

## NAZIEMNY SKANING LASEROWY W INWENTARYZACJI ZIELENI MIEJSKIEJ NA PRZYKŁADZIE PLANT W KRAKOWIE\*

### TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR AN URBAN GREEN INVENTORY

Piotr Tompalski\*\*

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny,  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: naziemny skanining laserowy, lidar, zieleń miejska, inwentaryzacja

STRESZCZENIE: Praca prezentuje wyniki badań nad zastosowaniem naziemnego skaningu laserowego (TLS) w inwentaryzacji zieleni miejskiej. Obiektem badań na którym wykonano analizy, był fragment Plant w Krakowie. Pozyskano dane referencyjne (położenie, grubość, wysokość, wysokość podstawy korony, wielkość korony), a następnie przeprowadzono skanowanie, łącznie na 13 stanowiskach, za pomocą skanera FARO LS 880. Pozyskane chmury punktów połączono, w programie Faro Scene używając do tego punktów wiążących rozmieszczonych w terenie podczas skanowania. Analizy chmury punktów (filtracja, klasyfikacja) przeprowadzono w oprogramowaniu TerraSolid. Wygenerowane przekroje, w kilku wariantach, posłużyły do określenia położenia drzew oraz ich pierśnicy. Mierzono również wysokość drzew oraz wybrano przykładowe drzewo, na którym podjęto próbę modelowania oraz dokładnego pomiaru miąższości pnia i korony. Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką dokładność pomiaru wszystkich mierzonych cech, charakteryzując się ponadto powtarzalnością oraz obiektywnością.

#### 1. WSTĘP

Skaning laserowy (LIDAR) to dynamicznie rozwijająca się technologia zdalnego pozyskiwania danych. Jeśli przyjąć tradycyjny podział teledetekcyjnych metod pozyskiwania danych, skaning laserowy zalicza się do systemów aktywnych. Wynikiem skanowania nie jest jednak obraz (raster), lecz zbiór punktów, z których każdy posiada współrzędne XYZ oraz inne informacje, takie jak intensywność czy kolejny numer odbicia. Skaning laserowy możemy podzielić na trzy rodzaje: skaning satelitarny (ang. *satellite laser scanning*, SLS), skaning lotniczy (ang. *airborne laser scanning*; ALS) oraz skaning naziemny (ang. *terrestrial laser scanning*, TLS) (Wężyk, 2006; Dubayah, Drake, 2000).

Naziemny skaningu laserowy to technologia, w której do określenia lokalizacji i pomiarów obiektów wykorzystuje się wiązkę lasera. Wiązka ta wysyłana jest z bardzo dużą częstotliwością ze skanera, a następnie rejestrowane są jej odbicia (w przypadku skanerów impulsowych). Skaner oblicza współrzędne punktów, od których następuje odbicie wiązki na podstawie pomiaru odległości (zasada zbliżona do pomiaru odległości w dalmierzach laserowych) oraz pomiaru kątów – poziomego oraz pionowego (Pfeifer, Briese, 2007). Podkreślenia wymaga fakt, iż pomiar przebiega automatycznie i w bardzo krótkim czasie. W zależności od zastosowanej technologii skaner jest zdolny wysyłać od kilku tysięcy do ponad kilkuset tysięcy impulsów na sekundę.

Problem dokładnego pomiaru drzew za pomocą nowoczesnych technologii jest od kilkunastu lat poruszany w literaturze światowej. Nad zagadnieniem wykorzystania w tym celu naziemnego skaningu laserowego pracowali m.in. Lichti *et al.*, (2002), Aschoff, Spiecker, (2004), Pfeifer, Winterhalder (2004), Watt, Donoghue (2005), Henning, Radtke (2006), Wężyk *et al.*, (2007). W opracowaniach tych przytaczane są liczne dowody dużych możliwości wykorzystania skaningu w pomiarach drzew. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż dane pozyskane za pomocą skanera pozwalają nie tylko na pomiar cech drzew mierzonych standardowo w terenie (pierśnica, wysokość, położenie drzewa), ale także wielu innych (wysokość podstawy korony, długość i jej zasięg, zbieżność oraz nachylenie pnia, grubość pnia na dowolnej wysokości), dzięki czemu możliwe jest bardzo dokładne określenie jego miąższości.

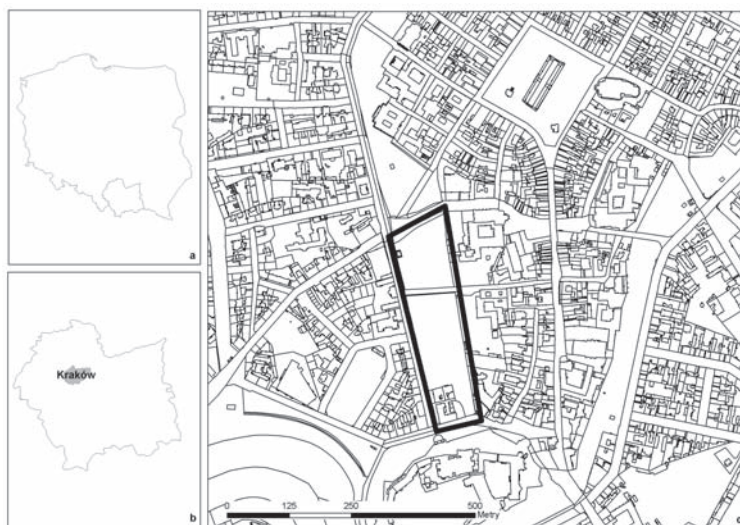
Pomiar drzew nastęrcza wiele trudności, głównie ze względu na ich nieregularny kształt, co szczególnie dotyczy zieleni miejskiej. Stosowane obecnie metody inwentaryzacji drzew w miastach bazują na określeniu gatunku (rodzaju), pomiarze grubości pnia (średnica lub obwód), wysokości oraz lokalizacji w przyjętym układzie geodezyjnym. Pomiaru te są czasochłonne, a ich dokładność w bardzo dużym stopniu zależy od osoby je wykonującej. Typowymi przyrządami pomiarowymi są tzw. pierśnicomierz (pomiar grubości drzewa), ewentualnie taśma pomiarowa, w przypadku gdy mierzony jest obwód drzewa. Do pomiaru wysokości drzewa stosuje się różnego rodzaju wysokościomierze. Pomiar wysokości oparty jest zazwyczaj o pomiar odległości do pnia oraz kąta pionowego zawartego między podstawą pnia a wierzchołkiem drzewa. Szczególnie pomiar wysokości drzew, ze względu na fakt, iż nie jest to pomiar bezpośredni, obarczony jest błędami instrumentu i obserwatora (subiektywna interpretacja położenia wierzchołka, często niewidocznego).

Zastosowanie skaningu laserowego w inwentaryzacji terenów zadrzewionych pozwala przede wszystkim na określenie liczby drzew oraz na bardzo dokładny pomiar grubości ich pni, wysokości, położenia oraz dodatkowo wielu innych cech, których pomiar tradycyjnymi metodami byłby bardzo skomplikowany, czasochłonny lub po prostu niedokładny. Produkt skanowania, tzw. chmura punktów (ang. *point cloud*) pozwala na dokładny i obiektywny pomiar grubości pnia na dowolnej wysokości, pozwala określić wysokość całego drzewa, wysokość podstawy korony, umożliwia również precyzyjne określenie kształtu korony oraz zasięgu jej rzutu. Możliwe jest również określenie nachylenia pnia, jego zbieżności oraz deformacji. Użytkownik otrzymuje możliwość dokładnego pomiaru praktycznie każdej cechy pojedynczego drzewa jak i większej ich grupy poprzez przeniesienie zeskanowanego fragmentu przestrzeni w świat wirtualny.

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań nad zastosowaniem naziemnego skaningu laserowego jako narzędzia do wykonywania zdalnych pomiarów związanych z inwentaryzacją zieleni miejskiej.

## 2. METODY

Terenem badań, na którym został przeprowadzony skaning był fragment Plant krakowskich, pomiędzy ulicami Franciszkańską i Podzamcze (Rys. 1). Zastosowano skaner FARO LS 880 (Rys. 2), który dokonuje rejestracji chmury punktów w zakresie  $360^\circ$  w poziomie oraz  $320^\circ$  w pionie, przy maksymalnym zasięgu wynoszącym 76 m. Dokładność pomiaru odległości na 50 m wynosi 0.6 mm (Faro, 2007).



Rys. 1. Lokalizacja terenu badań.



Rys. 2. Skaner FARO LS 880.

Przed przeprowadzeniem skaningu wszystkie drzewa znajdujące się na wybranym terenie zostały zmierzone metodami tradycyjnymi. Została określona ich pozycja przy pomocy pomiarów geodezyjnych (metoda biegunowa): grubość (mierzone obwód drzewa), wysokość całego drzewa, wysokość podstawy korony oraz wielkość korony (pomiar szerokości korony w ośmiu kierunkach).

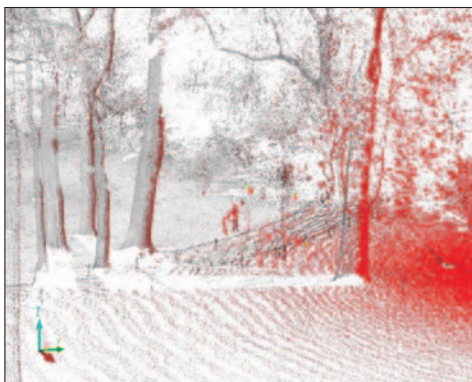
Stanowiska skanera rozmieszczono tak, aby jak najlepiej obrazować drzewa znajdujące się pomiędzy ulicami Franciszkańską a Poselską oraz dodatkowo zeskanowano kilka grup drzew rosnących na pozostałym fragmencie terenu badań (pomiędzy ulicami Poselską a Podzamcze). Łącznie pozyskano 13 chmur punktów. Pomiędzy stanowiskami skanera umieszczano dostarczone przez producenta kule, które stanowiły tzw. punkty wiążące (ang. *tie points*). Kule te charakteryzowały się bardzo wysokim współczynnikiem odbicia i dzięki temu były bardzo dobrze rozróżnialne podczas wiązania za sobą skanów.



**Rys. 3.** Chmura punktów w widoku planarnym.

Skanowanie przeprowadzono więcej niż z jednego stanowiska, ze względu na wzajemne przesłanianie się drzew oraz ze względu na fakt, iż skanując z jednego stanowiska otrzymuje się informację jedynie o widocznej dla skanera części obiektu.

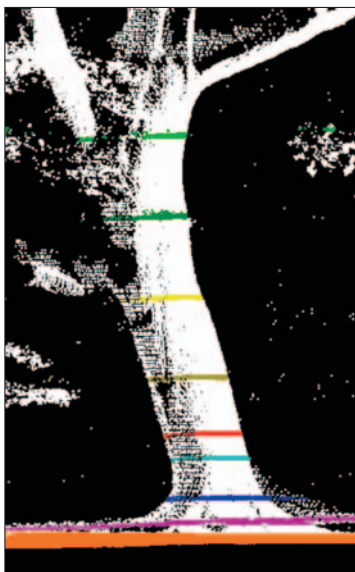
Pozyskane chmury punktów zostały poddane procesowi filtracji, a następnie połączone w oprogramowaniu FARO Scene 4.0, w oparciu o rozmieszczone w terenie punkty wiążące. Dzięki temu uzyskano w pełni trójwymiarowy model większości drzew znajdujących się na terenie badań (Rys. 3, Rys. 4). Kolejnym krokiem analiz była konwersja pozyskanych chmur punktów do formatu \*.las, oraz nadanie im georeferencji na podstawie przeprowadzonych pomiarów dGPS oraz pomiarów geodezyjnych. Tak przygotowane dane zostały poddane procesowi klasyfikacji w celu wyodrębnienia warstwy gruntu (punkty o najniższych wartościach współrzędnej Z) oraz warstw roślinności znajdujących się w określonych przedziałach wysokości nad gruntem (w tym celu zastosowano oprogramowanie Terrascan; Terrasolid). Warstwa wegetacji wysokiej posłużyła następnie



**Rys. 4.** Połączone chmury punktów w widoku 3D.

jako materiał do pomiaru grubości pni drzew na określonej wysokości nad gruntem oraz określenia ich pozycji. Do pomiaru grubości drzew został zastosowany algorytm (Kozioł, Wężyk, 2007; Tompalski, Kozioł, 2008), który w sposób automatyczny dokonuje pomiaru pola przekroju pnia na zadanej wysokości (np. 130 cm nad gruntem, tzw. pierśnica drzewa (Rys. 5).

Zastosowana metoda pomiaru grubości pni drzew uwzględnia nieregularność ich przekroju poprzecznego. Działanie algorytmu bazuje na wycinku chmury punktów



**Rys. 5.** Rezultat klasyfikacji chmury punktów. Kolorem czerwonym oznaczono wycinek znajdujący się na wysokości 130 cm nad gruntem.

o grubości 4 cm znajdującym się w pewnym przedziale wysokości (np. 128-132 cm) nad gruntem. Taki wycinek jest następnie klasyfikowany do jednej z trzech kategorii w zależności od stopnia pokrycia punktami. Pomiar pola przekroju wycinków z każdej kategorii przebiega odmiennie (Tompalski, Koziół, 2008). Kształt poprzecznego przekroju pnia nie wpływa w żaden sposób na dokładność pomiaru, gdyż mierzone jest pole otoczki wypukłej zawierającej wszystkie punkty tego przekroju, a nie pole figury (okrąg, elipsa) wpasowanej w te punkty. Grubość drzew nie określana jest więc jako jego średnica w danym miejscu lecz wyrażona jest polem przekroju.

Wysokość drzew została zmierzona w programie Terrascan jako wartość najwyższego punktu z chmury reprezentującej koronę danego drzewa. Wysokość mierzono na dwóch przekrojach prostopadłych do siebie. Natomiast pozycje drzew zostały określone jako centroidy wycinków chmury punktów znajdujących się na wysokości 20 cm nad gruntem.

Chmura punktów pozyskana za pomocą skanera laserowego dostarcza szczegółowych danych o całym skanowanym obiekcie. Pomijając fakt wzajemnego przesłaniania się drzew czy też wzajemnego przesłaniania się gałęzi w obrębie korony danego drzewa, można je wykorzystać do modelowania zarówno koron jak i pni. Modelowanie to ważne jest z punktu widzenia nie tylko wizualizacji przestrzennych i operowania na dokładnych modelach drzew w celu analizy ich rozmieszczenia, lecz również ze względu na możliwość dokładnego określenia miąższości pnia oraz objętości korony. Informacje te są szczególnie ważne z przyrodniczego i ekologicznego punktu widzenia.

Pierwszym etapem modelowania drzewa jest sklasyfikowanie punktów z całej chmury, które tworzą jego pień oraz koronę. Jest to szczególnie trudne w sytuacjach gdy korony drzew przenikają się wzajemnie.

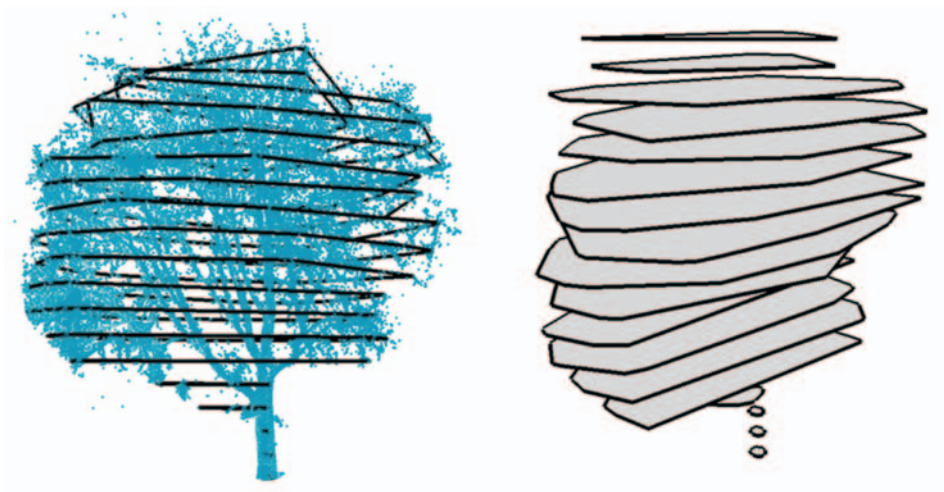
W celu modelowania korony pojedynczego drzewa zastosowano metodę otoczek wypukłych generowanych na określonych wysokościach nad gruntem (Kałuża *et al.*, 2009). Grubość wycinka wynosiła podobnie jak w przypadku grubości drzewa 4 cm, generowane były w odstępach 1m (Rys. 6) oraz 10 cm. Analizy te przeprowadzono na pojedynczym drzewie, które zostało w tym celu wyselekcjonowane z całej chmury punktów.

Autor podjął również próbę obliczenia objętości korony i pnia. Jednak ze względu na brak możliwości przeprowadzenia pomiarów referencyjnych w tym zakresie, uzyskane wartości nie mogą być ocenione pod względem dokładności.

Objętość korony (Rys. 6) obliczono sumując objętość poszczególnych, 10. centymetrowych bądź metrowych sekcji. Jako wartość porównawczą (nie referencyjną) objętość korony obliczono również za pomocą wzoru na objętość paraboloidy (1, Brack, 2008) oraz objętości kuli (2). Wzory te oparte są jedynie o szerokość korony (CW) oraz jej długość (CL).

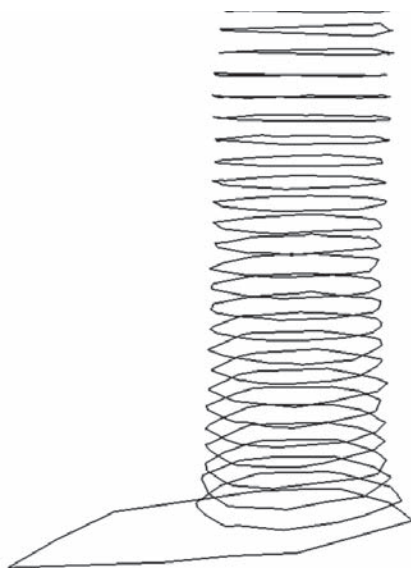
$$(1) \quad CV = \pi \frac{CW^2 CL}{8}$$

$$(2) \quad CV = \frac{4}{3} * \pi * \left( \frac{CW}{2} \right)^3$$



**Rys. 6.** Pojedyncze drzewo – chmura punktów oraz otoczki wygenerowane na podstawie poszczególnych przekroji poprzecznych. Wariant co 1 m.

Miąższość pnia drzew określono analogiczną metodą – w oparciu o przekroje generowane automatycznie, co 10 cm (Rys. 7). Sumując miąższość (objętość) poszczególnych fragmentów uzyskano jego miąższość całkowitą.

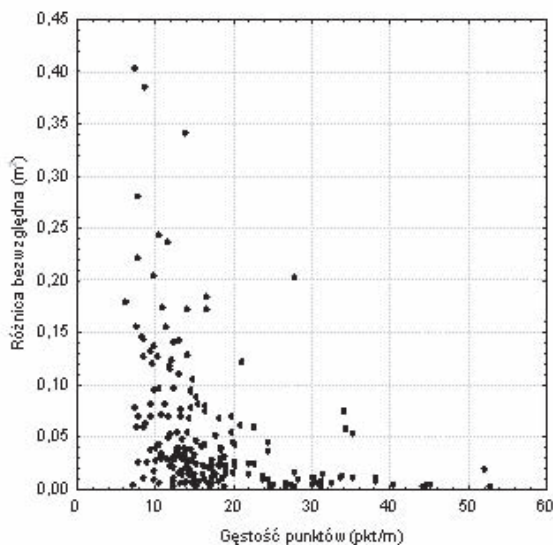


**Rys. 7.** Pojedynczy pień drzewa – otoczki co 10 cm.

### 3. WYNIKI

Grubość (zmierzona pierśnica) drzew różniła się w stosunku do pomiarów referencyjnych średnio o 0.013 m. Graniczne wartości różnic wynosiły od 0.042 do -0.003 m w zależności od stopnia pokrycia pnia punktami. Odchylenie standardowe różnic wynosiło 0.03 m.

Występuje wyraźna zależność pomiędzy dokładnością określenia pola przekroju drzewa (grubości) a gęstością punktów (Rys. 8). Dokładność ta jest wyraźnie mniejsza w przypadku gdy gęstość jest mała. W przypadku gdy pień drzewa „opisany” jest przez mniej niż 10 punktów, błąd może sięgnąć aż 0.4 m<sup>2</sup>. Sytuacja taka dotyczy przede wszystkim drzew znajdujących się w znacznej odległości od skanera.



**Rys. 7.** Wielkość różnicy określenia pola pierśnicowego przekroju w zależności od gęstości punktów.

Wysokość drzewa oraz wysokość podstawy korony określono ze średnią różnicą w stosunku do pomiarów referencyjnych odpowiednio: 0.98 m oraz -0.35 m. Odchylenie standardowe różnic wyniosło 2.27 m oraz 1.58 m.

Położenie drzew różniło się w stosunku do pomiarów sytuacyjnych średnio o 0.573 m przy odchyleniu standardowym równym 0.613 m.

Ze względu na testowy charakter analiz związanych z modelowaniem zarówno pnia jak i całego drzewa nie przeprowadzono weryfikacji uzyskanych wyników. Zdecydował o tym w szczególności fakt braku danych referencyjnych, które w przypadku Plant krawaskich nie były możliwe do pozyskania (konieczność ścięcia drzewa).



Określona miąższość pnia przykładowego drzewa (odcinek do pierwszej gałęzi, wysokość podstawy korony równa 2.9 m) wyniosła 1.831 m<sup>3</sup>, natomiast objętość korony 1579.32 m<sup>3</sup>. Objętość korony obliczona ze wzoru na paraboloidę wyniosła 1112.3 m<sup>3</sup>, ze wzoru na objętość kuli wyniosła 1087.5 m<sup>3</sup>.

#### **4. WNIOSKI**

W pracy zbadano możliwość zastosowania danych pozyskiwanych za pomocą naziemnego skaningu laserowego w inwentaryzacji zieleni miejskiej. Otrzymane wyniki potwierdziły wysoką dokładność pomiaru biometrycznych cech drzew przy wykorzystaniu tej technologii. Należy tutaj również zaznaczyć, iż dokładność urządzeń którymi zostały przeprowadzone pomiary referencyjne jest zasadniczo niższa niż dokładność skanera.

Inwentaryzacja terenów zielonych przeprowadzona za pomocą skaningu naziemnego pozwala znacznie zwiększyć dokładność pomiarów. Dotyczy to zarówno określenia pozycji drzew, ich grubości oraz wysokości. Ponadto możliwe jest precyzyjne określenie zasięgu korony drzewa na dowolnej wysokości, grubości pnia na dowolnej wysokości, grubości poszczególnych gałęzi, kąta ich osadzenia, czy też wysokości podstawy korony. Dane są doskonałym materiałem wyjściowym do tworzenia modeli 3D, których szczegółowość może być bardzo duża i zależy jedynie od użytkownika.

Osobnym zagadnieniem jest wykorzystanie pozyskanych chmur punktów do wizualizacji oraz modelowania drzew, krzewów i innych obiektów znajdujących się w zasięgu skanera. Dzięki temu można otrzymać dokładne dane dla celów planowania krajobrazu, planowania ogrodów, parków miejskich. W prosty sposób można kształtować istniejący fragment przestrzeni, wirtualnie wycinać istniejące drzewa, modyfikować ich korony, lub też sadzić nowe, od razu obserwując, jak zmieniać się będzie efekt końcowy.

Możliwe jest również bardzo dokładne obliczenie miąższości pnia oraz korony drzewa. Zastosowana prosta metoda otoczek wypukłych generowanych na poszczególnych wysokościach pozwala odtworzyć kształt pnia i korony drzewa na każdej wysokości.

Praca potwierdza przydatność nowoczesnych technologii pozyskiwania danych przestrzennych (naziemny skaning laserowy) do inwentaryzacji zieleni miejskiej. Skaning umożliwia pomiar wszystkich cech z większą dokładnością niż w przypadku pomiaru przeprowadzonego metodami tradycyjnymi, dodatkowo pozwalając na pomiar wielu cech, których określenie jest bardzo trudne lub nawet niemożliwe przy zastosowaniu metod tradycyjnych. Prace nad jego wykorzystaniem będą kontynuowane w kierunku jak największej automatyzacji pomiaru.

## 5. LITERATURA

Aschoff T., Spiecker H., 2004. Algorithms for the Automatic Detection of Trees in Laser Scanner Data. [w:] Thies M., Koch B., Spiecker H., Weinacker H. (red), Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI - 8/W2, Freiburg, Germany, 03-06.10.2004, s. 66-70.

Brack C., 2008. Tree crown. <http://sres-associated.anu.edu.au/mensuration/crown.htm#area>

Dubayah R. O., Drake J. B., 2000. Lidar Remote Sensing for Forestry. *Journal of Forestry*, Vol 98 (6), s. 44-52.

Faro, 2007. Faro Laser Scanner Ls - Techsheet. [http://faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/04REF201\\_041\\_Laser\\_Scanner\\_LS.pdf](http://faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/04REF201_041_Laser_Scanner_LS.pdf)

Henning J. G., Radtke P. J., 2006. Detailed Stem Measurements of Standing Trees from Ground-Based Scanning Lidar. *Forest Science*, Vol 52 (1), s. 67-80.

Kałuża T., Tymkow P., Wencel A., 2009. Wykorzystanie technik geomatycznych do oceny wpływu roślinności na kształtowanie warunków przepływu na terenach zalewowych. Materiały konferencyjne X Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Hydrotechniki”, Wojanów.

Koziół K., Wężyk P., 2007. Zastosowanie Algorytmu Delanuy'a w Eliminacji i Kłasyfikacji Chmury Punktów z Nziemnego Skaningu Laserowego. *Roczniki Geomatyki*, Tom V (Zeszyt 5), s. 33-41.

Lichti D. D., Gordon S. J., Stewart M. P., 2002. Ground-Based Laser Scanners: Operation, Systems and Applications. *Geomatica*, Vol 56 (1), s. 21-33.

Pfeifer N., Briese C., 2007. Geometrical Aspects of Airborne and Terrestrial Laser Scanning. [w:] Rönnholm P., Hyypä H., Hyypä J. (red), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. XXXVI, Part 3 / W52. Espoo, Finland. 12-14.09.2007.

Pfeifer N., Winterhalder D., 2004. Modelling of Tree Cross Sections from Terrestrial Laser-Scanning Data with Free-Form Curves. [w:] Thies M., Koch B., Spiecker H., Weinacker H. (red), Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI - 8/W2. Freiburg, Germany. 03-06.10.2004.

Tompalski P., Koziół K., 2008. Określanie Wybranych Cech Drzew Za Pomocą Nziemnego Skaningu Laserowego. Krakowska Konferencja Młodych Uczonych. Kraków. 25-27.09.2008.

Watt P. J., Donoghue D. N. M., 2005. Measuring Forest Structure with Terrestrial Laser Scanning. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 26 (7), s. 1437-1446.

Wężyk P., Koziół K., Glista M., Pierzchalski M., 2007. Terrestrial Laser Scanning Versus

Traditional Forest Inventory. First Results from the Polish Forests. [w:] Rönholm P., Hyypä H., Hyypä J. (red.): ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI, Part 3 / W52. Espoo, Finland. 12-14.09.2007, s. 424-429.

Wężyk P., 2006. Wprowadzenie do Technologii Skaningu Laserowego w Leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, Vol IV (4), s. 119-132.

## **TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR AN URBAN GREEN INVENTORY**

KEY WORDS: terrestrial laser scanning, lidar, urban green, inventory

SUMMARY: This paper presents research results concerning the use of terrestrial laser scanning (TLS) for creating an urban green inventory. The research was performed in Krakow's city-centre Planty park. Firstly field measurements were made to collect information about tree positions, dbh, height, crown base height and crown area. A Faro LS 880 laser scanner was then used to collect 13 point clouds. Single scans were then joined in Faro Scene. After that Terrasolid software was used to filter and classify the point cloud. Slices in several options were generated and were used in further analysis concerning tree position, dbh and single tree crown modelling. The results confirm the high accuracy and reliability of measurements based on the LIDAR data collected. The measurements are repetitive and objective.

mgr inż. Piotr Tompalski  
piotr.tompalski@ur.krakow.pl  
telefon: +48 609105303

---

\* wersja kolorowa artykułu jest dostępna na stronie <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit>

\*\* autor nagrodzony stypendium konferencyjnym dla doktorantów ufundowanym przez Fundację im. Anny Pasek

