

**ZASTOSOWANIE KLASYFIKACJI OBIEKTOWEJ  
WYSOKOROZDZIELCZYCH OBRAZÓW  
TELEDETEKCYJNYCH  
ORAZ ANALIZ PRZESTRZENNYCH GIS  
W KARTOWANIU DRZEWOSTANÓW**

**APPLICATION OF OBJECT ORIENTED CLASSIFICATION  
OF QUICKBIRD VHR SATELLITE IMAGES AND GIS  
SPATIAL ANALYSIS IN FOREST STAND MAPPING**

**Roland de Kok<sup>2</sup>, Krystian Kozioł<sup>1</sup>, Piotr Wężyk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny  
Akademia Rolnicza w Krakowie

<sup>2</sup>Landconsult.de, Niemcy

**Słowa kluczowe: QuickBird, segmentacja, filtry Sobela, NDVI, algorytm Delanuay, struktura pozioma drzewostanów, kartowanie**

Key words: QuickBird, segmentation, Sobel filter, NDVI, Delanuay algorithm, horizontal structure of forest stand, plotting

## **Wstęp**

Nowe technologie lotniczych skanerów hiperspektralnych, kamer cyfrowych czy skaningu laserowego (Diedershagen i in. 2003; Hyypä i in. 2004; Hyypä, Samberg 1999; Pitkänen 2001) dostarczają leśnictwu w szybkim tempie coraz większej ilości danych, które po przetworzeniu są integrowane w systemach geoinformatycznych na poziomie lokalnym lub regionalnym (Wężyk, 2004). Wysokorozdzielcze obrazy satelitarne (ang. *Very High Resolution*; VHR) charakteryzujące się pikselem terenowym poniżej 1,0 m stwarzają zupełnie nowe możliwości ich zastosowania w praktyce leśnej i badaniach przyrodniczych (Sasakawa, Tsuyuki 2003; Toutin, Cheng, 2002; de Kok i in. 2004). Dotychczasowe polskie doświadczenia z wdrażaniem do praktyki w Lasach Państwowych danych teledetekcyjnych nie spowodowały na razie znaczących skutków w postaci wprowadzenia do instrukcji urządzania lasu wskazań wykorzystania metod klasyfikacji obrazów teledetekcyjnych (Mozgawa i in. 2001; Zajączkowski, Wężyk 2004).

Metoda klasyfikacji obiektowej (ang. *Object Oriented*; O.O.) obrazu odchodzi od tradycyjnej analizy pojedynczego piksela i bazuje na algorytmie segmentacji uwzględniającym zarówno zarejestrowaną informację radiometryczną jak i parametry kształtu i sąsiedztwa obiektów (Haralick, Shapiro 1985; Blaschke, Hay 2001; de Kok 2004). Pojawiają się więc nowe możliwości, pół lub w pełni automatycznej, klasyfikacji obrazów (np. IKONOS), których rozdzielczość, zarówno terenowa jak i spektralna nieustannie rośnie (Franklin i in. 2001; Burnett, Blaschke 2003, Wężyk, de Kok 2005). Dodatkowym źródłem precyzyjnych danych

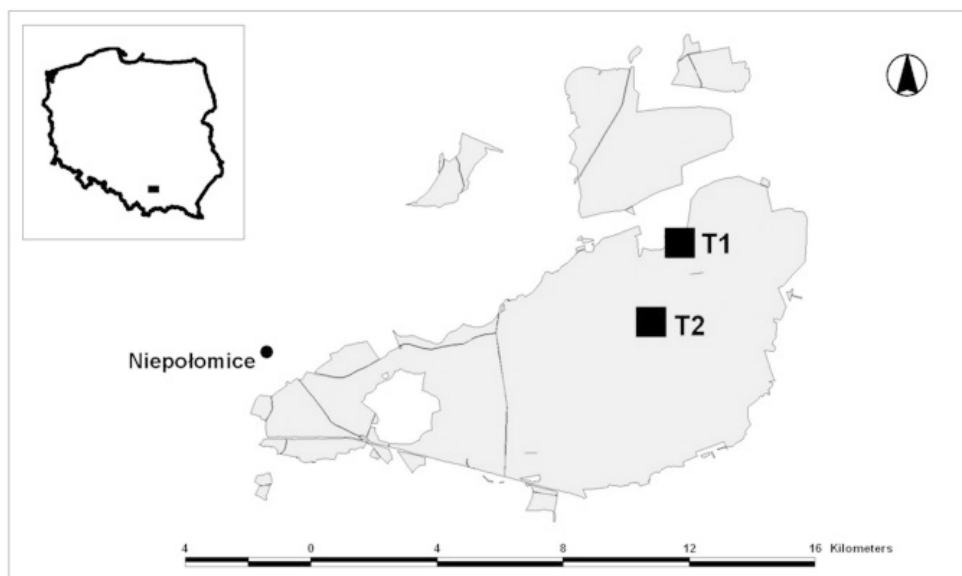
jest skaning laserowy (LiDAR), który dostarczać może nawet do kilkunastu czy wręcz kilkudziesięciu punktów pomiarowych na 1m<sup>2</sup>. Przetworzone (filtracja, triangulacja, próbkowanie) chmury punktów mogą być wykorzystywane w procesie klasyfikacji obiektowej w celu określania lokalizacji pojedynczych drzew, a nawet mogą być podstawą tworzenia modeli opisujących kształt korony (Gougeon 1998, 2000; Gougeon i in. 2001).

Z literatury znane są zasadniczo dwie koncepcje wykrywania koron pojedynczych drzew oraz opisu ich kształtu. Pierwsza z nich dotyczy wskazania wierzchołka drzewa jako lokalnego maksimum jasności pikseli tworzących obraz korony (ang. *hot-spot*). Druga grupa metod wykorzystuje zazwyczaj bardziej zaawansowane algorytmy, polegające na wykrywaniu (określaniu przebiegu) konturów koron drzew czy modelowaniu powierzchni tworzonej przez korony (Brandtberg i in. 2003).

Głównym celem prezentowanej pracy było opracowanie metodyki bazującej na analizie topologicznego modelu trójkąowego (TIN), służącej weryfikacji wyników detekcji pojedynczych koron drzew, uzyskiwanej metodami klasyfikacji obiektowej z wykorzystaniem wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych QuickBird.

## Teren badań

Obszary testowe ulokowano na terenie Puszczy Niepołomickiej (dolina Wisły, ok. 30 km na wschód od Krakowa), której drzewostany podlegały szczegółowej analizie w ramach projektu FOREMMS 5FP UE w latach 2000–2003 (Solberg, Wężyk 2004). W roku 2001 wytyczono transekty: T1 oraz T2 (rys. 1), reprezentujące drzewostan mieszany dębowo-sosnowy (*Pino-Quercetum*) typowy dla tej części Europy.



Rys. 1. Lokalizacja transektów T1 oraz T2 na obszarze Puszczy Niepołomickiej

## Metodyka

Prace terenowe polegały m.in. na sporządzeniu dla transektów T1 (100m x 175m) oraz T2 (125m x 150m) mapy cyfrowej, lokalizacji pni oraz koron drzew wraz z określeniem gatunku, wysokości i pierśnicy (średnica na 1,3 m) drzewa. Pomiarów na przygotowanej siatce pomiarowej (25 x 25 metrów) dokonywano w lokalnym układzie z dokładnością centymetrową posługując się w tym celu tachimetrem elektronicznym TC600 firmy Leica. Plany koron drzew sporządzane były przez wykreślenie ich rzutu na płaszczyznę poziomą przy pomiarze w 8 kierunkach. W trakcie prac kameralnych, dane z pomiarów terenowych zostały przetworzone do postaci wektorowej (skrypty języka Avenue, ArcView 3.2 ESRI). Każde drzewo z transektu badawczego reprezentowane było na mapie cyfrowej poprzez trzy obiekty, tj.: środek pnia (warstwa punktowa), środek rzutu korony (warstwa punktowa) oraz poligon reprezentujący koronę (warstwa poligonowa). W analizach przestrzennych GIS wykorzystywano oprogramowanie ArcView ArcGIS 9 (ESRI).

Wszystkie obiekty warstw oraz zebrane informacje opisowe, zgromadzone w bazie danych Access, posiadały unikatowy identyfikator (ID) umożliwiający wzajemne relacje pomiędzy tabelami. W dalszych analizach, warstwy te poprawnie topologicznie i poddane transformacji do układu PUVG 1992/19, traktowano jako dane referencyjne.

Pomiarów punktów dostosowania (GCP), jakimi były narożniki założonej siatki pomiarowej, dokonano metodą DGPS (odbiorniki Pathfinder ProXRS, Trimble; stacja bazowa Trimble – Kraków AR).

Wysokorozdzielczy obraz satelitarny QuickBird, zarejestrowany dnia 15.09.2003 r. (godzina 10:23:06, czas lokalny) zakupiony został od Digital Globe jako produkt Standard (4 kanały MS 2,4m x 2,4 m oraz 1 kanał PAN 0,62m x 0,62m; UTM 34U) w ramach projektu realizowanego wspólnie z Instytutem Badawczym Leśnictwa w Warszawie (Zajączkowski i in. 2004). Przetworzeń obrazu dokonywano w oprogramowaniu ER Mapper ver. 6.4 (ERM) oraz eCognition ver.4 Professional (Definines).

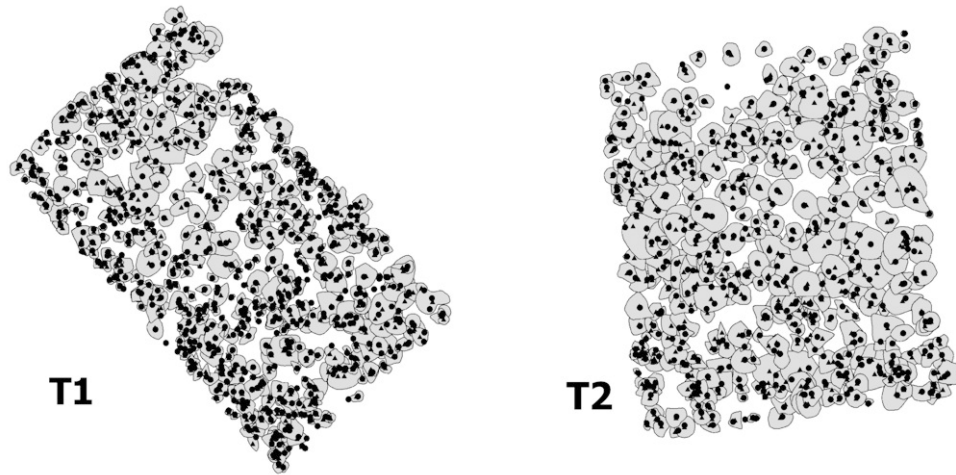
## Wyniki

Podczas prac terenowych zmierzono ponad 1000 drzew (tab.1 zawiera jedynie dane dla drzew z pierwszego piętra drzewostanu widoczne na obrazie QuickBird), a w efekcie działania skryptu Avenue wykreślono poszczególne korony drzew oraz ich środki i pozycję pni, do których przynależą. W ten sposób wygenerowano mapy cyfrowe transektów T1 oraz T2 (rys.2).

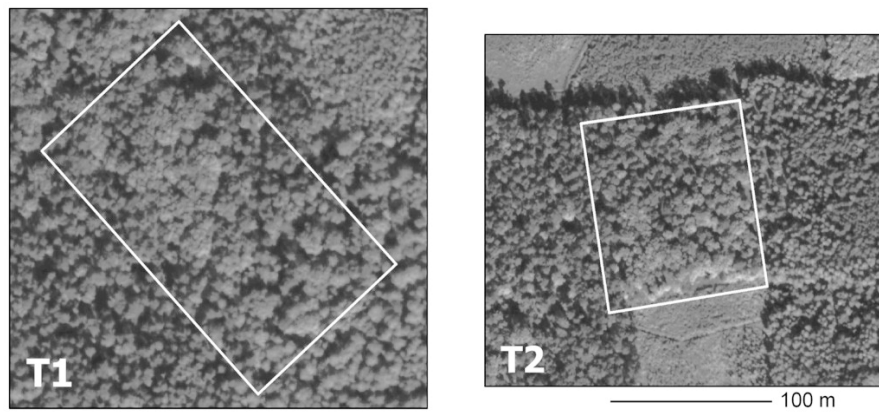
Kalibracja geometryczna obrazu satelitarnego QuickBird Puszczy Niepołomickiej oparta na punktach GCP, pomierzonych w trybie DGPS, obciążona była błędem  $RMS_{XY} = 0,47$  metra (Bednarczyk 2005). W celu poprawienia geopozycji obrazu pojedynczych koron drzew na obrazie QuickBird (rys.3), wynikających z odchylenia skanera od nadiru ( $11,1^\circ$ ), dokonano nieznacznej korekcji w obrębie dwóch wycinków zobrazowania (T1 i T2), przyjmując za referencyjną cyfrową mapę koron (rys.3).

**Tabela 1.** Gatunki drzew pomierzonych podczas prac terenowych na transektach T1 oraz T2

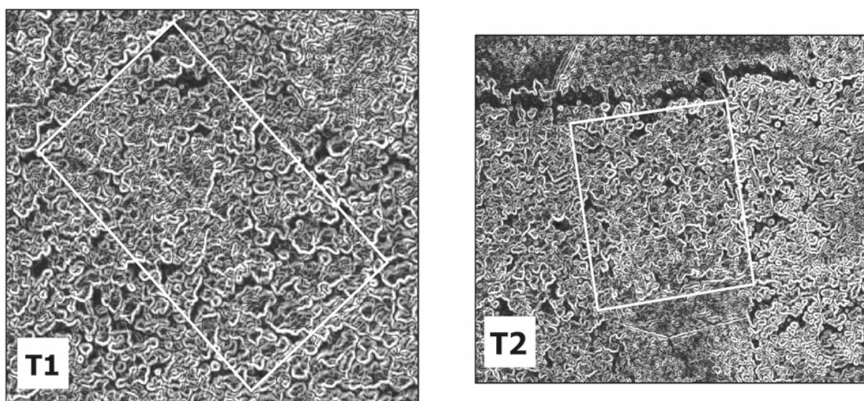
Gatunek	Transekt	
	T1 [szt.]	T2 [szt.]
So	186	154
Db	212	308
Ol	52	0
Brz	26	13
Sw	97	0
<b>Razem</b>	<b>573</b>	<b>475</b>



Rys. 2. Mapy wektorowe koron i pni drzew na transektach T1 i T2 w Puszczy Niepołomickiej



Rys. 3. Fragmenty obrazu QuickBird (15.09.03; PAN) z nałożonymi granicami transektów T1 oraz T2



Rys. 4. Obrazy T1 oraz T2 (kanał PAN QuickBird) poddane filtracji krawędziowej bez preferowanego kierunku



W celu wyekstrahowania informacji o granicach pojedynczych koron lub ich fragmentów (podkoron w przypadku starszych drzew liściastych) posłużono się filtracją danych z kanału PAN satelity QuickBird, z zastosowaniem macierzy konwolucji Sobela (Prewitt 1970). Zastosowanie tej macierzy pozwala na wykrywanie krawędzi obiektów w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanego piksela. Zastosowany filtr Sobela (rys.4) spowodował uwidocznienie się krawędzi obiektów mających przebieg horyzontalny i wertykalny. Stosując filtr dla wielu kierunków jednocześnie otrzymano krawędzie obiektów tworzących obraz. Piksel przetworzonego tym filtrem obrazu o niskiej wartości reprezentował: przestrzeń pomiędzy koronami, wierzchołek główny korony bądź tzw. podkorony. Jednocześnie piksele te graniczą z tzw. obszarami *hot-spot* o wysokiej wartości (obraz filtru Sobela). Te obiekty łącznie rozpatrywane tworzą „południową” (oświetloną przez Słońce) koronę lub jej część. W celu odróżnienia koron lub ich części od luk między drzewami zastosowano obraz NDVI.

Wyeksportowanie środka (jako punktu) „południowej” części korony gwarantuje małe przesunięcie w stosunku do centrum korony. Przesunięcie to dotyczy nie tylko pojedynczego drzewa, ale jest zachowane dla całego obrazu drzewostanu. Pozwala to przyjąć założenie, iż *hot-spot* reprezentują środki koron lub środki podkoron w drzewostanie.

Po zakończeniu wstępnego przetwarzania obrazów, przystąpiono do segmentacji w oprogramowaniu eCognition 4.0 Professional (Definiens). Procesowi segmentacji zostały poddane trzy obrazy tj.:

- obraz PAN QuickBird (współczynnik skali = 25; waga = 5),
- obraz uzyskany po filtracji macierzą Sobela (waga = 3),
- obraz NDVI (waga = 1).

W wyniku tego procesu powstało około 3 mln obiektów. Liczba wykrytych punktów traktowanych jako korony lub podkorony, wyniosła odpowiednio dla obszarów testowych T1 – 652 szt. (573 szt. pomierzone w terenie) oraz T2 – 484 sztuki (475 szt. pomierzone w terenie; tab.1). Problem rozróżniania pojedynczych koron lub ich fragmentów (podkoron) jest niezmiernie istotny w przypadku drzewostanów liściastych starszych klas wieku. Częściowym rozwiązaniem tej trudności może być analiza oparta o zastosowanie trójkątowania. Jednym z podstawowych warunków poprawności klasyfikacji jest posługiwanie się obrazami, których rozdzielczość terenowa gwarantuje, iż zarejestrowana korona jest kilkakrotnie większa od piksela. Według niektórych autorów wartość ta powinna wynosić od 7 do 25 (Pouliot i in. 2002; Leckie i Gougeon 1998). Niestety wysoka rozdzielczość terenowa pociąga za sobą niebezpieczeństwo wyodrębniania podkoron dużych, rozłożystych drzew liściastych i traktowania ich jako pojedyncze drzewa (Brandtberg i in. 2003). W tego typu przypadku pomocne może okazać się w procesie klasyfikacji wykorzystanie informacji z kanałów spektralnych (Pouliot i in. 2002).

Przeprowadzenie wyłącznie procesu segmentacji kanału PAN, obrazu PAN po filtracji macierzą Sobela i uwzględnieniu indeksu NDVI (QuickBird), nie zapewnia jednak możliwości pełnego poprawnego przeanalizowania struktury drzewostanu. Niezbędne są dodatkowe analizy związków topologicznych wyodrębnionych punktów koron i podkoron. W celu użycia modelu topologicznego na podstawie punktów, poddano je procesowi trójkątowania z zastosowaniem algorytmu Delanuay (Cormen i in. 2004). Na podstawie lokalizacji środków koron oraz podkoron w oprogramowaniu ArcView ArcGIS (3D Analyst Extension; ESRI) wygenerowano sieci nieregularnych trójkątów (ang. *Triangulated Irregular Network*; TIN) z określeniem związków topologicznych. Po uzyskaniu modelu topologicznego, dla każdego trójkąta, wyznaczona została najkrótsza środkowa i jej środek (rys. 5). Wartości długości

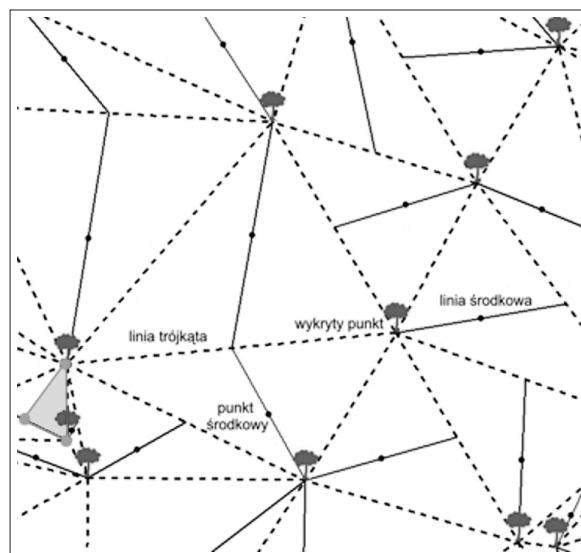
linii trójkąta oraz najkrótszej środkowej pozwalają na bardziej precyzyjne scharakteryzowanie drzewostanu i określenie zagęszczenia drzew (liczba drzew na jednostce powierzchni produkcyjnej), a także rozróżnienie pojedynczych koron od grupy punktów stanowiących koronę pojedynczego drzewa. W celu odróżnienia pojedynczych koron drzew od koron złożonych z tzw. „podkoron” zastosowano algorytm polegający na:

- trójkątowaniu na podstawie wyznaczonych punktów,
- odszukaniu dla każdego trójkąta największego kąta,
- poprowadzeniu środkowej trójkąta z wierzchołka odszukanego kąta,
- wyznaczeniu punktu centralnego utworzonych środkowych,
- analizie długości wyznaczonych linii wraz ze związkami topologicznymi.

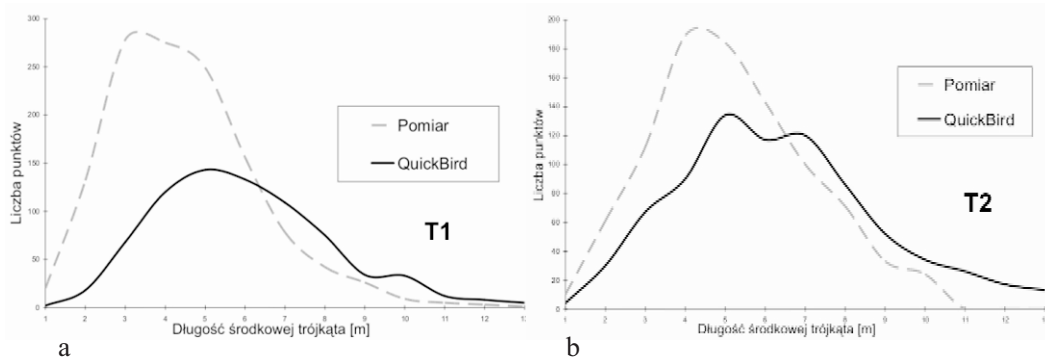
W ten sposób uzyskano dwa zbiory punktów, którym przypisano jako atrybut opisowy długość wyznaczonej linii środkowej. Długość linii środkowej determinowana jest przez wielkość korony, a także przez odległości pomiędzy sąsiednimi koronami. Przeprowadzając analizę statystyczną rozkładu ilości i wartości długości środkowych dla pomiaru terenowego oraz wykrytych przy użyciu klasyfikacji obiektowej koron, doprowadzono m.in. do:

- wykonania analizy przedziałów (co 1m długości środkowej; rys. 6),
- sprowadzenia długości środkowych do przedziału (0; 1),
- analizy liczności prób w znormalizowanych przedziałach co 0,1.

Analizując przebieg krzywych, na wykresach dla T1 oraz T2, okazuje się, iż linia ciągła reprezentująca długość linii środkowej z klasyfikacji obiektowej zobrazowania QuickBird, jest spłaszczona i rozciągnięta. Kształt krzywej mówi o rozkładzie poziomym koron. Na obrazie QuickBird wykrywano tylko korony górnego piętra (duże i wysokie drzewa), a większa liczba koron skupiona jest po prawej stronie wykresu. Po lewej stronie znajdują się punkty, których wartość długości linii środkowej jest niska. Należy je traktować jako punkty tzw. podkoron, a nie głównej korony. W przypadku T1 liczba drzew drugiego piętra była zdecydowanie większa niż na T2 (rys. 6, linia przerywana), natomiast na wykresie dla danych pochodzących z klasyfikacji QuickBird, liczba drzew na transektach jest zbliżona (rys. 6; linia ciągła). Na podstawie punktów środkowych i odległości pomiędzy nimi, a najbliższymi wyznaczonymi punktami koron, dokonano eliminacji punktów traktowanych jako część korony. Jako wartość graniczną przyjęto wielkość trójkąta prostokątnego (powierzchnia) utworzonego na podstawie kwadratu o rozmiarze 3 piksele na 3 piksele (Pouliot i in. 2002; Leckie i Gougeon 1998). Jeżeli powierzchnia trójkąta utworzonego na podstawie połowy linii środ-



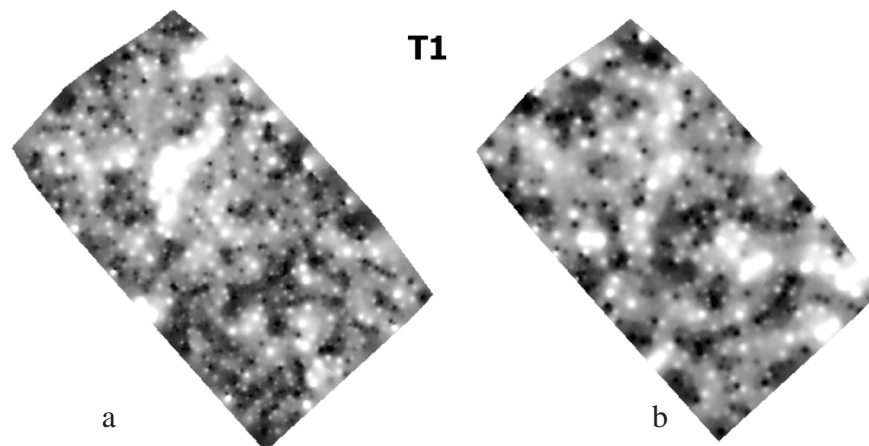
Rys. 5. Wyznaczenie trójkątów oraz linii środkowych i punktu środkowego



Rys. 6. Liczba punktów dla zmieniającej się wartości długości środkowych w przedziałach co 1m (transekty: T1 oraz T2)

kowej oraz podstawy trójkąta z trójkątowania (rys.5, pole trójkąta oznaczone kolorem szarym) była mniejsza niż przyjęta wartość graniczna, punkt był eliminowany. W wyniku eliminacji uzyskano na obrazie QuickBird 514 drzew dla T1 oraz 400 drzew dla T2. Różnica pomiędzy liczbą pomierzonych w terenie, a wykrytych w procesie klasyfikacji obiektowej drzew, spowodowana jest pomiarem wszystkich drzew ( $d_{1,3} > 7$  cm) w drzewostanie, a także zdarzeniami losowymi jakie zaszły pomiędzy kartowaniem terenowym a wykonaniem zobrazenia satelitarnego. Pitkänen (2001) dla drzewostanów młodszych klas wieku (zagęszczenie około 2000 szt/ha) uzyskiwał 54% zgodności w stosunku do danych z pomiaru terenowego. W starszych klasach wieku natomiast wartość ta osiągała już poziom 70–95% poprawności.

Zastosowany algorytm wyznaczania linii środkowej i jej punktu środkowego oraz przypisanie punktom atrybutu długości linii środkowej umożliwia utworzenie za pomocą interpolacji IDW (ang. *Inverse Distance Weighted*) obrazu zróżnicowania stopnia zwarcia drzewostanu na transekcie T1 (rys.7).



Rys. 7. Interpolacja metodą IDW punktów środkowych T1 dla danych pochodzących: a – z pomiarów terenowych; b – z klasyfikacji obiektowej obrazu QuickBird

Intensywność barwy wyraża stopień zwarcia koron (barwa czarna – zwarcie silne; barwa biała – brak zwarcia). Obraz przedstawia wartość długości linii środkowej trójkąta. Niska jej wartość oznacza bliskie sąsiedztwo następnej korony. Im wartość długości linii środkowej trójkąta jest większa, tym korony są bardziej od siebie odległe. Wartości te mogą być także bardzo pomocne w procesie weryfikacji czy aktualizacji podziału powierzchniowego. Pododdziały reprezentują zwykle homogeniczne wyłączenia (drzewa w tym samym wieku, podobnym zwarcie i innych cechach taksacyjnych). Analiza zmienności przestrzennego rozkładu długości linii środkowej trójkąta może być miarą poprawności stosowanego podziału przestrzennego, szczególnie w lesie gospodarczym. Różnice w prezentowanych na rysunku 7 obrazach mogą być efektem dynamiki zmian w badanych drzewostanach. Przez okres 4 lat jaki upłynął od pomiarów terenowych do wykonania zobrazowania wybrane drzewa mogły zostać usunięte podczas zabiegów hodowlanych.

Przeprowadzone badania dowiodły przydatności stosowania metod trójkątowania oraz analiz topologicznych w procesie automatycznej klasyfikacji pojedynczych drzew. Przy założeniu wykonywania w niedalekiej przyszłości nalotów z użyciem lasera skanującego oraz wysokorozdzielczych skanerów czy wielkoformatowych cyfrowych kamer lotniczych, proces wykrywania pojedynczych drzew ulegać będzie dalszemu doskonaleniu (Popescu i in. 2003; Pouliot i in. 2002).

## Wnioski

Opisana w pracy metoda analizowania i przetwarzania wyników klasyfikacji obiektowej, wykorzystującej dane wysokorozdzielczego skanera QuickBird oraz obrazy pochodne (filtr krawędziowy oraz NDVI), prezentuje nowy sposób podejścia do kartowania struktury poziomej drzewostanów. Analiza długości linii środkowej trójkąta tworzonego na podstawie klasyfikacji obiektowej wysokorozdzielczego obrazu satelitarnego, pozwala na określenie wybranych cech taksacyjnych drzewostanów, takich jak: zwarcie, zmieszanie gatunków drzew bądź pośrednio określenie klasy wieku czy poprawniej fazy rozwojowej drzewostanu.

Doskonalenie metod weryfikacji wyników, uzyskanych na drodze klasyfikacji obiektowej wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych, daje coraz lepsze efekty w zakresie rozpoznawania (wykrywania) pojedynczych koron drzew i skłania do dalszych badań w aspekcie używania terminu „precyzyjne leśnictwo”.

## Literatura

- Bednarczyk P., 2005: Ocena przydatności wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych QuickBird w zasilaniu atrybutowych i geometrycznych baz danych na przykładzie Nadleśnictwa Niepołomice. Praca magisterka wykonana w Laboratorium GIS i Teledetekcji, KEL, WL Akademia Rolnicza w Krakowie, maszynopis.
- Blaschke T., Hay G. J., 2001: Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. *Int. Archives Photogrammetry and Remote Sens.*, 34, part 4/W5, ss. 22-29.
- Brandtberg, T., Warner T.A., Landerberger R.E., McGraw J.B., 2003: Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85 (3), ss. 290-303.



- Burnett C., Blaschke T., 2003: A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis. *Ecological Modelling*, Vol. 168, Issue 3, ss. 233-249.
- Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R., 2004: Wprowadzenie do algorytmów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.
- de Kok R., Koziół K., Wężyk P., Zajączkowski G., 2004: Modeling tree crown density based on Quickbird data. Book of Abstracts. GGRS2004. 1st Goettingen GIS & Remote Sensing Days. Environmental Studies.
- de Kok R., 2004: Object oriented analysis of spatial structural dynamics. Presentation on the eCognition User Meeting, Munich.
- Diedershagen O., Koch B., Weinacker H., Schutt C., 2003: Combining Lidar and GIS data for the extraction of forest inventory parameters. In: ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Umeå, Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management and Geomatics. Working paper 112. 273 p.
- Franklin S.E., Wulder M., Gerylo G.R., 2001: Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *Int. Journal of Remote Sensing*, 22(13), ss. 2627-2632.
- Gougeon F.A., 1998: Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), ss. 276-292.
- Gougeon F.A., 2000: Towards semi-automatic forest inventories using individual tree crown (ITC) recognition. Technology Transfer Note. Forestry Research Applications. *Pacific Forestry Centre*. No 22, ss. 6.
- Gougeon F.A., St-Onge B., Wulder M., Leckie D.G., 2001: Synergy of airborne laser altimetry and digital videography for individual tree crown delineation. Proc. 23rd Canadian Symp. on Rem. Sens., Sainte-Foy, ss. 7.
- Haralick R.M., Shapiro L.G. 1985: Survey: Image Segmentation Techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29 (1): 100-132.
- Hyypä H., Samberg A., 1999: Assessing Forest Stand Attributes by Laser Scanner. *Laser Radar Technology and Applications IV*, 3707: 57-69.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggren H., Rönnholm P., Pyysalo U., Pitkänen J., Maltamo M., 2004: Algorithms and methods of airborne laserscanning for forest measurements. [In:] *International Archives of Photogrammetry nad Remote Sensing*, XXXVI-8/W2, 82-89, Freiburg.
- Leckie D.G., Gougeon F.A., 1998: An assessment of both visual and automated tree counting and species identification with high spatial resolution multispectral imagery. *Automatic Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, Victoria, ss. 141-152.
- Mozgawa J., Choromański A., Zawiła-Niedźwiedzki T., 2001: Potencjalne i praktyczne możliwości wykorzystania teledetekcji w Lasach Państwowych. Mat. I Kraj. Konf. "SIP w LP", Rogów, ss. 21.
- Prewitt J. M. S., 1970. Object Enhancement and Extraction. In *Picture Processing and Psychopictorics*. Ed. B. S. Lipkin and A. Resenfeld. New York: Academic Press.
- Pitkänen J., 2001: Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 832-844.
- Popescu S.C., Wynne R.H., Nelson R.F., 2003: Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(5), ss. 564-577.
- Pouliot D.A., King D.J., Bell F.W., Pitt D.G., 2002: Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment*, 82, ss. 322-334.
- Sasakawa H., Tsuyuki S. 2003: Development of forest type classification technique for the mixed forest with coniferous and broad-leaved species using the high resolution satellite data; <http://definiens-imaging.com/documents/reference2003.htm>
- Solberg R., Wężyk P., 2000: Forest Environmental Monitoring and Management System „FOREMMS” – contribution to the development of sustainable use of natural resources. In: *Application of Remote Sensing in Forestry*, Zvolen, Slovakia
- Toutin T., Cheng P., 2002: QuickBird – A Milestone for High Resolution Mapping. *Earth Observation Magazine*, vol. 11, no. 4, ss. 14-18.

- Wang L. Gong P., Biging G.S., 2004: Automated individual tree crown delineation and treetop detection in high-spatial resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70 (3), ss. 351-358.
- Wężyk P., 2004: Integracja technologii geoinformatycznych w systemie monitoringu i zarządzania ekosystemami leśnym Europy, na przykładzie projektu FOREMMS (V PR UE). *Teledetekcja Środowiska*. Tom 33, s.75-81.
- Wężyk P., de Kok R., 2005: Automatic mapping of the dynamics of forest succession on abandoned parcels in south Poland. In: Strobl et al. Hrsg. *Angewandte Geoinformatik 2005*. Wichman Verlag, Heidelberg, ss. 774-779
- Wężyk P., de Kok R., Zajączkowski G., 2004: The role of statistical and structural texture analysis in VHR image analysis for forest applications. A case study on Quickbird data in the Niepolomice Forest. *Angewandte Geoinformatik*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. ss. 770-775.
- Zajączkowski G., Wężyk P., 2004: Techniki teledetekcyjne w inwentaryzacji urzędzeniowej lasu. *Roczniki Geomatyki*, Tom II, Zeszyt 4, ss. 41-50.

### Summary

*Single crown detection in forest stands based on VHR imagery has been the subject of research for over a decade. Recent progress in crown detection shows how hotspots can be isolated from tree crowns. The spatial distribution of hotspots is related to tree species, stand development and crown density. Due to high resolution (spectral & spatial) of the QuickBird data set, insight into the relationship between crown-hotspots, tree age and crown density - can be analyzed in more detail. The data fusion of spatial information obtained by forest inventory, GPS measurements and the relation between SILP attribute and geometrical database (digital forest map – LMN) allows to build up the connection to the spectral signature registered by the satellite imagery. Estimation of crown diameter based on the hotspots from Quickbird data, as well as the spatial distribution of the total crown area is the main goal of this study. Various concepts (Thyssen polygon, irregular triangulation etc) open diverse modeling possibilities. In this study, a selection of available models is applied to the point set of crown-hotspots. For this purpose, Quickbird image (15.09.2003) of a part of the Niepolomice Forest (south Poland) was used.*

*Crown distribution and development of stands are related to the age and height of trees. The cross validation between different measurements clarify the potential of VHR data to achieve a reliable level of crown density estimation. This allows extrapolating the model over the whole forest area. For the forest management, stand age, species and height are the attributes incorporated in the SILP database (Polish State Forest). However, for the evaluation of successful growth per stand, crown density estimations are crucial and can change abruptly in a few growing seasons due to calamities. Only remote sensing methods and geoinformation techniques can assure low-cost and quick data collection over large forest areas and they are crucial when the needed information is reliable enough to provide decision support.*

dr Roeland de Kok  
roeland\_de\_kok@hotmail.com

dr inż. Krystian Koziół  
rlkoziol@cyf-kr.edu.pl;

dr inż. Piotr Wężyk  
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl

<http://argis.les.ar.krakow.pl>  
tel/fax (12) 662-50-82