning, tree detection, morphological filters, edge filters, data fusion

SUMMARY: Aerial laser scanning is an effective and reliable method providing data for forestry inventory control. This paper presents a methodology of detection of individual trees using the integration of LIDAR data and those from aerial images. The study area for this investigation was Głuchów nature reserve, belonging to Warsaw University of Life Sciences. To detect individual trees, mathematical morphology was applied. Mathematical morphology is a powerful tool for filtering and detecting many different surface structures. Aerial imagery was included in order to improve the accuracy. This study has demonstrated that an integration of laser data and aerial imagery make it possible to obtain accurate information about tree number and dimensions.

Dr inż. Urszula Marmol
e-mail: entice@agh.edu.pl
tel. +12 6172302