

LOTNICZY SKANING LASEROWY JAKO ŹRÓDŁO DANYCH DLA SYSTEMU INFORMACJI PRZESTRZENNEJ NADLEŚNICTWA

AIRBORNE LASER SCANNING AS A SOURCE OF DATA FOR GIS IN FOREST DISTRICTS

**Marcin Chirrek¹, Agata Wencel¹, Paweł Strzeński¹, Krzysztof Stereńczak²,
Michał Zasada², Tomasz Zawila-Niedźwiecki³**

¹ Zakład Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu, Katedra Urządzania Lasu, Wydział Leśny,
Akademia Rolnicza w Poznaniu,

² Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Lesnictwa, Wydział Leśny, SGGW

³ Wydział Leśny, Uniwersytet Nauk Stosowanych w Eberswalde (Niemcy)

Słowa kluczowe: lotniczy skanining laserowy, system informacji przestrzennej, leśnictwo
Keywords: airborne laser scanner, GIS, forestry

Wstęp

Podstawowym źródłem danych w systemach informacji przestrzennej (SIP) nadleśnictw są bazy Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP). Istniejące bazy wymagają stałej aktualizacji i weryfikacji. Zależnie od wymaganej dokładności źródłami danych dla SIP są dane opisowe powstające w trakcie prac urzędzeniowych, pomiary geodezyjne lub pomiary wykorzystujące technologię pozycjonowania satelitarnego (GPS). Dane z operatu urzędzeniowego nie są jedynym źródłem zasilającym bazy opisowe. Oprócz nich wykorzystuje się informacje z operatów siedliskowych, programów ochrony przyrody, planów zagospodarowania przestrzennego gmin oraz z innych dostępnych dla danego terenu opracowań (Olenderek i in., 2000). Obecnie, zgodnie z obowiązującymi przepisami, zdecydowana większość z tych informacji jest pozyskiwana w sposób tradycyjny, bazujący na pomiarach i obserwacjach bezpośrednich. Pomimo, że coraz częściej w badaniach przyrodniczych wykorzystuje się także dane teledetekcyjne (głównie w zakresie ortofotomapy oraz typowych analiz związanych z oceną wybranych parametrów opisujących drzewostany), to jednak sytuacja ta dotyczy głównie parków narodowych (Zawila-Niedźwiecki, Strzeński, 2006).

W grupie metod teledetekcyjnych, bazujących na technologii lidarowej, dużą popularność w ostatnim dziesięcioleciu zyskał lotniczy skaner laserowy (ang. ALS – *Airborne Laser Scanner*). Duże korzyści wynikające z zastosowania tej techniki skłaniają do podjęcia próby jej wykorzystywania przy zasilaniu baz danych SIP w Lasach Państwowych. Główny atut

skaningu lotniczego w tym przypadku to możliwość uzyskania dokładnych informacji dotyczących obiektów leśnych na dużych obszarach. Wartość tych informacji podnosi fakt, że skaningu lotniczy obecnie jest już standardowo wykonywany jednocześnie z wysokorozdzielczymi zdjęciami cyfrowymi. Wykorzystanie skaningu laserowego umożliwi pozyskiwanie dokładnych danych o wysokości drzew i budowie pionowej drzewostanów oraz o ukształtowaniu terenu (Zajączkowski, Wężyk, 2004). W ostatniej dekadzie technologia lotniczego skaningu laserowego uzyskała pełną akceptację użytkowników jako szybka i precyzyjna metoda trójwymiarowego obrazowania powierzchni Ziemi, wykorzystywana do generowania numerycznego modelu terenu (ang. DTM – *Digital Terrain Model*) bądź też numerycznego modelu powierzchni terenu (ang. DSM – *Digital Surface Model*) (np. Wack, Wimmer, 2002; Będkowski, Mikrut, 2006; Schardt i in., 2004; Watt i in., 2004; Hyypä i in., 2006). W przeciwieństwie do tradycyjnej fotogrametrii, ALS realizowany może być nawet w sytuacji występowania chmur wysokich (przy założeniu, iż rejestracja dokonywana jest z niższego pułapu).

Technologia i sprzęt

Skaning laserowy – LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) – należy do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, wykorzystujących do obrazowania promieniowanie najczęściej z zakresu bliskiej podczerwieni (ang. *NIR – Near InfraRed*). Technologia ta sprawia, że LIDAR jest niezależny od warunków oświetleniowych, dzięki czemu obrazowania można dokonywać nawet w nocy (Nelson, i in., 1988; Dubayah, Drake, 2000; Drake i in., 2002; Wężyk, 2006). Urządzenie skanujące z powietrza może być podłączone na platformie helikoptera lub samolotu. Skaner wysyła przez układ optyczny, w dokładnie odmierzonych odstępach czasu, wiązki światła w zakresie bliskiej podczerwieni NIR lub światła zielonego G (ang. *Green*), o określonej długości fali i konkretnym kierunku. Wiązka światła w trakcie swej drogi napotyka przeszkody, przez co generowane są szumy, rejestrowane przez odbiornik. Każde odbicie oznaczane jest jako punkt w przestrzeni. Pierwsze urządzenia miały możliwość rejestrowania tylko jednego echa, obecnie możliwe jest już zarejestrowanie wszystkich składowych odbić jednej wiązki (skanery typu *full waveform*). Dane uzyskane w wyniku nalotu lidarowego mają charakter przestrzenny i mogą być zapisywane w przyjętym układzie współrzędnych (np. WGS 84).

Oprogramowanie służące do obsługi skanera umożliwia dobór parametrów skanowania, tj. częstotliwości generowania impulsu lasera oraz kąta nachylenia wiązki lasera. Odległość obiektów od skanera decyduje także o rzeczywistej wielkości plamki (ang. *footprint*). Poza rejestracją odbitego sygnału (echa) tzw. pierwszego (ang. *FE – first echo*) lub ostatniego (ang. *LE – last echo*) nowoczesne skanery rejestrują także wartość intensywności (ang. *intensity*) odbitego sygnału.

Konwencjonalne rozwiązania technologii polegają na użyciu lasera generującego bardzo silne impulsy światła w niezmiernie krótkim czasie (wysoka częstotliwość rzędu np. 80 000 impulsów w czasie 1 sekundy). Długość generowanego przez nadajnik impulsu determinuje rozdzielczość i dokładność pomiaru odległości (Thiel, Wehr, 2004). Rozdzielczość w przypadku „pulsacyjnych” systemów należy rozumieć jako rozróżnianie pierwszego i ostatniego odbicia (echa) od obiektu, tzn. minimalnej odległości pomiędzy pierwszym i ostatnim celem. Wartość ta waha się w zależności od rozwiązań technologicznych różnych systemów i wy-

nosić może np. 1,0 m jak w rozwiązaniach skanera lotniczego Falcon (Schnadt, Katzenbeißer, 2004) czy też poniżej 0,6 m w przypadku skanera Riegl LMS-Q560 (Rieger i in., 2006). Utrata siły sygnału docierającego do detektora determinuje maksymalną odległość rejestrowanych celów. W dużej mierze siła sygnału rejestrowanego zależy od właściwości powierzchni samego obiektu, tj. powierzchni (rodzaju materiału, kształtu, struktury) i kąta nachylenia w stosunku do padającej plamki lasera (Thiel, Wehr, 2004).

Dane lidarowe

LIDAR, poza dostarczaniem informacji o strukturze drzewostanów, wykorzystywany jest także do tworzenia numerycznego modelu terenu (Wack, Wimmer, 2002). Generuje się go na drodze filtracji danych, zadaniem której jest wybór tych punktów z chmury pomiarowej, które zaklasyfikowane zostały jako ostatnie echo. Punkty interpretowane jako pierwsze echo pochodzą z odbić od części wierzchołkowych, tworząc tzw. numeryczny model powierzchni terenu. W celu jednoznacznej interpretacji, do kalibracji i usunięcia błędów systematycznych stosuje się płaskie powierzchnie pozbawione roślinności, na których pierwsze echo musi być równe ostatniemu (Hyypä i in., 2006). NMT jest niezbędny do obliczenia tzw. nDSM (ang. *normalized Digital Surface Model*) jako różnicy pomiędzy DSM a DTM, tj. modelu reprezentującego wysokości koron drzew (utożsamiany z Modelem Koron Drzew). Opierając się na nDSM oraz innych parametrach, jak np. szerokości korony określonej w procesie segmentacji obrazu (Koch i in., 2006), można dokonywać obliczeń zasobności drzewostanów.

Efektom przetwarzania danych lidarowych jest dyskretna (punktowa) reprezentacja pewnej powierzchni, może to być:

- Numeryczny Model Terenu – NMT (ang. DTM – *Digital Terrain Model*, DEM – *Digital Elevation Model* lub DGM – *Ground Elevation Model*),
- Numeryczny Model Powierzchni Terenu - NMPT (ang. DSM – *Digital Surface Model*) lub szczegółowo w odniesieniu do drzewostanu – Numeryczny Model Warstwy Koron (NMWK) (Będkowski 2005).
- znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu lub Numeryczny Model Różnicowy (ang. nDSM – *normalized Digital Surface Model*), który w odniesieniu do powierzchni leśnej powstaje przez „odjęcie” NMT od NMPT, a więc otrzymujemy Wysokościowy Model Koron (ang. CHM – *Canopy Height Model*), znormalizowany Model Koron (ang. nCM – *normalized Canopy Model*) lub Numeryczny Model Koron – NMK (ang. DCM – *Digital Canopy Model*) oraz Model Powierzchni Koron – MPK (ang. CSM – *Crown Surface Model*).

Analiza danych

Przy analizie danych dotyczących terenów leśnych należy brać pod uwagę zjawisko częściowego odbijania się impulsów laserowych od fragmentów drzew, niżej położonych krzewów oraz roślin runa. Powierzchnia, interpolowana na podstawie pierwszych powracających impulsów (ang. *first pulse*), przebiega miejscami po koronach drzew, na pewnej

wysokości nad terenem (roślinność zielna, niskie krzewy) lub na poziomie terenu. Uzyskiwane wyniki zależą od gęstości pokrywy roślinnej. Możliwość zarejestrowania kształtu pojedynczych drzew i krzewów zależy od gęstości punktów pomiarowych. Podstawowym problemem związanym ze skanowaniem obszarów pokrytych roślinnością jest opracowanie sposobu odróżniania impulsów odbitych od roślin, od impulsów odbijanych przez powierzchnię terenu. Zagadnienie to ma znaczenie praktyczne; pierwotnie związane było z zadaniem budowy NMT obszarów pokrytych roślinnością. Opracowywane algorytmy filtracji mają na celu uzyskanie danych dotyczących wyłącznie punktów lub powierzchni związanych z terenem, a pozostałe punkty są traktowane jako zakłócenia. Wskazuje się na konieczność dostosowywania filtrów do rodzaju pokrywy roślinnej (Wagner i in., 2004).

W przypadku badań leśnych informacje o „zakłóceniach” stają się istotne, ponieważ informują o pionowej strukturze drzewostanów. W takim przypadku filtracja może być realizowana za pomocą różnych algorytmów, o różnym stopniu złożoności. Stosowane metody omówił obszernie m.in. Pfeifer (2003). Zwrócił szczególną uwagę na trzy algorytmy: progresywnego zagęszczania modelu TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*), filtracji morfologicznej oraz szybkiej interpolacji. Rozwój w tym zakresie badawczym jest duży – algorytmy szybkiej filtracji hierarchicznej są implementowane w komercyjnym oprogramowaniu, jak np. w pakiecie SCOP++ – produkcie firmy Inpho GmbH (Niemcy) oraz Politechniki Wiedeńskiej (Wagner i in., 2004).

ALS w leśnictwie

Podstawowym zadaniem lotniczego skaningu laserowego w leśnictwie jest dostarczanie informacji o zróżnicowaniu struktury poziomej i pionowej na dużych obszarach leśnych (Hyypä i in., 2006; Lim i in., 2002). Dwa podstawowe podejścia dotyczące opisu drzewostanu z wykorzystaniem skaningu laserowego to: przestrzenny rozkład cechy wysokości górnej powierzchni drzewostanu oraz detekcja pojedynczych koron drzew (rozpoznanie, segmentacja obrazu, określenie obrysu koron). Prace licznych autorów, szczególnie z Kanady, USA, krajów skandynawskich i Niemiec, od wielu lat jednoznacznie wskazują na możliwości praktycznego wykorzystania technologii LIDAR do określania wybranych cech taksonomicznych i charakterystyk drzewostanów takich jak: średnia wysokość drzewostanu (Hyypä i in., 2006; Persson i in., 2002), miąższość związana z cechą wysokości drzewa (Nasset, 1997; Nilsson, 1996; Hyypä i in., 2006), gatunek drzewa (Holmgren, Persson, 2004; Reitberger i in., 2006), pierśnicowe pole przekroju (Lefsky i in., 2001; Means i in., 1999), stopień defoliacji (Solberg i in., 2004), liczba drzew (Popescu i in., 2003), powierzchnia poszczególnych koron drzew (Koch i in., 2006), czy biomasa drzewostanów (Hyypä i in., 2006; Lefsky i in., 2001; Popescu i in., 2003).

Leśnicy zainteresowani są sposobami określania wielkości charakteryzujących drzewostany, które są istotne z punktu widzenia opisu ich rozwoju oraz wielkości zapasu. Jednym z pierwszych dużych przedsięwzięć badawczych, testujących przydatność lotniczego skaningu laserowego w pomiarach drzewostanów, był międzynarodowy projekt HIGH-SCAN (skaner TopoSys-1, gęstość skanowania ok. 4 punktów na 1 m², przy wysokości lotu 800 m), w ramach którego przeprowadzono badania przydatności skaningu laserowego do pozyskiwania informacji na poziomie szczegółowości odpowiadającym pojedynczym drzewom (Zie-

gler i in., 2000; Hyypä i in., 2001). Założono, że dane ze skaningu oraz dodatkowo z wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych, powinny umożliwić określenie następujących wielkości: zapas (m^3/ha), skład gatunkowy, średnia wysokość drzew, zwarcie drzewostanu, pierśnicowe pole przekroju, struktura klas wieku, typ gleby, powierzchnia koron drzew, granice drzewostanów.

Hyypä i Hyypä (1999) porównywali wyniki inwentaryzacji drzewostanów uzyskane za pomocą skanowania laserowego z danymi pochodzącymi z zastosowania innych technik teledetekcyjnych (obrazy Landsat, SPOT Pan oraz XS, spektrometr lotniczy AISA) i inwentaryzacji naziemnej. Do analizy wykorzystano 41 drzewostanów o przeciętnej powierzchni 1,21 ha. Uwagę skoncentrowano na określaniu zapasu drzewostanów oraz przeciętnej wysokości. Przy wykorzystaniu danych skaningu laserowego błąd standardowy średniej wysokości drzewostanu wyniósł 12,9%, natomiast miąższości – 13,51%. Za pomocą innych technik uzyskano gorsze rezultaty. Największe błędy stwierdzono w przypadku korzystania ze zdjęć SPOT Pan (błąd standardowy wyniósł odpowiednio 33,70% oraz 49,64%). Wykazano, że jedynie skanowanie mogło dostarczyć danych na poziomie dokładności odpowiadającym inwentaryzacji naziemnej.

Trójwymiarowy model drzewostanu sosnowo-świerkowo-brzozowego, rosnącego na powierzchni 120×120 m, zbudował Pyysalo (1999). Analizował on impulsy odbite od warstwy koron oraz od terenu i opracował trzy warstwy przestrzenne: numeryczny model terenu oraz dwa obszary „zamykające” od dołu i od góry warstwę koron. Następnie przeprowadził on segmentację najwyższej warstwy w celu określenia zasięgu poszczególnych koron, wykorzystując do tego celu znany w systemach informacji przestrzennej algorytm służący do analizy zlewni (ang. *watershed algorithm*). Na podstawie danych dotyczących indywidualnych drzew określone zostały: wysokość pojedynczych drzew, wysokość warstwy koron, objętość przestrzeni koron oraz powierzchnię pionowych rzutów koron (na różnych poziomach wysokości). Dokładność uzyskanych wyników, które porównane zostały z danymi terenowymi, była stosunkowo wysoka. Błąd średni wysokości drzewa wyniósł 1,50 m, natomiast błąd średni wysokości dolnej granicy warstwy koron – 2,50 m. W uzyskanym modelu występowały nieliczne błędy, wynikające np. ze wzajemnego przesłaniania się koron, niewłaściwej segmentacji koron przez zastosowany algorytm. Także, z uwagi na zastosowany algorytm, nie było możliwości wyróżnienia drzew rosnących pod innymi drzewami. W danym oczku siatki modelu mogły występować tylko trzy rzędne: terenu oraz dolnej i górnej krawędzi warstwy koron. Autor uważa, że zastosowana metoda powinna dawać dużo lepsze rezultaty w obszarach o mniejszym zwarcie.

Holmgren i Jonsson (2004) wykorzystali różnorodne wielkości opisujące warstwę koron, wyprowadzone na podstawie danych skanowania laserowego, do opracowania równań regresji, w których zmiennymi zależnymi były średnia wysokość drzewostanu, średnia pierśnica, pierśnicowe pole przekroju, miąższość grubizny – oddzielnie dla sosny, świerka i drzew liściastych.

Heurich i in. (2004) testowali przydatność algorytmu określającego pozycję, wysokość oraz średnicę koron indywidualnych drzew. Badania prowadzono w drzewostanach regla górnego (świerk, częściowo jarzab), lasów mieszanych (świerk, jodła, buk, klon) oraz w strefie innych wybranych drzewostanów świerkowych (świerk z domieszką jarzębiny i brzozy). Algorytm rozpoznał w poszczególnych strefach odpowiednio 67,90%, 5,90% i 2,50% drzew (44,20% dla trzech stref razem). Miąższość drzewostanów określono na poziomie 85,20% miąższości zarejestrowanej metodami naziemnymi.

Odpowiednie przetworzenie danych liadarowych, zwłaszcza w połączeniu ze zdjęciami lotniczymi, umożliwia opis i pomiar wielu elementów taksacyjnych, zarówno w odniesieniu do dużych powierzchni, jak i pojedynczych drzew; np.:

- gatunku drzewa (Holmgren, Persson, 2004; Reitberger i in., 2006),
- liczby drzew (Popescu i in., 2003),
- lokalizacji, zwarcia i zagęszczenia drzew (Koch i in., 2006),
- średniej wysokości drzew (Hyypä i in., 2001; Persson i in., 2002),
- powierzchni i kształtu poszczególnych koron drzew (Koch i in., 2006),
- pola przekroju pierścicowego drzewa (Means i in., 1999; Lefsky i in., 2001),
- miąższości określanej na podstawie wysokości drzewa (Hyypä i in., 2006) oraz określanej na podstawie wysokości drzewa i szerokości jego korony (Wężyk, 2006),
- stopnia defoliacji (Solberg i in., 2004).

Realizowane projekty

W kwietniu 2006 roku Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych zleciła zespołowi koordynowanemu przez Wydział Leśny Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego wykonanie pracy naukowo-badawczej pt. *Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi*. Jej celem jest wyselekcjonowanie sposobów zdalnej rejestracji obrazu lasu użytecznych w leśnictwie oraz opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na wybranych technikach geomatycznych, takich jak: lidar (naziemny i lotniczy), zdjęcia hemisferyczne, zdjęcia cyfrowe naziemne i lotnicze, system kartowania mobilnego, wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne (Zawila,-Niedźwiecki i in., 2006).

Zlecenie DGLP realizowane jest na poligonie badawczym zlokalizowanym w Nadleśnictwie Milicz z wykorzystaniem dodatkowych wyników innych badań prowadzonych w Nadleśnictwie Chojna (realizowane przez IBL, finansowane przez Lasy Państwowe), Nadleśnictwie Rogów (realizowane przez SGGW, finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego), Nadleśnictwie Świeradów i Szklarska Poręba (inicjatywa nadleśnictw, finansowana przez fundusz Inicjatywy Wspólnotowej – Interreg). Na terenie Nadleśnictwa Milicz wykorzystywane są dane z 284 istniejących powierzchni próbnych, w odniesieniu do których dokonywane będą analizy zobrażeń lotniczych (lidar i zdjęcia wielospektralne).

Nadleśnictwo Świeradów i Szklarska Poręba złożyły zamówienie na pozyskanie danych przestrzennych i sporządzenie na ich podstawie: numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT), numerycznego modelu terenu (NMT), ortofotomapy, wizualizacji modelu pokrycia terenu, interaktywnej mapy oraz pomiarów elementów pasa drogowego wraz z inwentaryzacją fotograficzną. Źródłem danych mają być cyfrowe zdjęcia lotnicze, lotniczy skaning laserowy oraz technologia mobilnego kartowania. Warunki jakim powinien odpowiadać lotniczy skaning laserowy według zamówienia to:

- rozdzielczość minimalna: 4pkt/m²,
- skaning wykonany przy bezwietrznej pogodzie,
- oczekiwana minimalna dokładność pomiarów $x, y = 40$ cm, $z = 15$ cm,
- pokrycie poprzeczne między szeregami min. 25% ±5%.

Powyższe projekty stanowią odpowiedź na zapotrzebowanie związane z konfrontacją oczekiwań dotyczących inwentaryzacji lasu w Polsce z aktualnymi możliwościami telede-

tekcijnymi. Przeprowadzane dotąd na świecie badania zarówno dotyczące wykorzystania samego ALS, jak i jego integracji z innymi technikami teledetekcyjnymi, pozwalają oczekiwać, że i w polskich warunkach metody te mają szansę się sprawdzić i jeśli nie zastąpić, to na pewno z powodzeniem uzupełnić tradycyjne metody opisywania środowiska leśnego.

Podsumowanie

Znaczenie wykorzystania laserowego skaningu lotniczego w leśnictwie dotyczy dwóch podstawowych aspektów funkcjonowania nadleśnictwa. Pierwszy aspekt to zdalne i szybkie pozyskiwanie danych umożliwiających automatyczną aktualizację danych w SILP na poziomie zasobów leśnych (np. parametry taksacyjne drzewostanów). Aktualizację taką ułatwia dodatkowo łączenie technologii ALS jest z jednoczesnym odfotografowaniem terenu za pomocą wysokorozdzielczych kamer cyfrowych (nadleśnictwo otrzymuje precyzyjną ortofotomapę).

Drugim aspektem jest wygenerowanie z danych lidarowych numerycznego modelu terenu. Korzyści płynące z faktu posiadania numerycznego modelu terenu są trudne do przecenienia (począwszy od szerokiej możliwości analitycznych, przez planowanie i projektowanie do zaawansowanych prognoz włącznie). O ile większość analiz dotyczących wzajemnych relacji pomiędzy badanymi cechami można na istniejących bazach danych przeprowadzić bez numerycznego modelu terenu, o tyle niektóre zadania planistyczno-projektowe są trudne do wykonania. Dobrym przykładem jest projekt małej retencji, wymagający m.in. szczegółowych danych na temat kształtu rzeźby terenu, kierunków nachylenia i wielkości spadków. Zbudowanie numerycznego modelu terenu jest niezbędne także przy stosowaniu nowoczesnych metod prognozowania, zwłaszcza w odniesieniu do zagrożeń powodziowych, lawinowych czy związanych z silnymi wiatrami.

Pozostaje pytanie – kiedy dane teledetekcyjne (lidarowe oraz zdjęcia lotnicze i satelitarne) będą obligatoryjnie zasilać system informacji przestrzennej nadleśnictwa?

Literatura

- Będkowski K., 2005: Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Będkowski K., Mikrut S., 2006: Wstępna analiza przydatności wielospektralnych zdjęć lotniczych do fotogrametrycznej inwentaryzacji struktur przestrzennych w drzewostanach. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 14, Białobrzegi 2004. <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit/wydawnictwa/bialobrzegi/Bialobrzegi2004/60-bedkowski.doc>
- Drake J.B., Dubayah R.O., Clark D.B., Knox R.G., Blair J.B., Hofton M.A., Chazdon R.L., Weishampel J.F., Prince S.D., 2002: Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment* 79, pp. 305-319.
- Dubayah R., Drake J.B., 2000: Lidar remote sensing for forestry applications. *Journal of Forestry* 98, pp. 44-46.
- Heurich M., Persson A., Holmgren J., Kennel E., 2004: Detecting and Measuring Individual Trees with Laser Scanning in Mixed Mountain Forest of Central Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forests Conditions. Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment", Freiburg, Niemcy. Int. Archives of Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVI, part 8/W2, pp. 307-312.

- Holmgren J., Jonsson T., 2004: Large Scale Airborne Laser Scanning of Forest Resources in Sweden. Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment", Freiburg, Niemcy. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, pp. 157-160.
- Holmgren J., Persson A., 2004: Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90, pp. 415-423.
- Hyypä H., Hyypä J., 1999: Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16 (2), pp. 5-15.
- Hyypä J., Schardt M., Haggrén H., Koch B., Lohr U., Scherrer H.U., Paananen R., Luukkonen H., Ziegler M., Hyypä H., Pyysalo U., Friedländer H., Uuttera J., Wagner S., Inkinen M., Wimmer A., Kukko A., Ahokas E., Karjalainen M., 2001: HIGH-SCAN: The first european-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 17 (2), pp. 58-68.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M., 2006: Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11, pp. 63-78.
- Koch B., Diederhagen O., Straub Ch., Weinacker H., 2006: Standwise delineation based on 3-D information from LIDAR. Proceedings 3-D Remote Sensing in Forestry, . [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.): 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11, pp. 1-14.
- Lefsky M., Cohen W., Harding D., Parker G., Acker S., Gower S., 2001: Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. *Int. Arch. of Rem. Sens.* XXXIV-3/W4, Annapolis, pp. 6.
- Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B., Flood M., 2002: Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27 (1), pp. 88-106.
- Means J., Acker S., Harding D., Blair B., Lefsky M., Cohen W., Harmon M., McKee W., 1999: Use of large-footprint scanning airborne LIDAR to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of the Environment*. 67, pp. 298-308.
- Naesset E., 1997: Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61, pp. 246-253.
- Nelson, R., Krabill, W., Tonelli, J., 1988: Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 24, pp. 247-267.
- Nilsson M., 1996: Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56, pp. 1-7.
- Olenderek H., Kamińska G., Korpetta D., Olenderek T., 2000: Geomatyka w systemie informacyjnym leśnictwa. [W:] Stan i perspektywy badań z zakresu urządzania lasu i ekonomiki leśnictwa. Materiały IV Konferencji Leśnej, Sękocin Las, 13-14 czerwca 2000 r., IBL, Warszawa, s. 157-164.
- Persson A., Holmgren J., Sodermann U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68 (9), pp. 925-932.
- Pfeifer N., 2003: Oberflächenmodelle aus Laserdaten. *Vermessung & Geoinformation* 91 (4).
- 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), pp. 564-577.
- Pyysalo U., 1999: A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 17 (1), pp. 34-42.
- Reitberger J., Krzystek P., Heurich M., 2006: Full-waveform analysis of small footprint airborne laser scanning data in the Bavarian Forest National Park for tree species classification. [In:] Koukal T., Schneider W., (eds.) 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11, pp. 218-227.
- Rieger P., Ullrich A., Reichert R., 2006: Laser scanners with echo digitization for full waveform analysis. . [In:] Koukal T., Schneider W. (eds.) 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11, pp. 204-210.

- Schardt M., Hruby W., Hirschmugl M., Wack R., Franke M., 2004: Comparison of aerial photographs and laser scanning data as methods for obtaining 3D forest stands parameters. [In:] Thies M., Koch B, Spiecker H., Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Niemcy, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2.
- Schnadt K., Katzenbeißer R., 2004: Unique airborne fiber scanner technique for application-oriented LIDAR products. [In:] Thies M., Koch B, Spiecker H., Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Niemcy, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2, pp. 19-23.
- Solberg S., Nésset E., Lange H., Bollandsas O.M., 2004: Remote sensing of forest health. In: Thies M., Koch B, Spiecker H., Weinacker H. (eds.) Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Niemcy, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2, pp. 161-166.
- Thiel K.-H., Wehr A., 2004: Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. [In:] Thies, M., Koch, B, Spiecker, H. and Weinacker, H.(eds.). Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Niemcy, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXVI, Part 8/W2, pp. 14-18.
- Wack R., Wimmer A., 2002: Digital Terrain Models from Airborne Laserscanner Data – a Grid based approach Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium Graz: 293-296.
- Wagner W., Eberhöfer C., Hollaus M., Summer G., 2004: Robust Filtering of Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Analysis. Proc. of the ISPRS working group VII/2 “Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”, Freiburg, Niemcy. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, pp. 56-61.
- Watt P.J., Donoghue D.N.M., McManus K.B., Dunford R.W., 2004: Predicting forest height from IKONOS, LANDSAT and LiDAR data. Proc. of the ISPRS working group VII/2 “Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”, Freiburg, Niemcy. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2.
- Wężyk P., 2006: Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, Tom IV, Zeszyt 4, s. 119-132, PTIP Warszawa.
- Zajączkowski G., Wężyk P., 2004: Techniki teledetekcyjne w inwentaryzacji urządzeniowej lasu. *Roczniki Geomatyki*, Tom II, Zeszyt 4, s. 41-50 PTIP, Warszawa.
- Ziegler M., Schardt M., Konrad H., 2000: Einsatzmöglichkeiten von Laserscannerdaten für die Forstinventur – Laser scanning for forest inventory. [In:] Žihlavnik Š., Scheer L. (ed.) *Application of Remote Sensing in Forestry*, Zvolen.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Miścicki S., Zasada M. Wencel A., 2006: Nowe kierunki pomiaru lasu z wykorzystaniem narzędzi teledetekcyjnych (New directions in forest inventory with the use of remote sensing). *Roczniki Geomatyki*, Tom IV, Zeszyt 4, s. 155-168, PTIP Warszawa.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Strzeliński P., 2006: Systemy informacji przestrzennej w ochronie przyrody. [W:] Gwiazdowicz D.J. (red.). *Ochrona przyrody w lasach a gospodarka leśna*. Poznań, Wyd. Ornatus, s. 145-165.

Summary

In the last decade, among various remote sensing inventory methods based on the LIDAR technology, airborne laser scanning (ALS) gained much popularity. The advantages of this method (integration with high-resolution digital imagery and a possibility of performing an accurate inventory of various forest objects over large area) make it a valuable source of data for GIS systems in Polish State Forests.

The quality and usefulness of these data is currently validated within the framework of a few research projects in forest districts (Milicz, Rogów, Chojna, Świeradów and Szklarska Poręba), and financed

by the State Forests, the Ministry of Science and Higher Education, and the European InterReg program. The goal of these studies is to elaborate a forest inventory method suitable for preparation of forest management plans. The method should be applicable not only for the assessment of current state of the forest, but also for predicting development of forest resources in the future.

mgr inż. Marcin Chirrek
doktorant w Zakładzie Urządzania Lasu,
AR w Poznaniu
chirrek@au.poznan.pl

dr inż. Paweł Strzeliński
strzelin@au.poznan.pl

mgr inż. Agata Wencel
doktorantka w Zakładzie Urządzania Lasu,
AR w Poznaniu
agata.wencel@au.poznan.pl

<http://www.au.poznan.pl/kul/>
tel. (0-61) 8487667

mgr inż. Krzysztof Stereńczak
doktorant w Katedrze Urządzania Lasu, Geomatyki
i Ekonomiki Leśnictwa SGGW
Krzysztof.Sterenczak@wl.sggw.pl
tel. (0-22) 593-82-17

dr inż. Michał Zasada
Michal.Zasada@wl.sggw.pl
<http://wl.sggw.waw.pl>
tel. (0-22) 593-80-89

prof. dr hab. inż. Tomasz Zawila-Niedźwiecki
tzawila@fh-eberswalde.de
<http://www.fh-eberswalde.de/zawila>
tel. +49 3334 65478