

REKONSTRUKCJA GEOMETRII 3D KRZEWU NA PODSTAWIE NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO

3D GEOMETRY RECONSTRUCTION OF SINGLE SHRUB USING TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA

Przemysław Tymków, Andrzej Borkowski

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie 3D, skaniny laserowe, modelowanie roślinności, bliski zasięg, TLS

STRESZCZENIE: Technologia naziemnego skaningu laserowego dzięki swojej precyzji i rozdzielczości przestrzennej umożliwia odtworzenie geometrii drzew i krzewów zarówno w podejściu makrostrukturalnym, gdzie modelowany jest jej kształt obrysu zewnętrznego jak i w podejściu mikrostrukturalnym, gdzie przedmiotem modelowania jest kształt i topologia pojedynczych gałęzi. W pracy przedstawiono propozycję metody odtworzenia geometrii 3D krzewów a podstawie pomiarów w chmurze punktów pozyskanych naziemnym skanowaniem laserowym (TLS). Metoda pomiarowa oparta jest na podziale chmury punktów TLS wzdłuż osi pionowej na segmenty o jednakowej grubości. W każdym segmencie, w zależności od wyboru podejścia, dokonywana jest selekcja punktów tworzących bądź obrys zewnętrzny rośliny, bądź obrys poszczególnych gałęzi. Wykorzystano do tego celu algorytm wyznaczania otoczki wypukłej (ang. *convex hull*). Utworzone na podstawie wybranych punktów bryły reprezentujące fragmenty rośliny w pojedynczym segmencie integrowane są z bryłami z segmentów sąsiadujących. W podejściu mikrostrukturalnym wymaga to odtworzenia modelu topologii gałęzi rośliny, którą oparto o schemat grafu. Aby zapewnić łagodne i spójne połączenia poszczególnych segmentów metoda selekcji punktów opiera się na kombinacji metody otoczki wypukłej 2D i 3D, która zapewnia utworzenie jednakowej powierzchni styku łączonych ze sobą brył. Na potrzeby oceny ilościowej wykonany został model krzewu, którego pole powierzchni i objętość w podejściu makro i mikrostrukturalnym wyznaczono na podstawie bezpośrednich pomiarów przymiarem liniowym. Parametry te porównano z otrzymanymi na podstawie modeli 3D. Do budowy modelu makrostrukturalnego odpowiednią metodą modelowania jest metoda warstwowa (multi convex hull), przy czym grubość warstwy należy wybierać na poziomie kilku centymetrów. Do budowy modelu mikrostrukturalnego zaproponowano metodę łączenia brył, przy czym grubość segmentu dla tej metody powinna się kształtować na poziomie rozdzielczości skanowania.

1. WSTĘP

Potrzeba wiarygodnego modelowania przestrzeni z jednej strony i rozwój nowoczesnych technik pozyskiwania i przetwarzania danych z drugiej strony, skutkują coraz częściej budową trójwymiarowych modeli świata realnego. Modele takie pozwalające na symulacje różnego rodzaju procesów i zdarzeń zachodzących w przestrzeni zastępują coraz częściej dwuwymiarowe mapy i bazy danych. Dobrym przykładem w tym zakresie jest modelowanie hydrodynamiczne. Nowoczesne modele hydrodynamiczne wymagają zarówno szczegółowe-

go numerycznego modelu terenu jak i znajomości elementów pokrycia terenu, łącznie z parametrami występującej tam roślinności.

Efektywne tworzenie modeli przestrzennych wymaga szybkiej metody pomiaru rzeźby terenu i geometrii obiektów zagospodarowania przestrzennego oraz szybkich i wiarygodnych algorytmów modelowania. Do pozyskiwania danych wykorzystywana jest najczęściej technologia skaningu laserowego. O ile w przypadku generowania numerycznego modelu terenu (NMT) szerokie zastosowanie ma lotniczy skaningu laserowy, to do celów określenia precyzyjnych kształtów poszczególnych obiektów w przestrzeni, najczęściej jest on niewystarczający ze względu na słabą rozdzielczość poziomą oraz w przybliżeniu jeden kierunek pomiaru. Dokładne modele takich obiektów jak: budynki czy roślinność krzewiasta i drzewiasta generowane są z wykorzystaniem danych naziemnego skaningu laserowego czasem zintegrowanych z danymi skaningu lotniczego.

Budowa szczegółowego modelu 3D pokrycia terenu w postaci bazy danych klas obiektów wymaga, poza atrybutami opisowymi, także geometrii poszczególnych obiektów. Specyfika wielu różnych klas pokrycia terenu i różnorodność typów elementów zagospodarowania w nich występujących narzuca indywidualne podejście nakierowane na efektywne i zautomatyzowane przetwarzanie dużych zestawów danych. Jedną z takich klas pokrycia terenu jest roślinność. Informacja o kształcie i rozmieszczeniu poszczególnych drzew i krzewów może być kluczowa z punktu widzenia niektórych analiz (np. w leśnictwie, ochronie przeciwpowodziowej) (Mokwa et al. 2009). Charakterystyczna morfologia roślinności drzewiastej lub krzewiastej w odpowiedniej fazie fenologicznej pozwala na penetrację bryły stanowiącej ich obrys przez wiązkę lasera, co umożliwia odtworzenie geometrii i topologii poszczególnych gałęzi, ale jednocześnie implikuje wiele problemów, które dla obiektów niepenetrowanych (np. budynki, rzeźby) nie występują. Niniejszy artykuł przedstawia przegląd opracowanych i zaimplementowanych przez autorów metod automatyzacji rekonstrukcji geometrii roślin krzewiastych na podstawie chmury punktów pozyskanej metodą naziemnego skaningu laserowego. Obliczenia i wizualizacje oparto o autorską aplikację opartą o środowisko .NET oraz biblioteki WPF i Ceometric. Pierwszą wersję algorytmów zaimplementowano w związku z obliczeniami współczynników szorstkości na potrzeby modelowania hydrodynamicznego i przedstawiono w pracy Tymków i Borkowski (2010). W prezentowanej wersji algorytmów wprowadzono pewne modyfikacje, na etapie implementacji, poprawiające jakość modelowania. Ponadto wykonano ocenę jakościową estymowanych wartości na podstawie modelu parametrów roślinności, przy czym skupiono się na polu powierzchni gałęzi oraz objętości krzewu, gdyż te parametry wydają się najtrudniejsze do oszacowania, na podstawie danych skaningu laserowego. Parametry te przydatne są w różnego rodzaju zastosowaniach, np. dla oszacowania współczynników szorstkości. Ocenę ilościową wykonano porównując wyniki otrzymane z modelu z odpowiednimi parametrami otrzymanymi w wyniku pomiarów manualnych, za pomocą suwmiarki i taśmy.

2. MODELOWANIE ORAZ WIZUALIZACJA GEOMETRII ROŚLINNOŚCI NA TLE LITERATURY

Modelowanie geometrii roślinności, zwłaszcza drzew jest przedmiotem licznych badań w ostatnim czasie. Dla potrzeb oceny wysokości oraz pierśnicy drzew wykorzystuje się pomiar w chmurze punktów 3D (Thies, Spiecker 2004, Wężyk et al. 2009). W pracy

Bienert et al. (2006) przedstawiono natomiast metodę automatycznej detekcji w chmurze punktów drzew oraz na podstawie jej segmentacji – oceny podstawowych parametrów geometrycznych pnia. Założono tu podział chmury punktów na segmenty wzdłuż osi pionowej układu współrzędnych. W poszczególnych segmentach wyszukiwany był wzorek owalu, który spełnia warunki dla przekroju pnia. Wykorzystując wiedzę o rozmieszczeniu pni tworzony był ich profil umożliwiający wizualizację i pomiar średnicy na różnych wysokościach. Z kolei Pfeifer i Winterhalder (2004) zaprezentowali metodę rekonstrukcji geometrii pnia oraz większych gałęzi opartą o lokalne wpasowanie w chmurę punktów nakładających się walców. Również w tym przypadku podział chmury punktów przeprowadzony został w płaszczyźnie horyzontalnej co jest uwarunkowane tym, że kierunek pionowy jest dominujący w przypadku wzrostu drzew. Te i podobne metody przedstawione w literaturze, skupiające się na algorytmach umożliwiających odtworzenie geometrii poszczególnych gałęzi, zaklasyfikować można do szeroko rozumianej kategorii metod modelowania mikrostruktury roślinności. W niektórych przypadkach jednak celem jest modelowanie rośliny jako zwartej bryły, której kształt wyznacza obrys zewnętrznych punktów. Próby wykorzystania do tego celu algorytmu wyznaczania otoczki wypukłej, która stanowi jedna z podstawowych technik geometrii obliczeniowej, podjęte były już dawno (Cluzeau, et al., 1995). Podejście takie nazwać można makrostrukturalnym.

Drugim ważnym aspektem w tworzeniu numerycznych modeli rzeczywistości 3D jest optymalizacja i standaryzacja wizualizacji. Tutaj duże znaczenie mają techniki powszechnie stosowane w przemyśle gier komputerowych. Przegląd ich możliwości i zastosowań zaprezentowali Fritsch i Kada (2004). Janowski et al. (2006) przedstawili natomiast autorską aplikację opartą o bibliotekę OpenGL służącą do wizualizacji modeli obiektów w fotogrametrii bliskiego zasięgu. Szczegóły dotyczące metod geometrii obliczeniowej, również wykorzystanych w niniejszej pracy, znaleźć można w obszernym dziele (Goodman i O'Rourke, 2004).

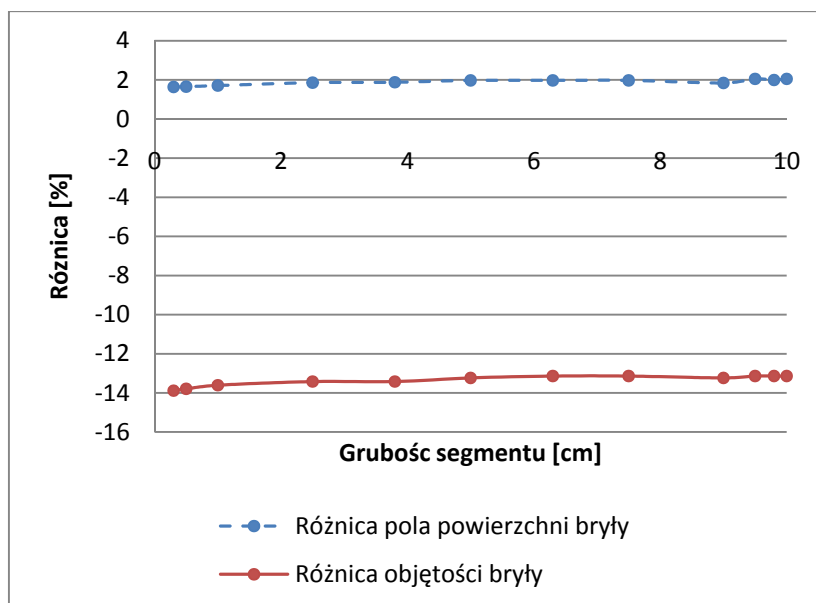
3. MODELOWANIE 3D ROŚLINNOŚCI KRZEWIASTEJ

3.1. Metody modelowania makrostrukturalnego

Metoda convex hull

Bryła wypukła (ang. *convex polyhedron*) jest naturalnym uogólnieniem wypukłego i zamkniętego poligonu. Bryła ta zbudowana jest z trzech typów obiektów geometrycznych: wierzchołków (ang. *vertex*), krawędzi (ang. *segment*) oraz zamkniętych powierzchni wypukłych (ang. *convex polygon*).

Metoda convex hull polegała na znalezieniu punktów tworzących obrys zewnętrzny bryły. Dodatkowo, w celu optymalizacji czasu działania, algorytm obliczeniowy został zaimplementowany w ten sposób, by punkty te były szukane warstwowo za pomocą algorytmu 2D, równoległymi do podłoża segmentami o zadanej grubości. Następnie na ich podstawie tworzona była otoczka wypukła 3D przedstawiająca bryłę krzewu. Obliczono pole powierzchni oraz objętość kolejnych brył w zależności od grubości warstwy. Wykonano 12 modeli o grubości segmentu od 0,3 do 10 cm. Wykresy zależności różnicy pól powierzchni i objętości obliczonych na podstawie pomiarów bezpośrednich oraz wygenerowanych modeli 3D, od grubości segmentu prezentuje rysunek 1, a przykładowy model – rysunek 3a.



Rys. 1. Zestawienie różnic pól powierzchni oraz objętości pomierzonych na podstawie makrostrukturalnych modeli 3D convex hull i referencyjnych pomiarów manualnych

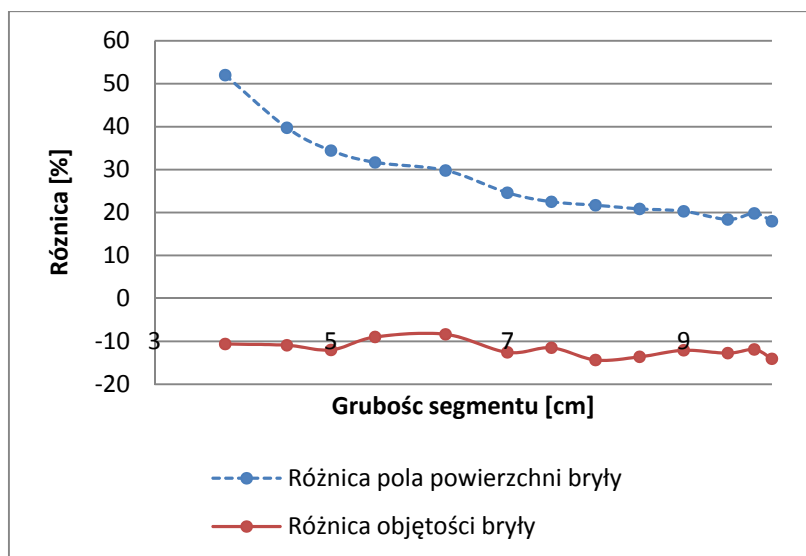
Metoda warstwowa – multi convex hull

W celu uzyskania lepszego dopasowania do niewypukłych fragmentów rośliny zaproponowano tworzenie segmentów o wspólnych krawędziach styku. Dzięki temu otoczka wypukła powstaje indywidualnie dla każdego z segmentów. Oczywiście bryła rośliny jako całość nie spełnia warunku wypukłości. Podział chmury dokonywany jest płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny XY. Parametrem metody wymaganym do ustalenia na wstępie jest grubość segmentów (odległość pomiędzy poszczególnymi płaszczyznami podziału).

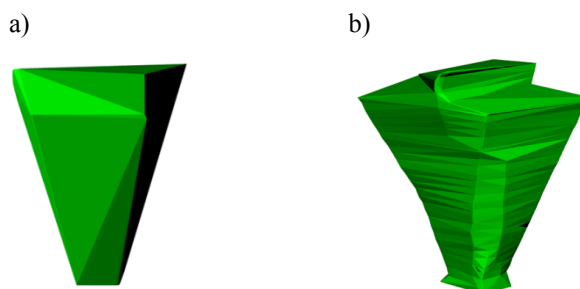
Aby zapewnić wspólne powierzchnie styku poszczególnych segmentów procedura modelowania pojedynczego segmentu przebiega kilkuetapowo:

1. punkty należące do jednego segmentu rzutowane są na płaszczyznę podziału,
2. dla wszystkich punktów w segmencie tworzona jest otoczka wypukła 2D,
3. punkty wybrane w etapie poprzednim uzupełnione o rzędną wysokości tworzą dolną granicę otoczki wypukłej 3D segmentu,
4. tworzona jest otoczka wypukła 3D, której górną granicę tworzą punkty wyznaczone w sposób opisany powyżej dla następnego segmentu.

Analizę różnic pól powierzchni i objętości pomierzonych na modelu CAD i ręcznie za pomocą przymiarów przeprowadzono na 13 modelach o grubości segmentów 3,8–10 cm (rys. 2) Wstępna analiza wykazała, że grubością graniczną dla wybranej rozdzielczości skanowania (rozdzielczość pionowa: 0.036° , tj. ok. 40.000 pikseli 3D na 360° , rozdzielczość pozioma: 0.003° , tj. ok. 470.000 pikseli 3D na 360°) jest 3,8 cm. Poniżej tej wartości występuje brak zarejestrowanych punktów w kolejnym segmentach, „rozrywanie” się ciągłości geometrii bryły oraz błędne wyniki. Wizualizację przykładowego modelu prezentuje rysunek 3b.



Rys. 2. Zestawienie różnic pól powierzchni oraz objętości pomierzonych na podstawie makrostrukturalnych modeli 3D multi convex hull i referencyjnych pomiarów manualnych



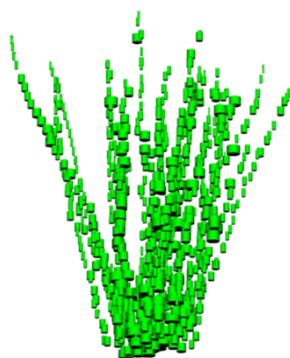
Rys. 3. Przykładowe modele makrostrukturalne krzewu:
a) wykonany metodą convex hull, b) wykonany metodą multi convex hull

3.2. Modelowanie mikrostrukturalne

Metoda walców

Przyjmując teoretyczne założenie, że kształt przekroju każdej gałęzi jest okręgiem, a kierunek wzrostu jest równoległy do osi pionowej (z) można w łatwy sposób stworzyć model, w którym walec jako bryła podstawowa reprezentuje geometrię fragmentu rośliny. Metodyka zakłada podział chmury punktów wzdłuż osi pionowej na segmenty o zadanej grubości. W obrębie segmentu dane rzutowane są na płaszczyznę, dokonywana jest segmentacja chmury na skupiska punktów, które potencjalnie tworzą pojedynczą gałąź

a następnie w każde skupisko wpasowywany jest walec o promieniu równym średniej odległości poszczególnych punktów tworzących skupisko od jego środka ciężkości. Wysokość walców równa się grubości segmentu. Wizualizację przykładowego modelu prezentuje rysunek 4. Na podstawie badań wykazano, że przyjęte założenia dyskwalifikują takie podejście w przypadku estymacji parametrów geometrycznych rośliny takich jak objętość czy pole powierzchni – różnice w stosunku do miar referencyjnych przekraczały dwukrotnie ich wartości. Ponadto założenie o pionowym kierunku wzrostu rośliny w przypadku wielu gatunków krzewów jest błędne.



Rys. 4. Przykładowy model mikrostrukturalny krzewu wykonany metodą walców

Metoda łączenia brył – multi convex hull w podejściu mikrostrukturalnym

Modelowanie przy pomocy tej metody opiera się na założeniach warstwowego podejścia makrostrukturalnego – znajdowania otoczki wypukłej 3D. Różnice polegają na tym, iż na poszczególnych poziomach odbywa się segmentacja chmury punktów. Punkty są grupowane i tworzą bryły reprezentujące poszczególne gałęzie. Algorytm obliczeniowy bazuje na prostej klasyfikacji nienadzorowanej najbliższego sąsiada. Jako główny współczynnik podziału brana jest maksymalna grubość gałęzi, ustalana w początkowej fazie obliczeń. Uproszczona procedura segmentacji wygląda następująco:

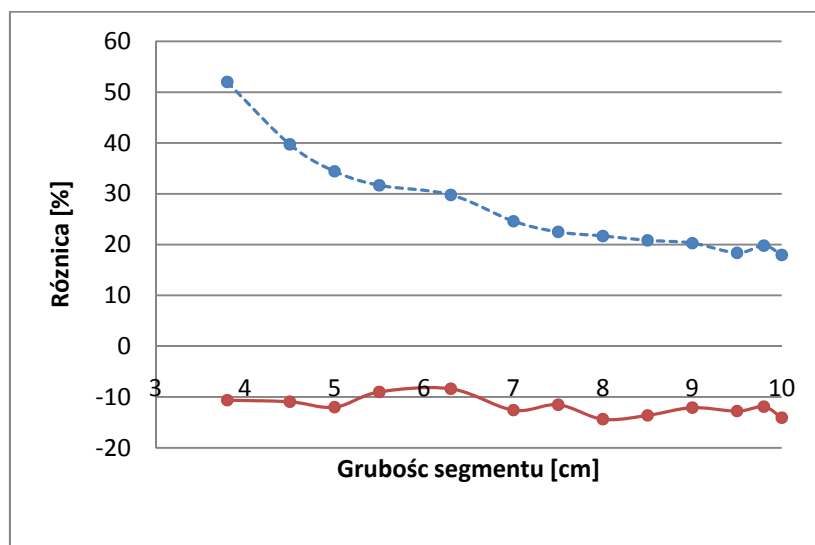
1. każdy punkt z segmentu wyznacza centrum masy potencjalnej gałęzi,
2. jeden punkt jest wybierany losowo,
3. lokalizowany jest najbliższy sąsiad wybranego losowo punktu,
4. jeśli odległość do najbliższego sąsiada jest mniejsza niż ustalona maksymalna grubość gałęzi, zakłada się, że oba punkty reprezentują tę samą gałąź, która w tym momencie jest reprezentowana przez centrum mas z obu punktów. W przeciwnym razie integracja nie będzie wykonana,
5. losowany jest następny punkt i procedura łączenia punktów ze sobą jest powtarzana, aż do momentu, w którym nie ma więcej segmentów do połączenia.

Wykonanie modeli brył na podstawie chmur punktów uzyskanych w drodze segmentacji nie gwarantuje zachowania ciągłości i topologicznych powiązań poszczególnych części rośliny. Aby wyeliminować powyższe mankamenty zaproponowany został algorytm łączenia poszczególnych segmentów. Opiera się ona na wyznaczeniu za pomocą algorytmu convex

hull 2D punktów tworzących powierzchnię styku sąsiednich segmentów, a w dalszej kolejności stworzenie bryły wypukłej z uwzględnieniem tej powierzchni. Procedura przebiega od najwyższego do najniższego poziomu tak aby w efekcie wszystkie gałęzie znalazły swój punkt wspólny na najniższym poziomie. Dzięki temu topologia otrzymanego modelu lepiej odzwierciedla topologię rośliny. Przykład wyniku integracji brył prezentuje rysunek 5.

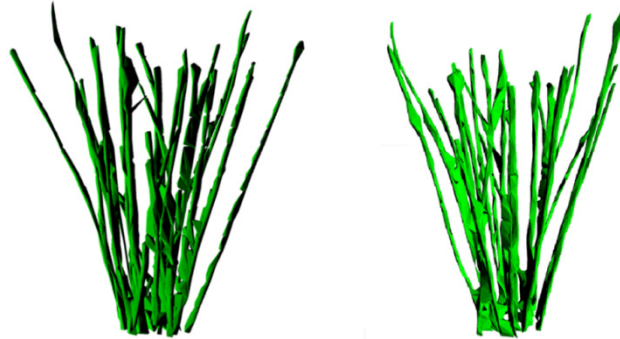


Rys. 5. Przykładowy wynik łączenia segmentów



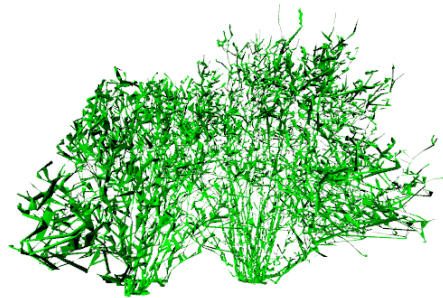
Rys. 6. Zestawienie różnic pól powierzchni oraz objętości pomierzonych na podstawie mikrostrukturalnych modeli 3D multi convex hull i referencyjnych pomiarów manualnych

W celu analizy przydatności tej metody wykonano 8 pomiarów. Grubość segmentów wynosiła 3÷10 cm. Wyniki zaprezentowano na rysunku 6. Wizualizacje przykładowego modelu uzyskanego tą metodą prezentuje rysunek 7.



Rys. 7. Przykładowy model mikrostrukturalny krzewu wykonany metodą multi convex hull – widok z obu stron

Opracowany algorytm zastosowano do modelowania krzewu leszczyny ozdobnej o średnio zwartej strukturze gałęzi w okresie bezlistnym. W tym przypadku możliwa była tylko wizualna ocena jakościowa. Analiza przedstawionego na rysunku 8 modelu pokazuje, że opracowany algorytm modelowania mikrostrukturalnego dobrze zachowuje topologię poszczególnych gałęzi i całej rośliny.



Rys. 8. Przykładowy model mikrostrukturalny dwóch krzewów leszczyny wykonany metodą multi convex hull oraz zdjęcie przedstawiające modelowane krzewy

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Skanowanie laserowe, jako metoda pozyskiwania geoinformacji, wymaga rewizji dotychczasowego, standardowego podejścia w zakresie pomiaru geometrii obiektów. W metodzie tej geometria obiektu modelowana jest na podstawie chmury teoretycznie niezależnych od siebie punktów. Kluczowym zagadnieniem w „dobie skaningu laserowego” staje się właściwe, a biorąc pod uwagę wielkości zbiorów danych, również efektywne modelowanie obiektów. Dzięki algorytmom geometrii obliczeniowej przefiltrowaną chmurę punktów

można w łatwy i szybki sposób przekształcić w model 3D typu CAD i na jego podstawie zmierzyć parametry geometrii obiektów, nawet tak skomplikowanych jak rośliny krzewiaste. W pracy przedstawiono algorytmy budowy modelu makrostrukturalnego i mikrostrukturalnego rośliny krzewiastej. Obydwa typy modeli stosowane są w pewnych zagadnieniach praktycznych. Do budowy modelu makrostrukturalnego odpowiednią metodą modelowania jest metoda warstwowa (multi convex hull), przy czym grubość warstwy należy wybierać na poziomie kilku centymetrów.

Do budowy modelu mikrostrukturalnego zaproponowano metodę łączenia brył. Metoda ta jest stosunkowo szybka, pozwala na modelowanie poszczególnych gałęzi oraz dobrze odzwierciedla topologię krzewu. Analiza różnic wielkości parametrów geometrycznych pomierzonych na modelach CAD i uzyskanych w drodze pomiarów manualnych wykazała, że najlepsza spośród rozpatrywanych grubość segmentu dla tej metody wynosiła około 4 cm. Należy pamiętać jednak, że referencyjny pomiar ręczny był pomiarem uproszczonym, a przedstawione w pracy różnice nie mogą świadczyć przeciw metodzie modelowania 3D, a jedynie służyć ocenie jej stabilności ze względu na różne wielkości parametru, jakim jest grubość segmentu.

5. LITERATURA

- Bienert, A., Maas, H.-G. and Scheller, S., 2006. Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. ISPRS WG VIII/11 & EARSeL joint Conference '3D Remote Sensing in Forestry', Vienna, 14-15 February pp. 1–6.
- Cluzeau C., Dupouey J.L., Courbaud B., 1995. Polyhedral representation of crown shape. A geometric tool for growth modeling. *Annals of Forest Science* 52 (4) s. 297–306.
- Fritsch D., Kada M., 2004. Visualisation Using Game Engines. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. XXXV, b5, pp. 621–625.
- Goodman J. E., O'Rourke J. (ed.), 2004. Handbook of discrete and computational geometry. Chapman & Hall/CRC, p 1539.
- Janowski A., Sawicki P., Szulwic J., 2004. Wizualizacja 3D w standardzie OpenGL obiektu architektonicznego na podstawie danych fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 14, s. 271–278.
- Mokwa M., Tymków P., Wężyk P., 2009. Identification of flow resistance coefficients in floodplain forests, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXI No. 1, pp. 39–50.
- Pfeifer, N., Winterhalder, D., 2004. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, Vol. 36, Part 8/W2, pp. 76–81.
- Thies M., Spiecker H., 2004. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI- 8/W2. pp.192–197.
- Tymków P., Borkowski A. 2010. Vegetation modelling based on TLS data for roughness coefficient estimation in river valley. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. XXXVIII No. 8, pp. 309–313.
- Wężyk P., Sroga R., Szwed P., Szostak M., Tompalski P., Kozioł K., 2009. *Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w określaniu wybranych cech drzew i drzewostanów*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. ISBN 978-83-61-576-09-9. 19, 447–457.

3D GEOMETRY RECONSTRUCTION OF SINGLE SHRUB USING TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA

KEY WORDS: 3D modeling, laser scanning, vegetation modeling, close range, TLS

SUMMARY: GIS applications requires detailed 3D models of land cover objects. Trees and shrubs, next to the building, constitute the main type of them. Terrestrial laser scanning (TLS) allows to determine precisely not only the external shape of the plant, but the geometry of individual branches as well. A method of macro- and micro-structure estimation of a single shrub is presented in this work. In the research data from several shrubs were used. In the macro-structural approach, where the plant is considered as a compact solid, it is important to choose those measurement points which represent the surfaces of the plant. To achieve better matching to the non-convex parts of the hull, the use of a multi-stage solid generation procedure in which points are divided into segments with common edges was proposed. This method assumes that the plant is divided along the Z axis into segments of a given width. Points from one segment are projected onto the division plane and 2D convex hull is generated for all the points. Finally, selected points (again in 3D space) are used to generate 3D convex hull. In order to define the geometry of vegetation the micro-structure procedure is supplemented by the segmentation algorithm to split points into groups, which form one branch. To verify the accuracy, the total surface area and the total shrub volume of branches calculated for individual variants were compared with the total surface area and volume derived from the direct measurements. Additionally, a few shrubs was measured and the qualitative analysis was performed.

dr inż. Przemysław Tymków
e-mail: przemyslaw.tymkow@igig.up.wroc.pl
telefon: 71 320 1953

dr hab. inż. Andrzej Borkowski
e-mail: andrzej.borkowskia@igig.up.wroc.pl
telefon: 71 320 5609
fax: 71 3205617