

**ZASTOSOWANIE LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO
W OKREŚLANIU ZWARCIA KORON DRZEW
NA PLANTACH KRAKOWSKICH***

**DESCRIBING CANOPY CLOSURE IN KRAKOW'S PLANTY PARK
USING AIRBORNE LASER SCANNING**

Piotr Wężyk, Elżbieta Wawrzeczko

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: lotniczy skaningu laserowy (ALS), zieleń miejska, zwarcie koron drzew

STRESZCZENIE: Zieleń w aglomeracjach miejskich odgrywa bardzo ważną rolę spełniając wiele funkcji mikroklimatycznych (produkcja tlenu, ocienienie) estetycznych czy ochronnych (np. przed hałasem, emisjami gazowymi i pyłowymi). Struktura pionowa i pozioma roślinności krzewiastej i drzewiastej, definiowanej jako podstawowy element zieleni miejskiej, decyduje o jej funkcjach. Waloryzacja przestrzeni miejskiej pod kątem zieleni polega na pozyskiwaniu wybranych parametrów dla dużych obszarów miejskich przy użyciu technologii teledetekcyjnych, przykładem których jest lotniczy skaningu laserowy (ALS). Praca stanowi próbę automatycznego określenia parametru zwarcia klasy „drzew wysokich” (powyżej 15 m wysokości) oraz zwarcia całej klasy „warstwa roślinności” (powyżej 5 m wysokości), na podstawie analiz chmury punktów ALS oraz ortofotografii lotniczych. Obszar testowy (3.47 ha) obejmował fragment parku miejskiego „Planty” w Krakowie. Dane ALS pozyskano w 2004 roku z pułapu śmigłowca, używając skanera TopEye oraz kamery cyfrowej średniego formatu. Analizy zwarcia „drzew wysokich” prowadzono bezpośrednio na chmurze punktów ALS (w oprogramowaniu Terrasolid Ltd). W celu określenia zwarcia klasy „warstwa roślinności” przeprowadzono wektoryzację ekranową lotniczej ortofotomapy oraz analizowano NMPT (ang. *DSM*) w oprogramowaniu TreesVis (LAU, Freiburg). Dokładność określania zwarcia „drzew wysokich” jak i warstwy roślinności przy użyciu Terrasolid okazała się niezadowolająca. Bardzo wysoką dokładność zwarcia „warstwy roślinności” uzyskano natomiast stosując wektoryzację ekranową ortofotomapy (błędy na poziomie 0-3% w stosunku do danych referencyjnych jakimi były pomiary terenowe). Zadowolające wyniki uzyskano metodami automatycznymi bazującymi na NMPT (ALS) w wariantach rozdzielczości: 1.0 m, 0.5 m lub 0.25 m (z filtrem Gaussa 3x3 piksele) oraz 1.0 m (z filtrem Gaussa 5x5 pikseli). Praca dowiodła wysokiej przydatności technologii ALS oraz cyfrowej fotogrametrii w aspekcie oceny zwarcia klasy „warstwa roślinności” oraz procesu automatyzacji przy zachowaniu jego obiektywizmu.

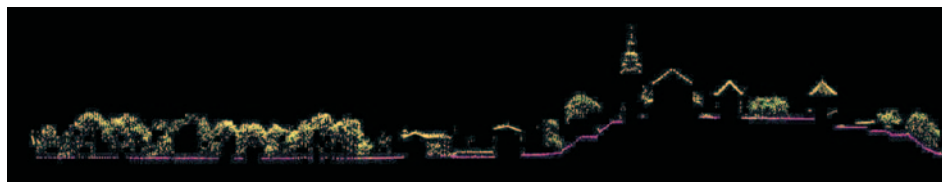
1. WPROWADZENIE

Zwarcie koron drzew zieleni miejskiej nie należy zwykle do parametrów określanych podczas tradycyjnej inwentaryzacji, choć można o nim wnioskować na podstawie innych pozyskiwanych cech, takich jak lokalizacja oraz zasięg korony. Zwarcie koron drzew czy krzewów decyduje o spełnianiu przez zieleni miejską m.in. funkcji klimatycznych bądź ochronnych, np. przed spalinami ze samochodów czy hałasem (Miller, 1997; Mc Person *et al.*, 1994; Czerwieńiec, Lewińska, 1996). Prace terenowe są bardzo czasochłonne, stąd należałoby rozważyć określanie tego typu parametrów w sposób automatyczny, szczególnie dla większych obszarów aglomeracji miejskich. Obiecujące wyniki badań dotyczących zastosowania technik teledetekcyjnych, w tym głównie lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning*; ALS) w leśnictwie, dają podstawę sądzić, że również parametry dotyczące zieleni miejskiej mogą być z powodzeniem określane przy ich zastosowaniu (Wężyk, 2006, 2008). Literatury dotyczącej zastosowań ALS w analizach zieleni miejskiej jest jeszcze niezbyt wiele i nie prezentuje ona badań z zakresu określania zwarcia. Istnieją natomiast badania z zakresu szacowania wysokości drzew (Imai *et al.*, 2004) jak też objętości zieleni miejskiej (Meinel *et al.*, 2006) oraz klasyfikacji terenów zielonych (Weidner, 2006). Wyniki wymienionych badań wskazują, że ALS może być przydatnym narzędziem w miejskich zastosowaniach przyrodniczych.

Celem pracy było zaprezentowanie możliwości wykorzystania technologii lotniczego skaningu laserowego (ALS) zintegrowanego z wysokorozdzielczymi zdjęciami lotniczymi w określaniu zwarcia poziomego „drzew wysokich” oraz „warstwy wegetacji”. Parametry te zostały porównane z danymi referencyjnymi pozyskanymi na drodze pomiarów terenowych oraz z wykorzystaniem cyfrowej ortofotomapy lotniczej.

2. TEREN BADAŃ

Teren badań zlokalizowano w południowej części ogrodu miejskiego zwanego popularnie „Plantami”, którego założenie sięga 1820 roku. Otaczają one zwartym pierścieniem (niegdyś fosy i mury miejskie), Stare Miasto w Krakowie. Obszar badań o powierzchni 3.47 ha, stanowił fragment pomiędzy ulicami: Franciszkańską a Podzamcze w bezpośrednim sąsiedztwie Wawelu (Rys. 1).



Rys. 1. Profil N-S przez chmurę punktów ALS. Obszar analiz od lewej po Wzgórze Wawelskie (po prawej).

3. METODYKA

3.1. Nalot fotogrametryczny i ALS

Testowe dane ALS oraz zdjęcia cyfrowe pozyskano (firma Eurosystem) w październiku 2004 roku na zlecenie Urzędu Miasta Krakowa dla niewielkiego fragmentu Starego Miasta. Użyto w tym celu skanera TopEye MkII (częstotliwość 50 kHz) zamontowanego w śmigłowcu. Średnia względna wysokość lotu wyniosła 530 m, a prędkość ok. 45 km/h. Szerokość jednego pasa (skanu) nalotu wynosiła 200 m (pokrycie podłużne 25%). Dla obszaru badań dysponowano chmurą 1 513 939 punktów (XYZ) w odwzorowaniu UTM 33N. Średnia gęstość chmury ALS przekroczyła 12 pkt/m². Dane dostarczono w formacie binarnym pakietu oprogramowania Terrasolid. Wykorzystano także cyfrowe zdjęcia lotnicze (format TIF; RGB, piksel 8 cm, 8 bit) wykonane kamerą średniego formatu (Hasselblad).

3.2. Prace terenowe

Pomiary terenowe wykonywane były od marca do października 2006. Obejmowały określenie gatunku każdego drzewa oraz pomiar jego: pierśnicy (średnica lub obwód na wysokości 130 cm od gruntu), położenia, wysokości, a także zasięgu korony wyznaczonego w 8 kierunkach. Pomiary sytuacyjne wykonywano za pomocą tachimetru poprzez określenie kąta poziomego oraz odległości do środka pnia drzewa mierzonych z danego stanowiska. W terenie zastabilizowano 11 stanowisk pomiarowych. Oprócz pomiarów biegunowych drzew, z każdego stanowiska wykonywano domiar do minimum 3 latarni, jako punktów dostosowania. Pomiary wysokości drzew wykonywano wczesną wiosną (wysokościomierz Verte; Hagloef; 25 cm dokładności).

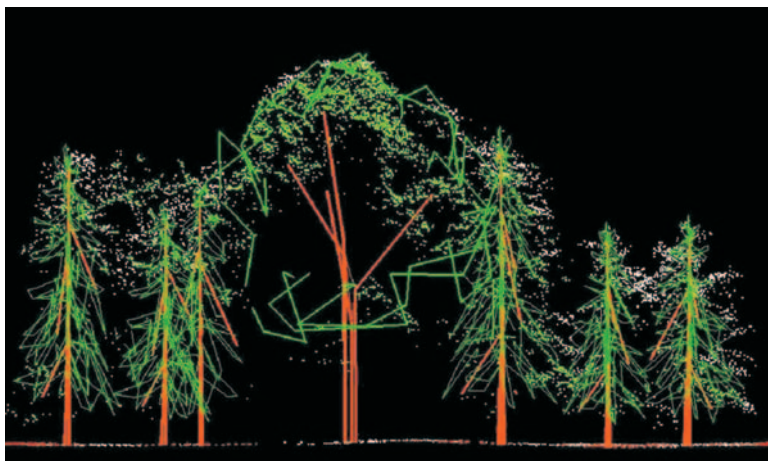
3.3. Prace kameralne

Współrzędne (XY) stanowisk pomiarowych obliczono metodą tzw. wcięcia wstecz na podstawie latarni, których lokalizacja była możliwa do pozyskania z mapy zasadniczej (UMK). Na podstawie danych terenowych wygenerowano w oparciu o przygotowany wcześniej algorytm 2 warstwy referencyjne (SHAPE ESRI), tj.: punktową przedstawiającą pozycje pni drzew oraz poligonową z rzutami ich koron. Do bazy geometrycznej na drodze relacji dołączono tabele atrybutowe z parametrami każdego drzewa (gatunek, wysokość, podstawa korony oraz obwód pnia na wysokości 1.3 m). Obszar badań podzielono na 14 mniejszych fragmentów o typowym dla siebie układzie architektonicznym, wyznaczonych przebiegiem ścieżek na Plantach.

3.4. Metodyka określania parametru zwarcie dla klasy „drzew wysokich”

W terenie badań wysokość drzew była zróżnicowana, ale nie występowała wyraźna piętrowość, jak w typowych drzewostanach. Zdecydowano się obliczać parametr zwarcia tylko dla klasy „drzew wysokich”, za które uznano drzewa osiągające powyżej 15 m

wysokości. Powierzchnię rzutów ortogonalnych koron drzew wysokich określono na podstawie pomiarów terenowych i analiz GIS. Dane ALS obejmujące teren badań wyselekcjonowano granicami (wektorem) 14 fragmentów dbając jednocześnie o to by korony drzew „wyrastających” granicę opracowania poddane zostały analizie. W celu wygenerowania NMT, chmurę punktów ALS poddano klasyfikacji algorytmem „grunt” (ang. *ground*) z wykorzystaniem aktywnego modelu TIN stosując domyślne parametry. Kolejnym krokiem była klasyfikacja wykonana algorytmem wykrywania drzew w chmurze punktów ALS - „*detect trees*” prowadzona w dwóch wariantach. Pierwszy z nich „Tscan BS” wykorzystywał wektorowe wzorce typów korony drzew: „Brzoza” oraz „Świerk” łącznie (przykład wyniku klasyfikacji na Rys. 2). Drugi „Tscan B” korzystał wyłącznie z typu „Brzoza”. Dla tego ostatniego wariantu spodziewano się osiągnąć lepsze rezultaty ze względu na charakter Plant (dominacja liściastych gatunków drzew). Parametry automatycznej detekcji drzew jakie zastosowano to: wysokość minimalna – 5 m, wysokość maksymalna – 50 m, zmienność szerokości korony 30% oraz wysokość wierzchołka: 0.4 m powyżej najwyższego punktu ALS w obrębie zwartej korony. W wyniku działania algorytmu powstały 2 pliki DGN (wariantu „Tscan BS” oraz „Tscan B”) opisujące zasięgi koron drzew (3D). Zaimportowano je do oprogramowania ArcMap ESRI i przekonwertowano do pliku SHAPE (2D), uzyskując wieloboki tworzące rzuty koron drzew wykrytych automatycznie. Posłużyły one od określenia stosunku sumy rzutów (po uprzedniej analizie „*Dissolve*” przenikających się koron) do powierzchni każdego z 14 fragmentów obszaru badań. Do analiz przestrzennych selekcjonowano drzewa o wysokości powyżej 15 m. Statystyczną ocenę dokładności obu automatycznych metod wykrywania drzew („Tscan BS” oraz „Tscan B”) przeprowadzono dla 14 fragmentów w oparciu o test parametryczny (t-Studenta) dla modelu o rozkładzie normalnym oraz nieparametryczny (Wilcoxon) dla modelu o rozkładzie różnym od normalnego.



Rys. 2. Efekt automatycznego wykrywania drzew algorytmem „Tscan BS” na profilu chmury punktów ALS.

W programie Statistica przetestowano hipotezę o braku istotnych różnic między zwarcie uzyskanym dla 14 fragmentów terenu badań na podstawie danych terenowych, oraz w oparciu o automatyczną detekcję metodami „Tscan BS” oraz „Tscan B”.

3.5. Metodyka określania zwarcia dla klasy „warstwa wegetacji”

Jako „warstwę wegetacji” rozumie się w niniejszej pracy roślinność przekraczającą 5 m wysokości. Wartość tą determinowało niemieckie oprogramowanie TreesVis uznające obiekt za drzewo od tej progowej wysokości. Parametr zwarcia dla klasy „warstwa wegetacji” obliczono na podstawie pomiarów terenowych oraz na drodze manualnej wektoryzacji ortofotomapy („ORTO”) i metod automatycznych wykorzystujących oprogramowanie TreesVis i Terrascan. Pomiaru terenowe posłużyły podobnie jak w przypadku klasy „drzew wysokich” jako warstwa referencyjna. Poligony otrzymane na drodze wektoryzacji ekranowej obszaru objętego ortofotomapą (7 fragmentów) po skontrolowaniu poprawności topologicznej przecięto z analizowanymi fragmentami i określono zwarcie „warstwy wegetacji”. Automatyczna metoda polegała na sumowaniu powierzchni koron drzew uzyskanych z wykorzystaniem programu TreesVis oraz skryptu do wyodrębniania koron, tzw. „delineacji” (ang. *delineation*), stworzonego przez Wang na Uniwersytecie Alberta Ludwika we Freiburgu (Niemcy). Skrypt ten bazował na oprogramowaniu Halcon (MVTec Software). Algorytm testowano na zNMPT (znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu) o rozdzielczościach 0.25 m, 0.5 m, 1 m i 2 m, przy czym modele w rozdzielczościach 0.25÷1m dodatkowo wygładzono filtrami dolnoprzepustowymi Gaussa o macierzy 3x3, 5x5 i 7x7. Model zNMPT wygenerowano uprzednio w programie TreesVis na podstawie chmury punktów ALS. Uzyskane na tej drodze korony drzew poddano identycznym analizom GIS jak wyżej. Powierzchnię rzutu koron dla drzew wykrytych za pomocą programu Terrascan uzyskano przez „rozpuszczenie” granic między poligonami koron wykrytych, tak jak dla „drzew wysokich” („Tscan BS” oraz „Tscan B”). Dla uzyskanych zestawów danych przeprowadzono test parametryczny t-Studenta dla prób zależnych, gdyż rozkład zmiennej dla wszystkich metod nie różnił się istotnie od normalnego.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

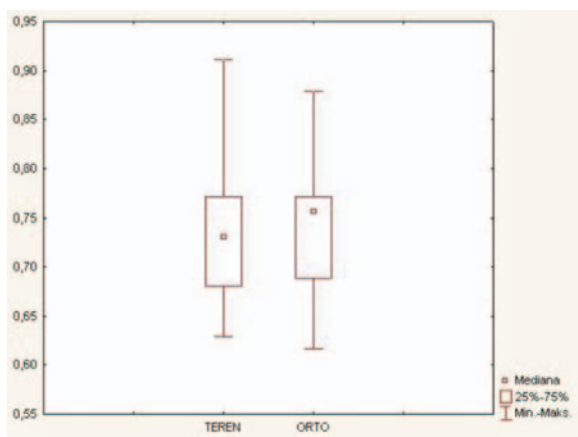
4.1. Wyniki określania zwarcia poziomego dla klasy „drzew wysokich”

Uzyskana automatyczną metodą „Tscan BS” i „Tscan B” suma powierzchni rzutów koron okazała się zawyżona w stosunku do danych referencyjnych. Błędy dla algorytmu „Tscan BS” wahały się w zakresie 0.25÷0.78 (średnia dla całego terenu +0.49). Jako zwarcie pełne rozumie się wartość 1.00. Drugi wariant „Tscan B” dawał już nieco mniejszy zakres 0.14÷0.59 (średnia 0.40). Wydaje się, że błędy wynikają z jednej strony z zawyżania powierzchni koron przez algorytm, a z drugiej z detekcji zbyt dużej liczby drzew. Szczególnie metoda „Tscan BS” obciążona była błędem polegającym na

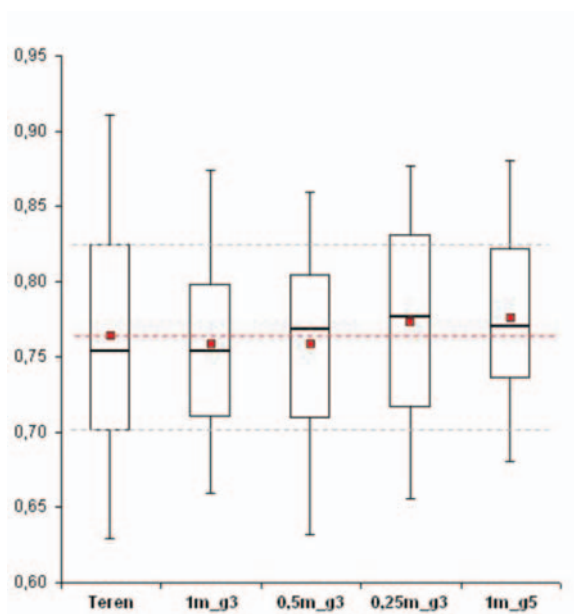
rozpoznawaniu wierzchołków drzew liściastych jako dodatkowych „Świerków” w centrum korony tych drzew, co wynikać może z faktu iż w większości przypadków stan zdrowotny tych osobników pozostawia dużo do życzenia (duża liczba podkoron). Dokładność tej metody obniżał również fakt, iż w programie Terrascan każdemu wykrytemu drzewu przyporządkowywany jest ten sam model kształtu korony (dla „Świerka” w rzucie pięciokąt, dla „Brzozy” – ośmiokąt), o wielkości zależnej od wielkości wykrytego drzewa. Program nie uwzględnia zatem indywidualnego przebiegu krawędzi korony. Wyniki nie potwierdziły także przypuszczenia, że metoda automatyczna sprawdzi się w sytuacjach silnego zwarcia przekraczającego wartość 1.0 (przenikanie się koron). Algorytm „Tscan BS” dla fragmentu nr 13 o zwarciu 1.32 wykazał różnicę 0.25, natomiast dla fragmentu nr 3 (rzeczywiste zwarcie 0.64) różnicę sięgającą aż 0.44. W badaniach Lim *et al.*, (2003) zwarcie poziome obliczano na podstawie równania regresji dla dwóch zmiennych, a następnie porównywano z pomiarami terenowymi. Obie zmienne były parametrami uzyskanymi z chmury punktów ALS dla poszczególnych powierzchni próbnych. Pierwszą zmienną stanowiła średnia wysokość chmury punktów ALS, a drugą średnia wysokość dla punktów odfiltrowanych na podstawie określonego progu intensywności odbicia. Na podstawie stworzonego równania stwierdzono wprawdzie, że stopień wyjaśnienia wariacji zwarcia poziomego przez obie zmienne wynosi aż 89%, jednak brak normalności rozkładu reszt sprawia, że uzyskane równanie nie jest istotne. Trudno więc odnieść się do tego wyniku. W każdym razie dokładność metod określania zwarcia poziomego metodami „Tscan B” i „Tscan BS” okazała się być niezadowalająca. Udoskonalenie algorytmu wykrywania drzew w programie Terrascan poprzez wzbogacenie o wektorowe wzorce typów korony większej liczby drzew jak i dopasowanie wstawianych modeli 3D drzew do indywidualnych cech osobników mogłoby poprawić jego dokładność.

4.2. Wyniki określania zwarcia dla klasy „warstwa wegetacji”

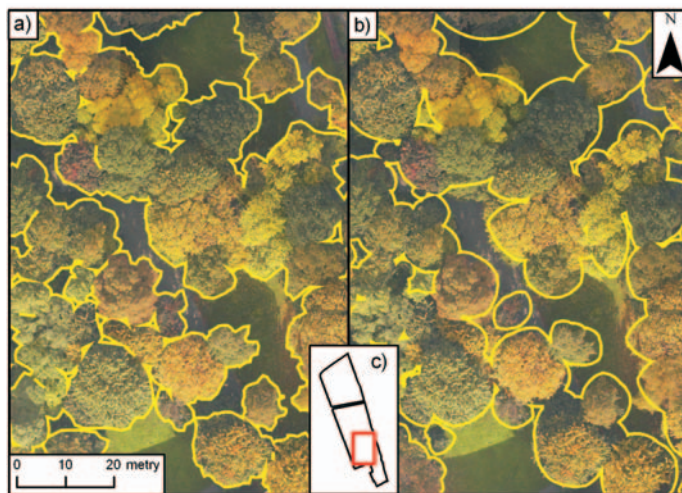
Porównanie rozkładu zmiennych uzyskanych metodą manualną „ORTO” i metodami automatycznymi w poszczególnych fragmentach terenu badań z danymi referencyjnymi, a także wyniki testów statystycznych pozwoliły stwierdzić, najwyższą dokładność metod: „ORTO”, „1m_g3”, „05m_g3”, „025m_g3” oraz „1m_g5” (gdzie np. g3 oznacza zastosowanie filtru Gaussa w oknie 3x3 piksele). Zakresy zmienności zwarcia dla klasy „warstwa wegetacji” uzyskane metodą „ORTO” w największym stopniu pokrywają się z danymi referencyjnymi (Rys. 3). Nieco gorzej, choć również zadowolająco, wypadły metody „1m_g3”, „05m_g3”, „025m_g3” oraz „1m_g5” (Rys. 4). Metoda „ORTO” generowała nieduże błędy (0.00 ± 0.03), a przy porównaniu poligonów otrzymanych na podstawie pomiarów terenowych z wynikiem wektoryzacji ortofotografii nasuwa się wręcz wątpliwość, czy rzeczywiście dane pozyskiwane tradycyjnymi metodami powinny być traktowane jako referencja (Rys. 5). Wektoryzacja koron na ortofotomapie jest dokładniejszym sposobem pozyskiwania informacji o zwarciu warstwy wegetacji, niż czasochłonne pomiary rzutów koron w 8 kierunkach. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie tej metody w ocenie zwarcia poziomego jest ograniczone, m.in. z uwagi na to, że jest ono określane dla poszczególnych pięter, których nie da się wyznaczyć wyłącznie



Rys. 3. Rozkład zmiennej zwarcie dla klasy „warstwa wegetacji” określonej na podstawie pomiarów terenowych („TEREN”) oraz metody wektoryzacji ekranowej „ORTO”.



Rys. 4. Rozkład parametru zwarcie określonego dla klasy „warstwa wegetacji” automatycznymi metodami bazujących na zNMPT o różnej rozdzielczościach i zastosowanych filtrach wygładzających. Czerwona przerywana linia oznacza wartość średnią dla danych referencyjnych (teren), a liniami przerywanymi zaznaczono pierwszy i trzeci kwartył.



Rys. 5. Obrys koron drzew o wysokości powyżej 5 m wykonany metodą ekranowej wektoryzacji ortofotomapy (a - z lewej) oraz na podstawie pomiarów terenowych rzutów koron w 8 kierunkach (b - z prawej) dla fragmentu terenu badań (c).

na podstawie ortofotomapy. Problem pojawia się również w przypadku przenikania się koron drzew, które uniemożliwiają ich dokładną wektoryzację. W takim jednak przypadku można posiłkować się przekrojami przez chmurę punktów ALS jeśli tego typu dane są dostępne.

Na podstawie wyników uzyskanych dla metod automatycznych można wysnuć wniosek, że uzasadniona jest filtracja otrzymanych w programie TreesVis modeli (NMPT), przy czym filtr Gaussa o macierzy 3x3 piksele wydaje się być wystarczający. Żaden z zastosowanych modeli, który nie został poddany filtracji nie okazał się być dostatecznie dokładny. Można przypuszczać, że wygładzanie koron dokonane w oprogramowaniu TreesVis (głównie dedykowane drzewom iglastym), w przypadku gatunków liściastych okazało się niewystarczające. Wyniki uzyskane metodami „ORTO” (błąd $0.01 \div 0.03$) „1m_g3” ($0.01 \div 0.07$), „05m_g3” ($0.01 \div 0.06$), „025m_g3” ($0.01 \div 0.1$) oraz „1m_g5” ($0.01 \div 0.09$) są satysfakcjonujące i kwalifikują omawiane metody do praktycznego stosowania (Rys. 3). Szczegółowa analiza wyników metod bazujących na zNMPT wykazała, iż im mniejszy był piksel modelu (0.25 m oraz 0.5 m) tym dokładniej oddawał on kształt korony. Zdarzało się jednak, że wykazywano nie istniejące w rzeczywistości luki przez fakt zbyt dużego uszczegółowienia modelu. Być może lepszy wynik można by uzyskać dokonując delineacji koron na wysokorozdzielczym zNMPT, a następnie zastosować algorytm wypełniający luki o niewielkiej powierzchni.

5. WNIOSKI

Dokładność określania parametru zwarcia poziomego dla klasy „drzew wysokich” oraz „warstwy wegetacji” automatycznymi metodami „Tscan B” oraz „Tscan BS” jest niezadowolająca. Przyczyna tego tkwi w zawyżaniu liczby drzew przez automatyczny algorytm „*detect trees*”, jak również w braku precyzji odwzorowania kształtu korony poszczególnych analizowanych drzew. Błędy tej metody można by ograniczyć poprzez wykorzystanie większej liczby wzorców typów koron (różne biblioteki gatunków) oraz indywidualne modelowanie koron drzew. Nie wydaje się jednak by programiści Terrasolid byli zainteresowani udoskonalaniem algorytmu, który z założenia ma działać schematycznie, wspomagając wizualizację 3D miast, w oparciu o gotowe biblioteki wektorowych drzew.

Przeprowadzone badania dowiodły wysokiej dokładności w określaniu parametru zwarcia dla klasy „warstwa wegetacji” w oparciu o metody:

- manualne bazujące na wektoryzacji ortofotografii lotniczej („ORTO”),
- automatyczne wykorzystujące segmentację zNMPT wygenerowanego w różnej rozdzielczości i oznaczonych jako: „1m_g3”, „05m_g3”, „025m_g3” oraz „1m_g5”.

Metody te z całą pewnością można wykorzystać w praktyce wspomagając tym samym prace inwentaryzacyjne prowadzone dla zieleni miejskiej. Jednocześnie nasuwa się bardzo ważne pytanie, czy tradycyjne pomiary rzutów koron drzew przeprowadzane w 8 kierunkach, nie powinny być zastąpione wektoryzacją ekranową ortofotomapy lub automatycznym przetwarzaniem chmury punktów ALS.

Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego w dalszym przetwarzaniu zNMPT poprawia wyniki detekcji koron drzew. Uzasadnione jest zatem wygładzenie modeli przy użyciu tego rodzaju filtrów. Wydaje się też, iż jeszcze lepsze wyniki można będzie uzyskać w sytuacji udoskonalenia metody wypełniając luki o niewielkiej powierzchni powstające na wysokorozdzielczym modelu.

Lotniczy skaningu laserowy ALS dostarcza danych, które świetnie nadają się do wykorzystania w precyzyjnym określaniu zwarcia warstwy wegetacji (wysokiej zieleni miejskiej) w sposób automatyczny. Jednoczesne wykonywanie zdjęć cyfrowych kamerami lotniczymi gwarantuje wzajemne uzupełnianie się tych metod. Zastosowanie ALS oraz cyfrowych lotniczych ortofotografii w inwentaryzacji zieleni miejskiej prowadzonej na dużą skalę jest w pełni uzasadnione i przynosi poza oszczędnością czasu i środków finansowych przede wszystkim obiektywizm.

6. LITERATURA

Czerwieniec M., Lewińska J., 1996. *Zieleń w mieście*. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej. Warszawa.

Imai Y., Setojima M., Yamagischi Y., Fujiwara N., 2004. Tree-height Measuring Characteristics of Urban Forests by Lidar Data Different In Resolution. *Geo-Imagery Bridging Continents*. XXth ISPRS Congress Istanbul, Turkey 12-23.07.04, s. 513-516.

Lim K., Treitz P., Baldwin K., Morrison I., Green J., 2003. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29 (5), s. 658-678.

McPherson E. G., Nowak D. J., Rowntree R. A., 1994. Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Chicago's Urban Forest. *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech Rep. NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, NEFES.

Meinel G., Hecht R., Socher W., 2006. Städtisches Grünvolumen – neuer Basisindikator für die Stadtökologie? Bestimmungsmethodik und Ergebnisbewertung. *Sustainable Solutions for the Information Society - 11th International Conference on Urban Planning and Spatial Development for the Information Society Competence Center of Urban and Regional Planning*, Vienna.

Miller R. W., 1997. *Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces-2nd Edition*. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall, Inc.

Weidner U., 2006. Analysis and comparison of different high-resolution data sets for urban applications. *Remote Sensing: From Pixels to Processes*. ISPRS Commission VII Mid-term Symposium. Enschede. 8-11.05.06.

Wężyk P., 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, Vol. IV (4), s. 119-132.

Wężyk P., 2008. Modelowanie chmury punktów ze skaningu laserowego w obszarze koron drzew. Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 18, s. 685-695.

DESCRIBING CANOPY CLOSURE IN KRAKOW'S PLANTY PARK USING AIRBORNE LASER SCANNING

KEY WORDS: airborne laser scanning (ALS), urban green, crown closure

SUMMARY: Urban green areas play a significant role in built-up areas as they have important microclimatic functions (oxygen production, shading), as well as aesthetic or protective functions (reducing noise pollution and also gas and dust imissions). The horizontal and vertical structure of trees and bushes, considered as the basic element of urban green, determines these functions. Getting the best from urban space, in relation to green areas, involves gathering particular parameters for large surfaces using remote sensing technologies, i.e. Airborne Laser Scanning (ALS). The article presents a trial of a method for automatic determination of crown closure for "high trees" (above 15 m high) and manual and automatic determination of closure of the whole vegetation layer (above 5 m height) using ALS point clouds and airborne orthophotographs. The test area (3.47 ha.) was situated in Krakow's Planty Park. ALS data were collected in 2004 from a helicopter with a TopEye scanner and a medium format digital airborne camera. Analyses of crown closure

for “high trees” were conducted directly on the ALS point cloud (Terrasolid Ltd.). In order to determine the vegetation layer’s closure, digitalization of the airborne orthophotomap and analyses of DSM using TreesVis Software (LAU, Freiburg) were carried out. The results of the estimation of the „high trees” crown closure were not satisfactory. In contrast, the accuracy of determining the closure of the vegetation layer proved to be very high. The range of differences between the results from the digitalization method compared to the reference data, was 0-3%. Satisfactory results, which means results differing in the 1-10% range, were also reached by automatic methods based on DSM of diverse resolutions: 1.0 m, 0.5 m or 0.25 m (with Gauss filter of 3x3 pixel) and 1.0 m (with Gauss filter of 5x5 pixel). The work proved the great utility of ALS technology combined with digital photogrammetry for determining the closure of the vegetation layer in an automatic and objective way.

dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel.: +48 12 6625082
fax: +48 12 6625082

Elżbieta Wawrzeczko
elawawrzeczko@gmail.com
tel.: +48 12 6625082
fax: +48 12 6625082

