

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU DELAUNAY'A W ELIMINACJI I KLASYFIKACJI CHMURY PUNKTÓW Z NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO

APPLICATION OF DELAUNAY ALGORITHM IN ELIMINATION AND CLASSIFICATION OF POINT CLOUDS FROM TERRESTRIAL LASER SCANNING

Krystian Koziół, Piotr Wężyk

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny Akademii Rolniczej w Krakowie

Słowa kluczowe: klasyfikacja, eliminacja, LIDAR, TLS, TIN, analiza sąsiedztwa
Key words: classification, elimination, LIDAR, TLS, TIN, neighbourhood analysis

Wstęp

Dla precyzyjnego scharakteryzowania drzewostanów pod względem produkcyjnym i ekonomicznym stosowane są metody inwentaryzacji leśnej. Dokładność tej informacji oraz powtarzalność jest kluczem do precyzyjnego określania zasobów leśnych w tym m.in. wartości (jakości, ilości) surowca drzewnego.

Pomiary inwentaryzacyjne drzewostanów opierają się w przeważającej części na tradycyjnych pomiarach terenowych z wykorzystaniem prostych urządzeń takich jak: kompas, taśma miernicza i średnicomierz. Coraz częściej w urządzaniu i inwentaryzacji zasobów leśnych stosuje się obecnie następujące technologie: fotogrametrię lotniczą oraz teledetekcję wykorzystującą obrazy VHRS charakteryzujące się rozdzielczością przestrzenną poniżej 1,0 m (de Kok i in., 2005; de Kok, Wężyk 2006; Weinacker i in., 2004).

Pojawienie się na rynku skanerów laserowych (ALS i TLS) służących do pozyskiwania danych, otwiera nowe możliwości w automatyzacji procesów zasilania baz danych. Ze względu na pozyskiwanie informacji w krótkim czasie na dużych obszarach jednym z zastosowań technologii naziemnego skaningu laserowego może być inwentaryzacja lasu. Informacje zawarte w chmurze punktów pomiarowych mogą być interpretowane pod kątem struktury drzewostanów oraz poszczególnych cech taksacyjnych, takich jak: liczba drzew, pozycja poszczególnych pni i koron, pierśnica (średnica pnia na wysokości 1,30 m), wysokość podstawy korony, długość korony czy wysokość drzewa (Aschoff, Spiecker 2004; Bienert i in., 2006; Næsset i in., 2004; Simonse i in., 2003; Hopkinson i in. 2004). Wymienione parametry charakteryzujące drzewostan są określane na podstawie cech pojedynczego drze-

wa, które musi być najpierw zidentyfikowane w chmurze punktów 3D. Prezentowana praca demonstruje możliwość zastosowania zautomatyzowanych metod przez stosowanie algorytmów do przetwarzania chmury punktów 3D pochodzących z TLS. Badania wykonywane są w ramach projektu „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji wybranych technik geomatycznych”, zleconego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych, zarządzanego przez SGGW. W projekcie tym testowana jest przydatność wybranych technologii geoinformatycznych dla urządzania lasu, w tym m.in. naziemnego i lotniczego skaningu laserowego i fotogrametrii cyfrowej.

Teren badań

Do badań wytypowany został drzewostan znajdujący się w środkowo-zachodniej Polsce (WGS84 51°27' N; 17°12' E), na obszarze Nadleśnictwa Milicz (RDLP Wrocław). Pomiaru terenowe zostały przeprowadzone w lipcu 2006 przez specjalistyczną firmę urzędzeniową, tradycyjnymi metodami przyjętymi w Instrukcji Urządzania Lasu (2003).

Metodyka pomiarów naziemnego skaningu laserowego

W listopadzie 2006 roku przy współpracy z AR Poznań, na 30 urzędzeniowych powierzchniach kołowych przeprowadzono naziemny skaningu laserowy. Wykorzystano w tym celu skaner laserowy FARO LS 880. Pomiar odległości od obiektu przeprowadzany jest na podstawie określenia różnicy w przesunięciu fazy fali powracającej od obiektu (ang. *phase difference* lub *phase shift*). Skaner w niezmiernie krótkim czasie (120.000 pps) rejestruje obiekty oddalone do 78 metrów w zakresie 360 i 320 stopni (kąta poziomy i pionowy).

Łącznie prace przeprowadzono na 30 powierzchniach, z czego 6 zlokalizowanych było w drzewostanach liściastych (buk, dąb), a 24 w iglastych (sosna zwyczajna). W tabeli 1 zamieszczono wyniki prac nad algorytmem automatycznej analizy chmury punktów, oparte na materiale z 25 powierzchni kołowych.

W metodyce prac przyjęto technikę skanowania z 4 pozycji tj. z pierwszej (S_1) realizowanej ze środka powierzchni urzędzeniowej i dalej z trzech następnych (S_2, S_3 oraz S_4) rozmieszczonych regularnie wokół powierzchni kołowej. Na każdej powierzchni rozstawiano 5 kul referencyjnych (k1÷k5) niezbędnych do połączenia chmur punktów z poszczególnych pozycji skanera w jeden zbiór danych (rys. 1).

Metodyka pomiarów technologią tradycyjną

Pomiar pierśnicy (DBH) wykonywano średnicomierzem z dokładnością 0,001 m kierując jego długie ramię do środka powierzchni, czyli niestety przeciwnie w stosunku do obrazowania skanerem ustawionym na środku powierzchni. Spowodowało to brak możliwości bezpośredniego porównywania uzyskanych wyników pomiarów z TLS. Dodatkowe prace terenowe niezbędne do testowania algorytmu przeprowadzono w kwietniu i czerwcu 2007 roku

dzięki Laboratorium GIS i Teledetekcji AR Kraków. Dla każdego drzewa na powierzchni urządzeniowej (powierzchnia średnio około 500 m²) określano pierśnicę (DBH) prostopadle do każdej z czterech pozycji skanera (pomiar nazywany dalej AR DBH 1-4). Jednocześnie taśmą mierniczą określono obwód drzewa na wysokości 1,3 metra od gruntu (pomiar nazywany dalej AR PERI). Odległości w pomiarze biegunowym do drzewa (L) mierzono dalmierzem ultradźwiękowym do pnia drzewa. Azymut (Az) odczytywano do środka pni z busoli z dokładnością do 1°.

Prace wstępne i klasyfikacja chmury punktów

Wykorzystując oprogramowanie Faro Scene ver.4 użyte przez firmę FARO, połączono chmury punktów wykonane na poszczególnych powierzchniach, przy czym błędy połączenia nie przekraczały 3 cm przy identyfikacji od 4 do 5 kul referencyjnych. W oprogramowaniu tym wykonano jeszcze podstawowe filtracje usuwając większość błędnych odbić (dość częsty przypadek w tego typu urządzeniach). Tak przygotowane dane eksportowano z dodatkową informacją o intensywności odbicia do plików tekstowych (xyz). Zasięg eksportowanych punktów ograniczono w poziomie do promienia urządzeniowej powierzchni kołowej. W dalszym etapie prac pliki (xyz) importowano do oprogramowania TerraScan (Terrasolid Ltd.), w którym dokonywano dalszego procesu klasyfikacji (rys. 2).

Klasyfikacja ta polegała na wygenerowaniu poprawnego numerycznego modelu terenu (NMT), w oparciu o tzw. punkty najniższe (ang. *low points*). W niektórych przypadkach proces automatyczny musiał być wspomagany przez operatora interaktywnie, ze względu na

Tabela 1. Zestawianie liczby drzew na powierzchniach kołowych określone różnymi metodami

Numer powierzchni	Pomiar terenowy 07.2006	Pomiar terenowy 11.2006	Algorytm	Różnica [3]-[4]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	44	12	44	-32
2	21	21	21	0
3	14	14	14	0
4	7	7	5	-2
5	5	5	5	0
6	15	14	14	0
8	21	21	20	-1
9	22	22	22	0
10	16	17	17	0
11	20	20	18	-2
12	24	17	17	0
13	20	20	16	-4
14	28	28	25	-3
15	21	21	21	0
16	21	21	20	-1
17	13	13	13	0
18	23	23	22	-1
19	30	30	30	0
20	32	31	31	-1
23	38	38	38	0
24	23	23	23	0
25	24	24	14	-10
27	20	19	18	-1
28	22	22	22	0
30	18	18	16	-2

występowanie punktów poniżej poziomu gruntu (błędy ang. *ghost points*). Następnie z punktów znajdujących się powyżej NMT pozyskiwano wycinki chmury punktów o grubości 0,04 m dla rzędnej nad terenem od 1,28 m do 1,32 m, tj. miejsca gdzie został wykonany pomiar pierśnicy w trakcie pomiarów referencyjnych. Odpowiednio przygotowane makro w programie TerraScan (TerraSolid) pozwoliło na uzyskanie wycinków pni oraz innych obiektów (podszyt, podrost, niskie gałęzie i konary). Wycinki eksportowano do pliku tekstowego, który importowano do formatu SHAPE. Plik ten był podstawą działania prezentowanego algorytmu.

Algorytm

Głównym celem stworzenia algorytmu była potrzeba automatycznego wyodrębnienia z wycinka chmury punktów, podstawowej informacji o lokalizacji drzew, ich liczbie (powyżej 7 cm grubości pnia na 1,30 m od NMT) na powierzchni kołowej i jednoczesnym określeniu pierśnicowego pola przekroju pnia (g). Ze względu na bardzo nieznaczne spadki terenu na omawianych powierzchniach badawczych, redukcję wynikającą z tej przyczyny można było pominąć.

Główne zadania jakie postawiono przed algorytmem do automatyzacji przetwarzania danych to:

- określenie sąsiedztwa w chmurze punktów w otoczeniu 2D i 3D (filtrowanie, określenie istotności punktów),
- przyporządkowanie punktów do określonego pnia drzewa,
- określenie zakresu kąтового dla pni widocznych z poszczególnych stanowisk skanera,
- rozpoznanie pni poszczególnych drzew i określenie ich rozmiarów (pola powierzchni),
- obliczenie położenia środka geometrycznego pnia względem środka powierzchni,
- wykreślenie prawdopodobnego obrysu pnia.

Pierwszym etapem działania algorytmu było określenie liczby punktów sąsiadujących z analizowanym pojedynczym punktem w przestrzeni 2D i 3D w zadanym otoczeniu. Punkty posiadające tylko trzech sąsiadów, traktowane były w dalszej części działania algorytmu jedynie jako pomocnicze. Algorytm automatycznego określenia przynależności punktów 3D do określonego pnia realizowany był z zastosowaniem metody trójkątowania algorytmem Delaunay'a pomiędzy punktami, a następnie eliminacji trójkątów nie spełniających wstępnych warunków granicznych (rys. 3).

Algorytm Delaunay'a dokonujący trójkątowania tworzy model wektorowy posiadający cechy topologiczne (de Kok et al., 2005) i bywa często jednym z głównych kryteriów stosowania automatycznych procesów generalizacji obiektów (Chrobak, Koziół i in., 2007; Koziół, 2006). Jako parametry testujące przyjęto wartości kątów trójkąta oraz długości jego boków. Wartość graniczna dla kątów została określona na poziomie powyżej 10° , natomiast wartość graniczna dla długości wahała się od 0,04 m do 0,08 m. Wartość progowa dla odległości uzależniona jest od wielkości samej powierzchni kołowej (maksymalnej odległości od skanera), rozdzielczości skanowania oraz liczby występujących drzew (zagęszczenie szt./ha) i ich wymiarów (wpływ wzajemnego przysłaniania się pni). Eliminacja została przeprowadzona zgodnie z założeniami operatora eliminacji obiektów punktowych w generalizacji kartograficznej (Chrobak, Koziół

i in., 2007). W wyniku przeprowadzonej eliminacji powstają izolowane obiekty poligonowe zawierające punkty 3D (rys. 3). Po utworzeniu obiektów poligonowych możliwe jest zidentyfikowanie punktów znajdujących się w jego wnętrzu. Dla utworzonego obiektu powierzchniowego obliczono wartości następujących atrybutów: powierzchnia, obwód oraz liczba punktów wewnętrznych. Poszczególne obiekty poddawano eliminacji na podstawie atrybutów wg następujących kryteriów:

- liczba punktów wewnętrznych > 3 ,
- liczba punktów granicznych > 3 ,
- obwód poligonu $\geq 0,220$ m (DBH ≥ 7 cm); oraz
- powierzchnia $\geq 0,0039$ m² (DBH ≥ 7 cm).

Po identyfikacji punktów, operator dysponował możliwością filtrowania punktów, przez zastosowanie filtru badania liczby punktów w określonym otoczeniu 2D i 3D (rys. 3). Punkty po dodatkowej filtracji i identyfikacji stanowiły podstawę do utworzenia przez otoczkę wypukłą, obiektów określających prawdopodobny przebieg pnia (rys. 4 a – linia ciągła).

Dla prezentowanego algorytmu jednym z największych wyzwań było rozróżnienie obiektów będących drzewem lub jego fragmentem (rys. 4a), od innych reprezentujących: krzewy, młode drzewa czy niskie gałęzie. Algorytm wykorzystuje zależność pomiędzy punktami na obwodzie obiektu a środkiem geometrycznym, przez promień i azymut (rys. 4b, d). W przypadku okręgu, wykres odległości (promienia) i azymutu jest liniową zależnością, na tej podstawie oparto analizę rozpoznawalności.

Dla reprezentacji pni drzew nie posiadających punktów na całym ich obwodzie (rys. 4a) został opracowany dodatkowy algorytm, tzw. korygujący, bazujący na wielkości wycinka opartego o kąt środkowy α . Algorytm korygujący działa w oparciu o analizę odległości i azymutu punktów wewnętrznych otoczki wypukłej do punktu środkowego obiektu (rys. 4a). Schemat działania polega na określeniu niepełnego wycinka pnia (A_c) i obliczeniu jego przybliżonej powierzchni przez proporcję kątów wewnętrznych i kąta pełnego.

Powierzchnia wykrytego pnia drzewa (A_o) na wysokości 1,30 m może zostać przedstawiona jako suma powierzchni (rys. 5):

$$A_o = A_e + A_c, \quad (1)$$

gdzie:

A_e – powierzchnia pnia bazującego na chmurze punktów,

A_c – powierzchnia brakującego wycinka pnia (o zaniżonej powierzchni).

Algorytm korygujący usuwał wyznaczony wycinek A_c (rys. 5) w celu zastąpienia go poprawioną powierzchnią (A_{cor}) obliczaną z proporcji pomiędzy kątem pełnym, a kątem α i odpowiadającą mu powierzchnią.

Wartość korekty (A_{cor}) wyraża się wzorem:

$$A_{cor} = A_e * \frac{2\pi}{\alpha}. \quad (2)$$

Powierzchnia całkowita przekroju pnia drzewa (A_{real}) określana jest więc jako:

$$A_{real} = A_e + A_{cor} \quad (3)$$

Większość funkcjonujących algorytmów automatycznego obliczania powierzchni przekroju pnia proponuje metodę wpasowywania okręgu (Aschoff et al., 2004), walca (Bienert et al., 2006; Hopkison et al., 2004) lub transformacji Hough'a (Aschoff, Spiker, 2004) zakła-

dając okrąg jako przybliżoną reprezentację pnia. W przypadku wymienionych prac i stosowanych w nich algorytmów, średnia różnica DBH określona na podstawie TLS w stosunku do pomiaru referencyjnego wahała się od 1,2 cm. Należy nadmienić, iż algorytm bazujący na transformacji Hough'a wymaga konwersji danych wektorowych TLS (punktów XY) na obraz rastrowy. W przypadku algorytmów opartych o wpasowanie walca, jego wysokość związana jest z rozmiarem pierśnicy drzewa. Większa pierśnica wymusza większą wysokość walca, a z tego wynika konieczność uśrednienia podstaw walca. Przedstawione w artykule algorytmy dostarczają przede wszystkim dokładnej informacji o pierśnicowym polu przekroju pojedynczych drzew (g).

Wyniki – liczba drzew na powierzchniach

W zależności od usytuowania stanowisk skanera (S_1–S_4) i struktury (przestrzennej, gatunkowej, wiekowej itp.) samego drzewostanu – liczba pni drzew na powierzchni kołowej możliwych do interpretacji (jako pełne pnie lub ich fragmenty) bywa niezwykle różna. W przypadku niektórych powierzchni ze stanowiska centralnego (S_1) nie było widać całkowicie jednego pnia drzewa, a inne były częściowo przysłonięte.

Pomiary referencyjne wykonywane w terenie (07.2006, 11.2006 oraz 04 i 06.2007) wykazały, iż na powierzchniach prowadzono zabiegi hodowlane o różnej intensywności, co jest powodem dużych rozbieżności w liczbie drzew (tab. 1; pow.: 1, 13, i 25). Pomiedzy pierwszym, a drugim pomiarem występowały też zdarzenia losowe, takie jak przewrócenie drzewa przez wiatr, a niektóre powierzchnie zostały całkowicie usunięte (nie są one przedmiotem analizy prezentowanej pracy). Inne przyczyny wystąpienia różnic pomiędzy danymi terenowymi, a działaniem algorytmu wynikają z faktu przypisania pnia drzewa do powierzchni kołowej na podstawie dokładnej odległości od jej środka (wartość uzależniona od standardowo przyjętej powierzchni np. 500 m²). Sytuacja taka miała miejsce w przypadku powierzchni nr 10, gdzie liczba drzew wykrytych przez algorytm jest większa niż liczba wynikająca z pomiarów terenowych (tab. 1). Przyczyną tego jest między innymi precyzja wyznaczenia w terenie okręgu o określonej powierzchni. Selekcjonując chmurę punktów w określonym promieniu od pozycji skanera S_1 precyzyjnie przyjęto tę odległość, co spowodowało pojawienie się „dodatkowego” obiektu.

Wyniki – miary biegunowe, położenie pni

Proces pozyskiwania wycinków pni drzew i zastosowanie algorytmu prowadzi do automatycznego wygenerowania informacji o środkach geometrycznych (centroidach) pni i tym samym stworzenia precyzyjnej mapy ich lokalizacji na powierzchni kołowej. W stosunku do pomiarów tradycyjnych (busola) zaobserwowano stałe przesunięcie kątowe wynikające z zastosowania różnych przyrządów pomiarowych, do określania azymutu od środka powierzchni do drzewa, jak i do tyczki geodezyjnej ustawianej na kierunku północy w momencie skanowania. Dla porównania wyników uzyskanych autorskim algorytmem, dokonano pomiarów azymutu i odległości w oprogramowaniu FARO SCENE (nazywane dalej REF. FARO).

Dla jasnego zobrazowania różnic pomiędzy pomiarami, obliczono kąty wewnętrzne pomiędzy tymi samymi drzewami określone dwoma różnymi metodami. Średnia bezwzględna różnica dla powierzchni poza jednym przypadkiem (pow. nr 5, dla której różnica ta wyniosła 2°) nie przekroczyła 1,2°. Średnia bezwzględna różnica w wyznaczeniu odległości pomiędzy środkiem drzewa a środkiem powierzchni w porównaniu do danych z pomiarów REF. FARO nie przekroczyła 0,15 m, a w porównaniu do pomiarów terenowych nie przekroczyła 0,08 m. Przekładając te wartości na współczynnik liniowy przesunięcia wzajemnego środków pni znajdujących się na krawędzi powierzchni, błąd lokalizacji może przyjmować wartość $\pm 0,16$ m.

Pomiary parametrów pnia

Na podstawie danych uzyskanych podczas pomiarów terenowych, tj:

- wartość DBH z lipca 2006 nazwany dalej – INV.,
- średnią wartość DBH dla czterech pozycji skanera z czerwca 2007 zwaną dalej AR DBH 1-4,
- obwód pnia z kwietnia 2007 zwany dalej – AR PERI,

dokonano obliczeń w porównaniu do wartości pierśnicowego pola przekroju pnia określonego algorytmami autorskimi (tab. 2).

Wartość pierśnicowego pola przekroju (g) wyliczana jest standardowo w celu obliczenia zasobności i zapasu dla poszczególnych drzewostanów. Precyzja wyznaczenia tych wielkości zależy w głównej mierze od jakości obliczeń (g) i w dalszej kolejności od wysokości drzewa. Wyniki osiągnięte przy zastosowaniu algorytmów dają obiecujące wyniki, tylko nieznacznie różniące się od danych referencyjnych. Należy zaznaczyć, iż w przypadku buka automatyzacja procesu określania pierśnicowego pola przekroju dawała identyczne wyniki (-0,04%) w stosunku do referencyjnego obwodu mierzonego taśmą i wielokrotnie lepsze w stosunku do tradycyjnych metod pomiarowych (3,16%). Odwrotnie było w przypadku dębów i grabów, których automatycznie wyznaczone wartości (g) różniły się (+6,78% i -6,06%) znacznie w stosunku do danych z inwentaryzacji lasu (0,67% i 1,74%). Sosna jako najliczniej analizowane drzewo wykazała błąd automatycznego określania jej pierśnicowego pola przekroju (g) na poziomie +3,66%, co było wartością wyższą niż standardowe dane urządzeniowe (+1,10%).

Tabela 2. Zestawienie pierśnicowego pola powierzchni przekroju pnia (g) dla poszczególnych gatunków na analizowanych 25 powierzchniach kołowych

	Suma g [m ²]						
	AR PERI	INV	Różnica	AR DBH 1-4	Różnica	Algorytm	Różnica
	[m ²]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]
Bk	2,4718	2,3938	3,16	2,3967	3,13	2,4728	-0,04
Db	0,9466	0,9403	0,67	0,8967	5,56	0,8865	6,78
Gb	0,3672	0,3608	1,74	0,3592	2,23	0,3909	-6,06
Jw	0,1806	0,17	5,87	0,1726	4,63	0,1819	-0,71
So	15,9124	15,737	1,10	15,8766	0,23	15,3508	3,66

Podsumowanie

Nie ulega wątpliwości, że zastosowanie skaningu laserowego w inwentaryzacji drzewostanów staje się możliwe. Istotnym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem tej technologii jest powtarzalność procedur z zachowaniem określonej dokładności i brak subiektywizmu w odczycie czy przeprowadzaniu samego pomiaru tradycyjnymi metodami (określenie 1,30 m od gruntu, odpowiednie przyłożenie pierśnicomierza do pnia drzewa w poziomie, itd.).

Opisany algorytm działa w sposób automatyczny, co w dużej mierze dodatkowo wpływa na skrócenie całego procesu obliczeń. Odmienne od stosowanych i opisywanych w literaturze światowej metod polegających na wpasowaniu figur geometrycznych nie wymaga przekształcenia (Aschoff, Spiker, 2004) na inny format danych (raster). Często stosowana metoda wpasowania okręgu metodą transformacji Hough'a (Aschoff, Spiker, 2004) lub wpasowania walca lub stożka (Bienert et al. 2006) jest przybliżeniem pnia do wybranej figury geometrycznej.

Opisane działanie algorytmów autorskich nie do końca przedstawia możliwości zastosowania metody triangulacji Delaunay'a w uzyskaniu poprawnego obrazu przekroju pnia drzewa. Jednocześnie proces wykrywania drzewa oraz obliczenia pola przekroju może być powtarzany dla wycinków pnia znajdujących się na dowolnych jego wysokościach (podobnie jak pomiar sekcyjny wykonywany na drzewie leżącym). W wyniku takiego działania możliwe jest uzyskanie szczegółowych informacji służących do określenia objętości pni drzew stojących.

Stosowanie algorytmów do automatycznego obliczania pierśnicowego pola powierzchni przekroju pnia (g) znacząco obniża czasochłonność, jednocześnie zapewniając wysoką poprawność wyników. Opracowany algorytm wymaga jeszcze wielu ulepszeń i pracy (uwzględnienie nachylenia pnia i gruntu), ale pokazuje możliwości technologii naziemnego skaningu laserowego. Może to przyczynić się do zweryfikowania obowiązujących przepisów i instrukcji określających standardy obliczania zasobności drzewostanu. W chwili obecnej wysoka dokładność danych TLS nie jest w zasadzie wykorzystywana w standardowej inwentaryzacji. Dopóki nie zacznie się stosować w praktyce pojęcia „precyzyjne leśnictwo” tak długo skaniny laserowe będą uważane za drogą i zbędną technologię. TLS wydaje się być wreszcie odpowiednim narzędziem do obiektywnego pozyskiwania informacji o strukturze drzewostanu. Jednakże w pełni automatyczne wykorzystanie danych, będzie dopiero możliwe w niedalekiej przyszłości.

Literatura

- Aschoff T., Spiker H., 2004: Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. [In]: The International Archives of Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Deutschland, Vol. XXXVI, Part 8/ W2, pp. 66-70.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mullooly G., Mohan F., 2006: Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. *Image Engineering and Vision Metrology. ISPRS Commission V Symposium, WG 3, Dresden, 25.-27. September 2006*, Vol. XXXVI, PART 5 (<http://reswww.urz.tu-dresden.de/~isprs/proceedings/pages/start.html>).
- Chrobak T., Koziół K., Keller S. F., Szostak M., Żukowska M., 2007: Podstawy cyfrowej generalizacji kartograficznej (red. Chrobak T.), AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- de Kok R., Koziół K., Wężyk P., 2005: Zastosowanie klasyfikacji obiektowej wysokorozdzielczych obrazów teledetekcyjnych oraz analiz przestrzennych GIS w kartowaniu drzewostanów. *Roczniki Geomatyki*. Tom III, Zeszyt 4. s. 99-108.

- de Kok R., Wężyk P., 2006: Process development and sequential image classification for automatic mapping using case studies in forestry. ISPRS WG VIII/11 & EARSeL joint Conference „3D Remote Sensing in Forestry”, Vienna, 14-15 February. pp. 380-384
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Can. J. Forest Research*, 34, pp. 573- 583.
- Kozioł K., 2006: Eliminacja obiektów liniowych z zastosowaniem regionów strukturalnych na przykładzie sieci drogowej. *Roczniki Geomatyki Tom IV Zeszyt 3*. PTIP, Warszawa, s. 109-117.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypää, H., Hyypää, J., Maltamo, M., 2004: Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, pp. 482-499.
- Simonse M., Aschoff T., Spiecker H., Thies M., 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Umeå. pp. 251-257.
- Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R., 2004: Development of Filtering, Segmentation and Modeling 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, 3. bis 6. Okt. 2004.
- PGL LP, 2003: Instrukcja Urządzenia Lasu. Część 1. Instrukcja sporządzania planu urządzania lasu dla nadleśnictwa. Załącznik do Zarządzenia nr 43 DGLP z dn. 18.04.2003 r.
- Wężyk P., 2004: Mity i fakty dotyczące stosowania GPS w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki Tom II Zeszyt 4*. PTIP, Warszawa, s.19-32.

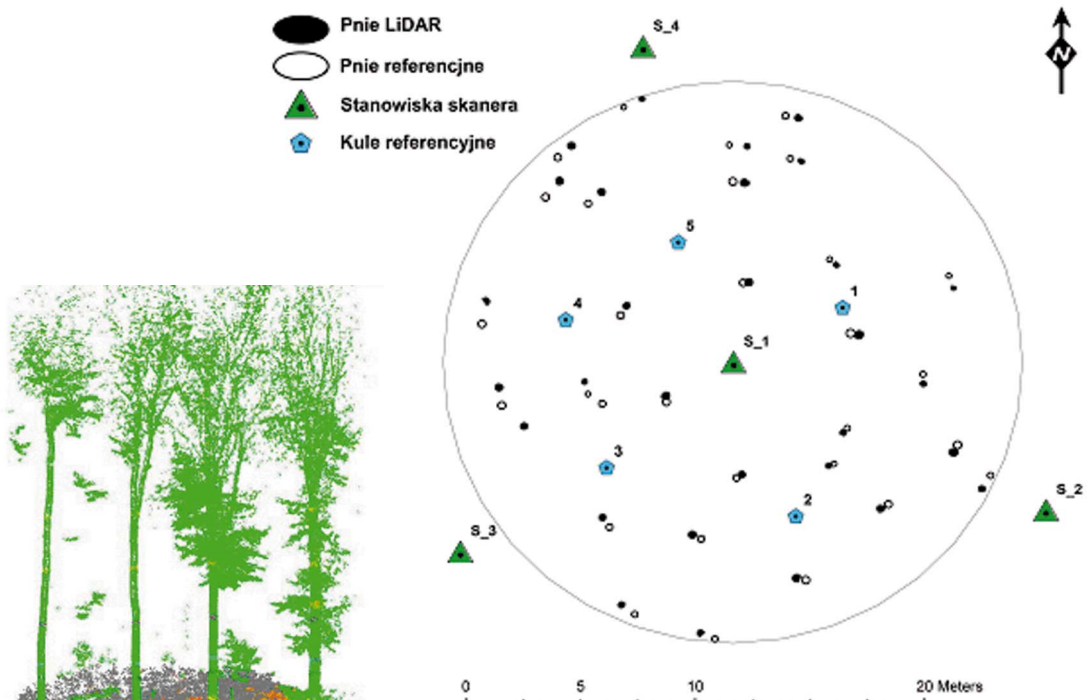
Summary

In the last few years we could observe dynamic changes in the methods of collecting data of objects and in qualitative characteristics of the information gathered. A relatively new technology is laser scanning (LIDAR) both aerial (ALS) and terrestrial (TLS). In LIDAR technology objects are represented by point clouds, which after proper filtration and classification can be useful to define an object and its parameters and features. Great number of measuring points causes often indeterminacy or ambiguity both in geometry and concerning the attributes of the object examined.

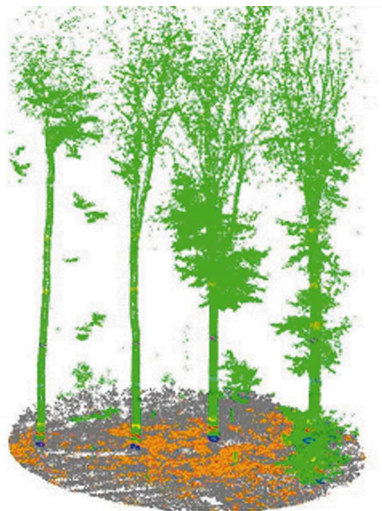
In this paper the problem discussed refers to the use of triangulation in elimination and classification process of point clouds gathered from terrestrial laser scanning and using algorithms of point filtration allowing to eliminate points not belonging to any object. This algorithm was based on the analysis of 3D surrounding points and the classification takes advantage of the well known Delaunay algorithm. Identification of objects was based on their geometrical properties. Testing of developed algorithms was carried out on point clouds obtained from TLS gathered on forest inventory plots.

dr inż. Krystain Kozioł
rlkoziol@cyf-kr.edu.pl

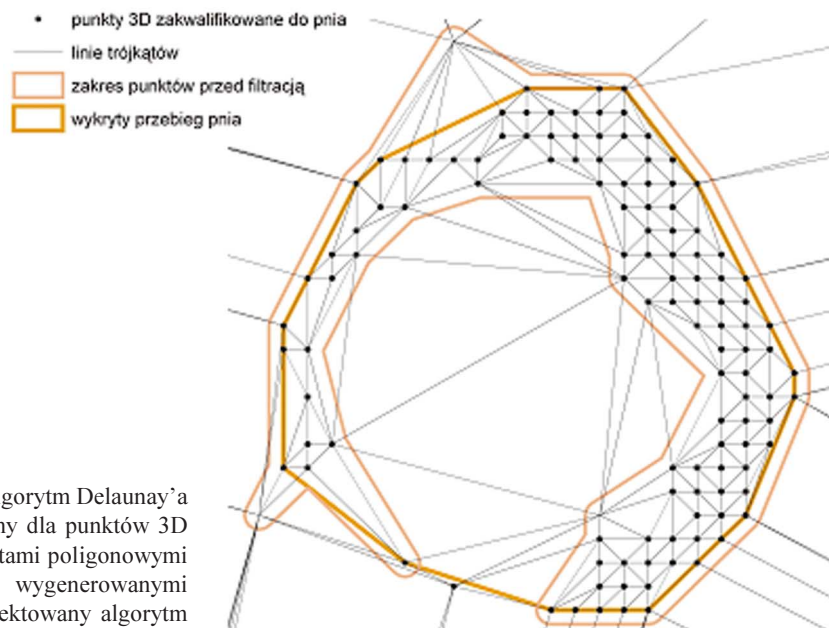
dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl



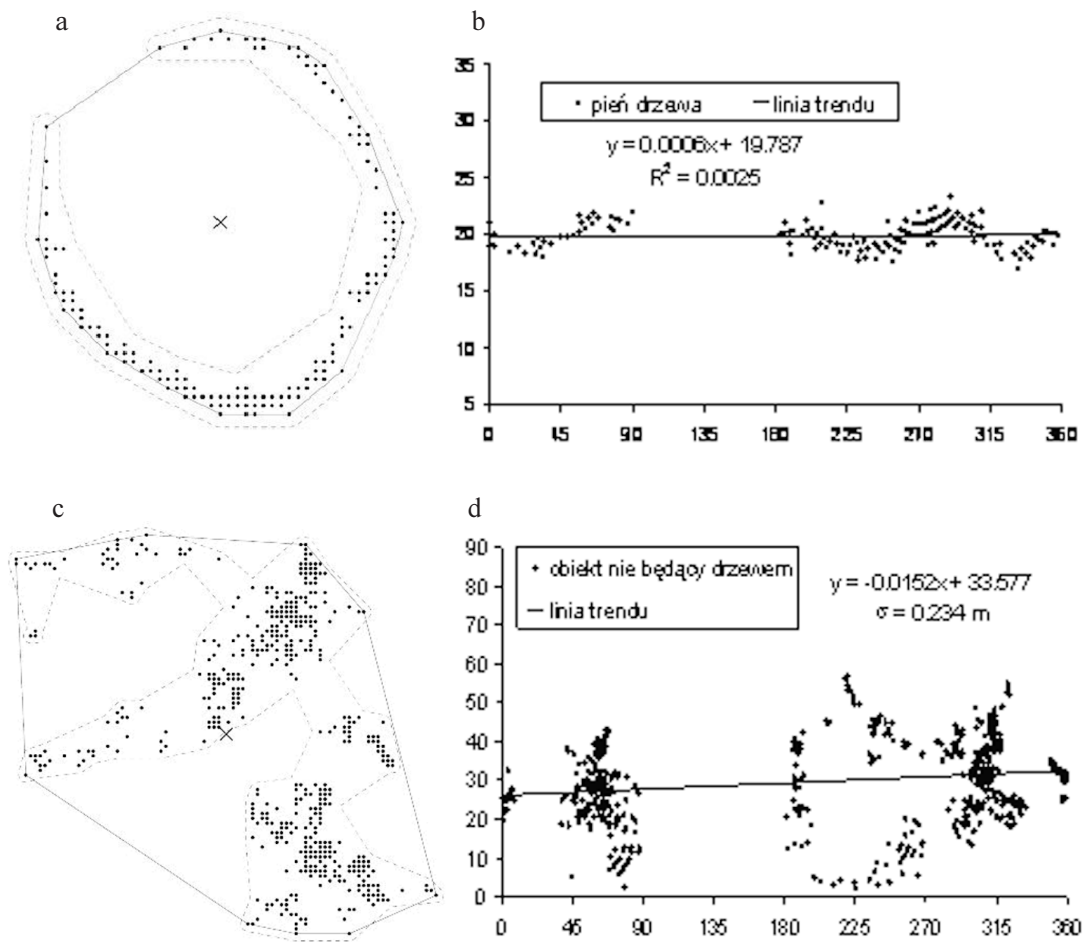
Rys. 1. Przykładowe rozmieszczenie 4 pozycji skanera, kul referencyjnych wraz z lokalizacją drzew (na podstawie danych urządzeniowych i TLS)



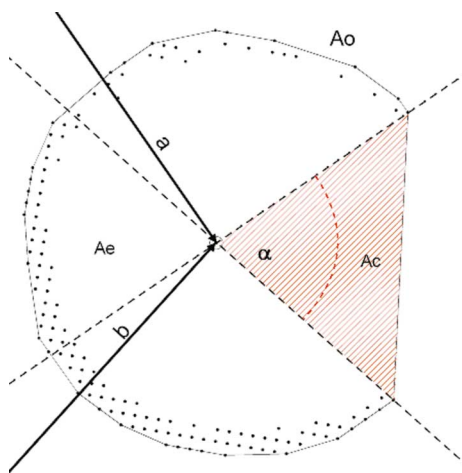
Rys. 2. Sklasyfikowana chmura punktów (Terra SCAN)



Rys. 3. Algorytm Delaunay'a zastosowany dla punktów 3D z zaznaczonymi obiektami poligonowymi wygenerowanymi przez zaprojektowany algorytm



Rys. 4. Podstawy teoretyczne rozpoznawania pni: a – pień zeskanowany fragmentarycznie, b – wykres zależności azymutu i promienia dla niepełnego pnia – obwód przerwany w zakresie 90–175° azymutu, c – inny obiekt nie będący pniem (krzewy), d – wykres obrazujący zależność azymutu i promienia dla obiektu nie będącego pniem drzewa



Rys. 5. Pień bez pełnego pokrycia punktami z TLS:
 Ao – powierzchnia wygenerowanego obiektu;
 Ae – część pnia o zbliżonej do poprawnej powierzchni pnia;
 a, b – linie między pozycjami 2 i 4 skanera i środkiem ciężkości obiektu Ao;
 α – kąt środkowy dla poszukiwanego wycinka obiektu Ac