

OPRACOWANIE NUMERYCZNEGO MODELU TERENU Z WYKORZYSTANIEM DANYCH LIDAR NA POTRZEBY STUDIÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH-LOUISIANA, USA

© Tukaj R., 2005

The article describes technological aspects of creating Digital Terrain Model from LiDAR data for the needs of US flood protecting agencies based on the order compiled by Tukaj Mapping Central Europe in Krakow, Poland. A brief characterising of the LiDAR technology was made, and described some production aspects of the LiDAR data processing. Examples of obtained accuracies were given.

Wprowadzenie. W ostatnich latach, wykorzystanie technologii lotniczego skaningu laserowego LiDAR staje się coraz bardziej popularną metodą pozyskiwania danych przestrzennych. Wydaje się, że technologia ta po kilku latach wstępnych badań i studiów nad możliwościami jej wykorzystania, uzyskiwanymi dokładnościami, opracowywaniem standardów i procedur, weszła już w fazę pełnego zastosowania w tych dziedzinach gdzie samodzielnie bądź zintegrowana z innymi technologiami może stanowić bardzo wydajne, ekonomiczne i dokładne narzędzie pozyskiwania danych o terenie.

Technologia LIDAR łączy w sobie trzy inne:

- Pomiar długości z wykorzystaniem dalmierza laserowego.
- Inercyjny system nawigacyjny.
- Globalny system pozycjonowania.

W efekcie pomiaru uzyskujemy dane w formie gęstej siatki punktów o współrzędnych X, Y, Z i odpowiednio zaplanowanym interwale, będące wynikiem odbicia wiązki promienia lasera od terenu i elementów, które na nim się znajdują. Istnieją systemy rejestrujące kilka odbić tej samej wiązki (obecnie max.5) oraz natężenie energii odbitej wiązki powracającej do sensora (tzw. intensity).

Celem tego artykułu nie jest przedstawienie wszystkich aspektów technologicznych ani teoretycznych podstaw działania lotniczego skanera laserowego LiDAR. Właściwym będzie tu jednak wspomnieć o podstawowych jego zastosowaniach, szczególnie o tych, w których LiDAR przewyższa inne technologie:

Leśnictwo – wiązka promienia lasera dobrze penetruje nawet gęstą szatę roślinną, dzięki czemu dokładniej można przedstawić teren.

- Opracowanie Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (DSM-Digital Surface Model) oraz tzw. modeli miast 3d, szczególnie użytecznych w branży telekomunikacyjnej, lotniczej, urbanistycznej.
- Opracowanie modeli linii energetycznych, rurociągów itp.
- Opracowanie Numerycznych Modeli Terenu (DTM – Digital Terrain Model) na obszarach o częstych zmianach topografii np. inżynieria brzegowa, plaże, wydmy, oraz dla potrzeb wszelkich służb monitorujących i przeciwdziałających katastrofom naturalnym (powodzie, osuwanie gruntu itp.)

Problematyka tworzenia Numerycznych Modeli Terenu z wykorzystaniem danych LiDAR, na potrzeby studiów przeciwpowodziowych omówiona zostanie na przykładzie doświadczeń w tej dziedzinie zdobytych przez firmę Tukaj Mapping Central Europe w Krakowie.

W roku 2001 firma Tukaj Mapping Central Europe weszła w skład konsorcjum, którego zadaniem było opracowanie Numerycznego Modelu Terenu oraz produktów pochodnych, na potrzeby studiów i analiz przeciwpowodziowych na obszarze stanu Louisiana, USA. Ukształtowanie terenu, duża ilość obszarów bagiennych, tereny położone poniżej poziomu morza (np. Nowy Orlean) jak i ogólne warunki meteorologiczne w tym silne i częste huragany (np. zeszłoroczny Ivan, który spowodował ewakuację Nowego Orleanu) składają się na częste zagrożenia powodzią, szczególnie na obszarze południowej części stanu. Stąd potrzeba posiadania przez odpowiednie służby dokładnego Numerycznego Modelu Terenu jak i szybka oraz częsta jego aktualizacja na dużych obszarach. Wykorzystanie technologii LiDAR daje tu najlepsze rezultaty.

Opracowanie projektu. Opracowanie projektu opiera się na wytycznych zawartych przede wszystkim w dokumencie:

1) *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners- Federal Emergency Monitoring Agency (FEMA) 2002.*

a także, przyjętym w maju 2004 przez American Society for Photogrammetry and Remote Sensing :

2) *ASPRS Guidelines – Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data – v.1.0- ASPRS2004*

Specyfikacja projektu obejmuje:

- Pozyskanie danych LiDAR dla obszaru objętego projektem
- Opracowanie NMT w oparciu o punkty terenu (tzw. bare earth) oraz linie nieciągłości: lądowe i wodne. ($RMSE$ (Root Mean Square Error- błąd średni kwadratowy) (Z) < 0.20m)
- Generowanie warstw o cięciu 2ft.
- Konwersja produktów finalnych do formatów zleconych przez zamawiającego.

Powierzchnię stanu podzielono projekty (task orders), które opracowywane są w kolejności żądanej przez zamawiającego. Do chwili obecnej opracowano obszar o powierzchni 63.5 tys²

Aby zapewnić odpowiednią dokładność i należyłą gęstość siatki punktów pomiaru, nalotów dokonuje się z wykorzystaniem lotniczego skanera laserowego firmy Leica ALS 40 z częstotliwością skanowania 29.2 kHz, przy wysokości lotu 2439 m, prędkości samolotu 64.31m/s, kącie skanowania 40°. W rezultacie uzyskuje się pas skanowania o szerokości 1775.45 m i odległości między punktami ok.1.5 m. Po integracji danych dalmierza laserowego z danymi GPS i INS oraz wyrównaniu danych pomiędzy pasami przystąpiono do procesu filtracji. Proces ten jest niezbędnym i zasadniczym elementem wyodrębnienia punktów terenu wykorzystywanych do budowy NMT z tzw. "chmury punktów" (rys. 1), która zawiera wszystkie punkty pomiaru, czyli również te, które terenu nie definiują (np. roślinność, budynki i budowle, linie energetyczne itp.), a z uwagi na specyfikę projektu nie wnoszą żadnych wymaganych informacji.

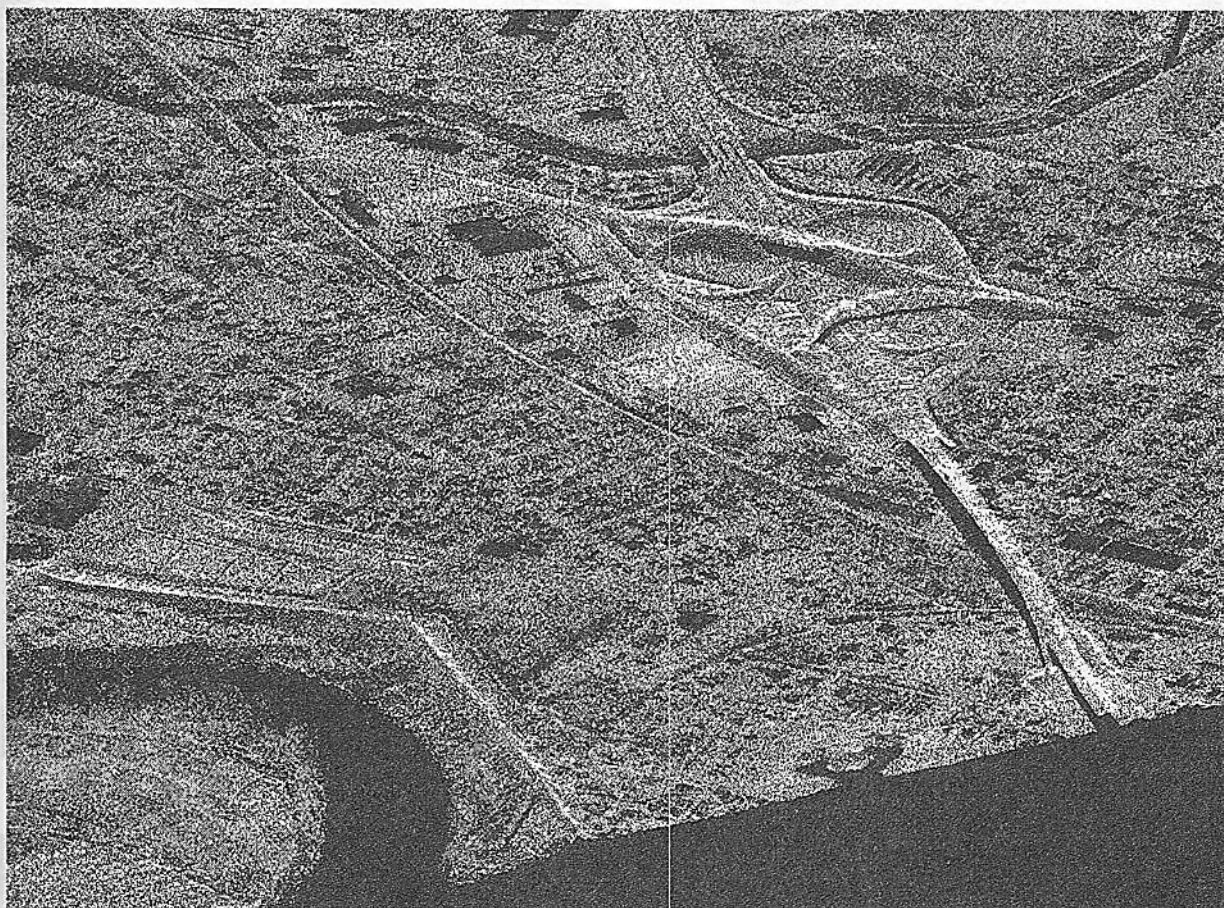
Można powiedzieć, że proces ten składa się z dwóch etapów:

- Automatyczna filtracja
- Edycja danych

W automatycznej filtracji danych wykorzystuje się oprogramowanie, które stosując odpowiednie algorytmy filtracji "oczyszcza" dane z punktów, które nie definiują terenu.

Może być ono wykonywane na wielu sekcjach jednocześnie, a odpowiednie procesy mogą być uruchamiane w "trybie wsadowym"(batch). Algorytmy te wykorzystują szereg parametrów, które uwzględniają charakter "filtrowanego" obszaru. Dotyczą one zarówno rzeźby opracowywanego terenu jak i obiektów na nim występujących. Przykładami parametrów uwzględniającymi rzeźbę terenu na podstawie, których dany punkt jest klasyfikowany do określonej klasy punktów mogą być np. zakładany kąt nachylenia powierzchni terenu, odległość i kąt do powierzchni terenu od wybranego punktu do punktu badanego, dopuszczalna głębokość punktu w stosunku do punktów otaczających badany punkt w określonym promieniu itp. Przykładem zaś parametrów uwzględniających charakterystykę obiektów znajdujących się na danym terenie może być zakładana wielkość obrysu budynków. Jest rzeczą

zrozumiały, iż nie sposób jednak tak dobrać w/w parametry by program właściwie zinterpretował i przeklasyfikował wszystkie elementy na dużym obszarze.



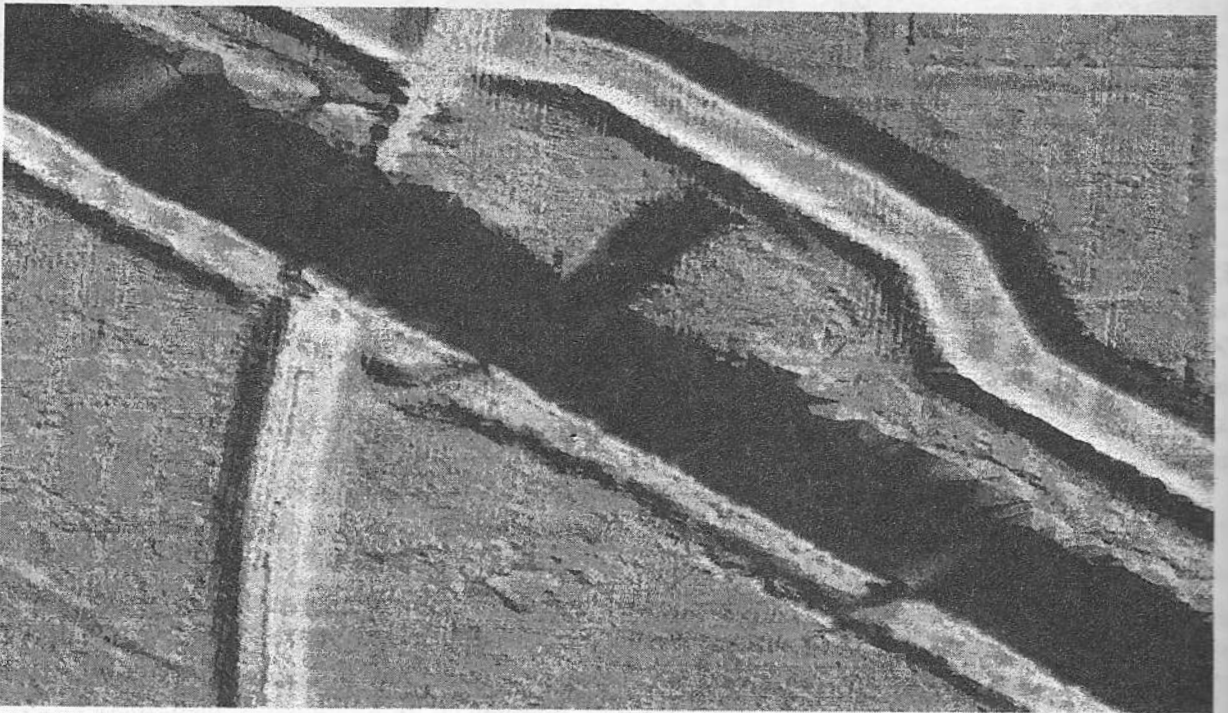
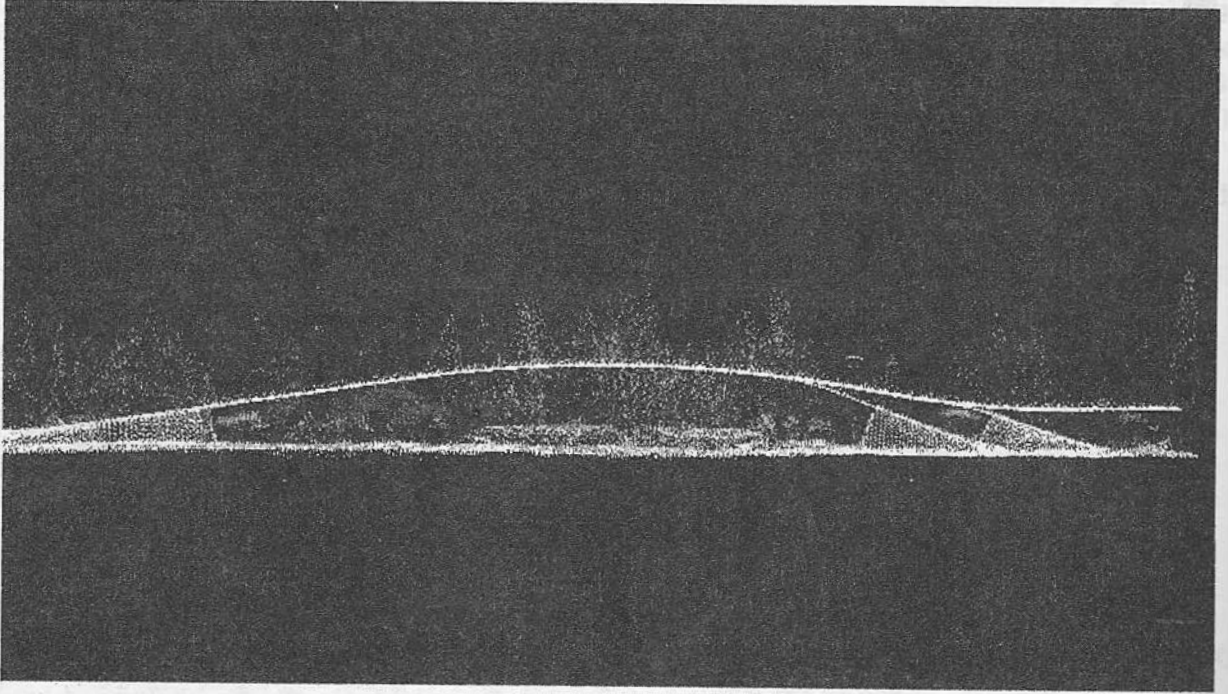
Rys. 1. "Chmura" punktów z pomiaru LiDAR po procesie filtracji.
Widoczny podział punktów na odpowiednie klasy

Ocenia się, że proces automatycznej filtracji dokonuje właściwej klasyfikacji na poziomie ok. 90 %. Pozostałe 10 % wymaga ingerencji operatora i nazywane jest często "edycją danych". Okazuje się, że wspomniane wyżej 10 % dla których wymagana jest na danej sekcji ingerencja operatora może zająć nawet 90 % czasu przeznaczonego na cały proces obróbki danych, czyli tzw. postprocessing. Dlatego bardzo istotne jest właściwe porozumienie i ustalenie między zamawiającym a opracowującym stopnia przy którym dana sekcja posiada akceptowalną jakość, gdyż ma to ogromny wpływ na czas, a co za tym idzie również i koszt opracowania.

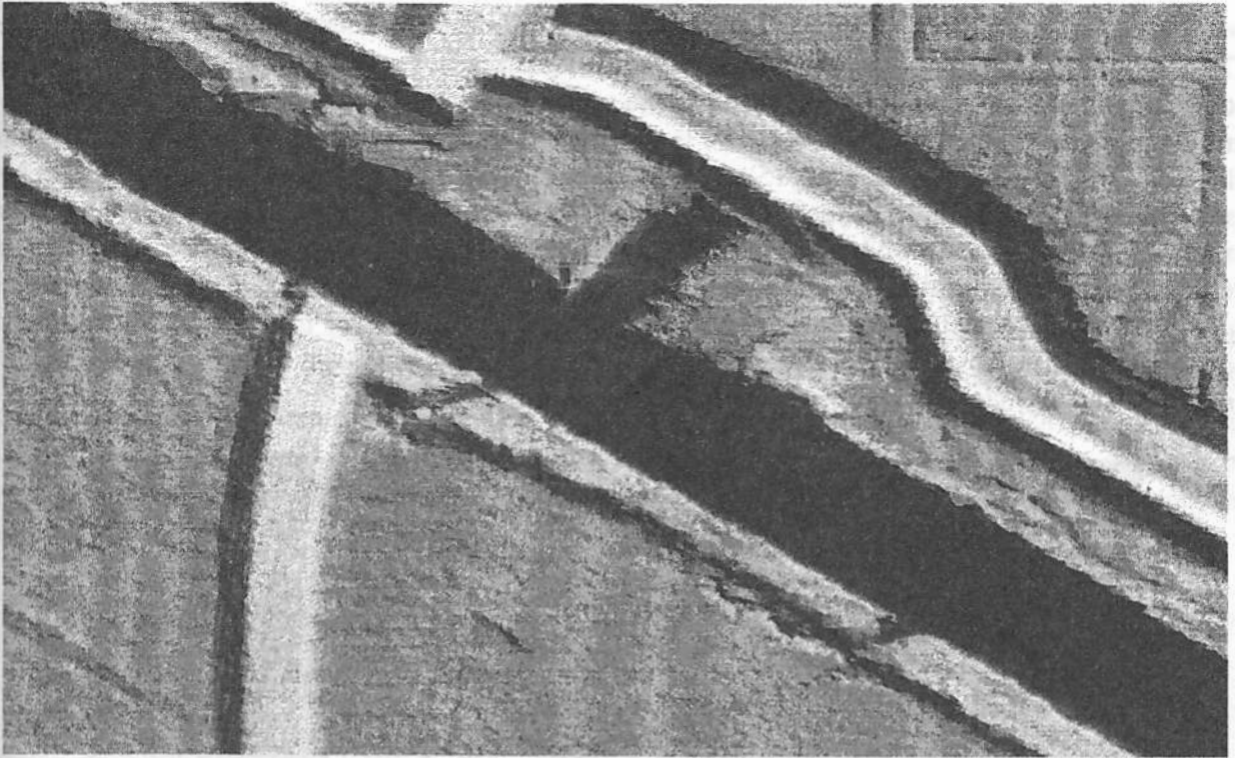
Drugi etap "Edycja danych" polega więc na przeglądnięciu całej sekcji i właściwym przeklasyfikowaniu punktów w miejscach gdzie automatyczna filtracja punktów nie przyniosła właściwych rezultatów. W tym celu stosuje się odpowiednie parametry filtracji podobne jak wcześniej z tym, że ich działanie ogranicza się do niewielkich obszarów wymagających poprawy. Mogą to być np. pozostawione elementy roślinności, budynków, mostów, wiaduktów, usunięte niewłaściwie wały, fragmenty skarp, "wbite punkty" itp. Istotnych informacji na temat sprawdzanego obiektu daje przedstawienie go w innej perspektywie, w przekroju, a także korzystanie z dostępnych ortofotomap i map topograficznych. Niezwykle pomocnym w wizualizacji jest przede wszystkim generowanie modeli terenu TIN (Triangulated Irregular Network). W oparciu o same tylko dane LiDAR na etapie edycji opracowuje się również linie nieciągłości (breaklines): "lądowe" i "wodne". "Lądowe" stosuje się w przypadku gdy np. z uwagi na brak punktów wynikający z zasłonięcia korona drogi biegnącej pod mostem lub wiaduktem lub fragment wału

nie jest właściwie zdefiniowany. Stosuje się je również dla lepszego zdefiniowania rzeźby terenu w miejscach skąd usunięte zostały budynki i obiekty.

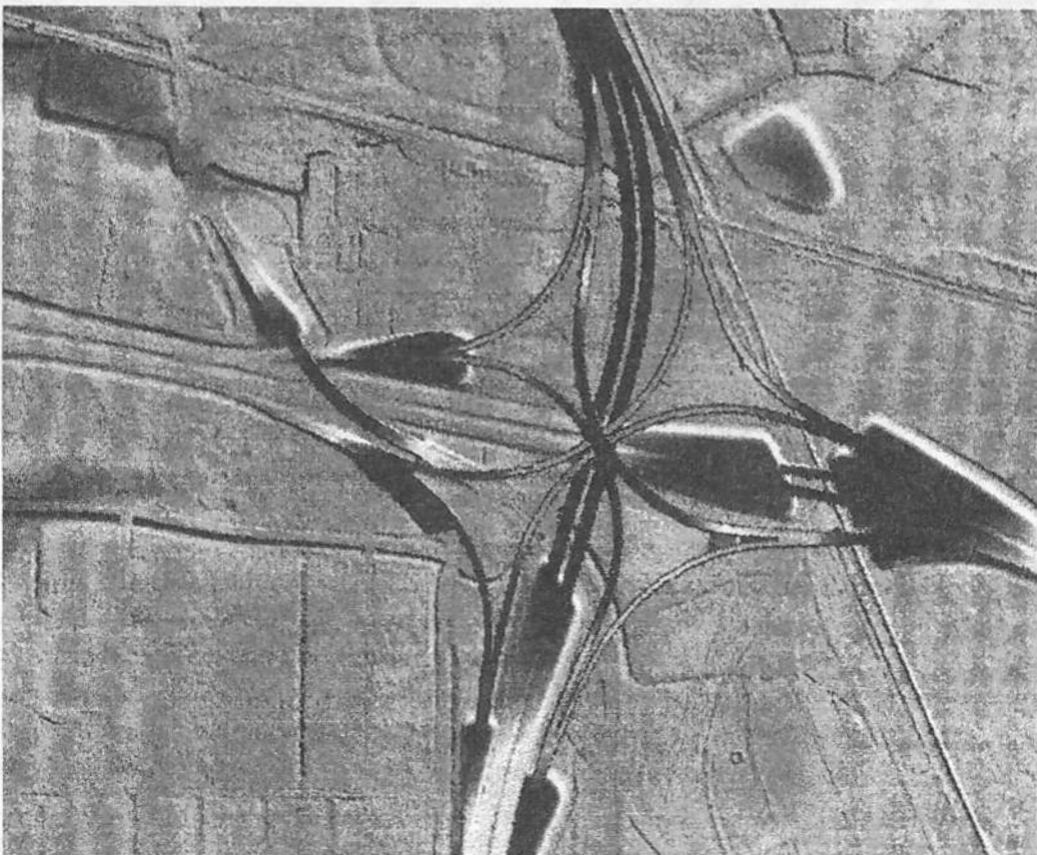
Rys. 2. Przekrój poprzeczny. Zbiór punktów LiDAR



Rys. 3. Fragment modelu TIN utworzony z danych po procesie automatycznej filtracji. Widoczne nieusunięte fragmenty mostu, zaburzenia spowodowane punktami na powierzchni wód oraz niedokładną filtracją punktów terenu



Rys. 4. Fragment modelu TIN utworzony dla tego samego obszaru jak na 3A z danych po etapie edycji



Rys. 5. Fragment modelu TIN utworzony z danych po procesie automatycznej filtracji. Przedstawia skrzyżowanie gdzie wiadukty zastępują korony dróg znajdujących się pod nimi uniemożliwiając ich pomiar

Istnieje wiele technik tworzenia linii nieciągłości z danych LiDAR jak np. Wykorzystanie modeli TIN i tworzenie przecięc odpowiednich powierzchni, digitalizacja z ortofotomapy, a następnie nadanie odpowiedniej wysokości itp. Jak wyżej wspomniano opracowanie projektu obejmowało również tworzenie linii nieciągłości "wodnych". Opracowywano je dla jezior i stawów o powierzchni większej od 2700 m², dla rzek o szerokości większej od 15 m (dwoma brzegami) oraz dla bardziej znaczących cieków zaznaczonych na istniejących mapach topograficznych. Z uwagi na fakt, iż promień lasera nie odbija się całkowicie od powierzchni wód, oraz na to iż dane LiDAR, uzyskiwane są w formie siatki o określonej gęstości, bez pomocy ortofotomapy trudno byłoby dokładnie zdefiniować granice jezior i rzek. Należało więc wykorzystać istniejące ortofotomapy i wyświetlić na ich podkładzie punkty LiDAR nadając im odpowiednią paletę kolorów w zależności od ich wysokości. W ten sposób można dokładnie określić granice obiektów wodnych.



Rys. 6. Punkty LiDAR na podkładzie ortofotomapy umożliwiające dokładną digitalizację powierzchni wód

Trzeba pamiętać o tym by nie digitalizować granic wód bezkrytycznie, wyłącznie na podstawie dostępnych ortofotomap przedstawiających obszary o dynamicznie zmieniającej się linii wód (bagna, mokradła). Dopiero wykorzystanie wspomnianych ortofotomap jako podkładu do aktualnych danych LiDAR, daje możliwość właściwej ich definicji. Po określeniu granic jezior i stawów należało nadać im odpowiednią wysokość w oparciu o dane LiDAR. W przypadku rzek i cieków należało nadać im również odpowiednie spadki. Do tego celu zastosowano odpowiednie specjalistyczne oprogramowanie dostępne na rynku jak i również stworzono własne narzędzia wspomagające. Po opracowaniu granic jeziora i rzek usunięto z nich punkty LiDAR.

Dane opracowane w procesie obejmującym dwa wspomniane wyżej etapy wykorzystano do stworzenia NMT w formie TIN. Modele te służą do kontroli dokładności danych i zgodnie ze specyfikacją zlecenia powinny spełniać warunek, iż $RMSE(z) < 0.20$ m.

Ocena dokładności dokonana była w sposób zalecany przez ASPRS w w/w dokumencie [2]. Dokument ten zaleca by kontrolę dokładności przeprowadzać oddzielnie dla różnych kategorii pokrycia terenu.

Zgodnie z zaleceniami wyodrębniono 5 podstawowych kategorii :

- CAT1 – Teren odkryty
- CAT2 – Wysokie trawy, uprawy rolne
- CAT3 – Krzaki
- CAT4 – Lasy
- CAT5 – Tereny miejskie

Na obszarach przyporządkowanych do poszczególnych kategorii pokrycia terenu wybiera się punkty kontrolne, które zostały niezależnie pomierzone techniką GPS. Punkty kontrolne powinny być rozmieszczone równomiernie. Mogą jednak być rozmieszczone gęściej w miejscach sąsiadujących z bardziej znaczącymi obiektami i rzadziej w miejscach mniej istotnych. Punkty kontrolne powinny być przyjęte na obszarach płaskich lub lekko i równomiernie nachylonych. Punkty kontrolne powinny być pomierzone z dokładnością trzykrotnie przekraczającą założoną dokładność produktu końcowego [2].

Następnie dla każdej kategorii pokrycia terenu obliczono RMSE (z).

W celu obliczenia RMSE(z) należy utworzyć model terenu TIN- o czym wspomniano już wcześniej i określić z niego wysokości punktów kontrolnych.

RMSE (z) oblicza się ze wzoru:

$$RMSE(z) = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_{ki})^2}{n}}$$

gdzie z_i – wysokość punktu kontrolnego (i) określona z modelu terenu TIN; z_{ki} – wysokość punktu kontrolnego (i); n – ilość mierzonych punktów kontrolnych.

Poniżej przedstawiono przykładowe dane dotyczące uzyskiwanych dokładności na obszarze jednego z projektów.

Louisiana Lidar Task Order 25				
Obliczenie RMSE (z)				
58 punktów kontrolnych				
	Pomiar GPS	Lidar		
Opis	Wysokość (ft) (Z)	Wysokość (ft) (Z)	Różnica	Różnica^2
CAT1	236.52	236.46	0.06	0.00
CAT1	244.28	244.21	0.08	0.01
CAT1	230.52	230.29	0.23	0.05
CAT1	224.25	223.96	0.29	0.08
CAT1	267.65	267.50	0.15	0.02
CAT1	246.63	246.37	0.26	0.07
CAT1	304.64	304.31	0.33	0.11
CAT1	303.92	303.78	0.14	0.02
CAT1	165.00	164.48	0.52	0.27
CAT1	165.78	165.12	0.66	0.44
CAT1	165.37	165.09	0.28	0.08
CAT1	165.41	165.09	0.32	0.10
CAT2	229.31	229.61	-0.30	0.09
CAT2	218.30	217.99	0.31	0.10
CAT2	211.95	211.71	0.24	0.06
CAT2	209.97	209.62	0.35	0.12

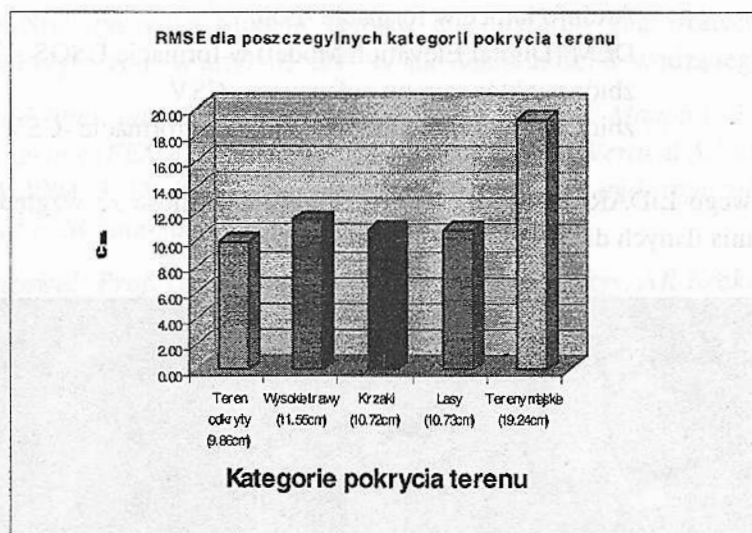
CAT2	200.63	200.23	0.40	0.16
CAT2	276.35	276.37	-0.02	0.00
CAT2	284.69	284.55	0.14	0.02
CAT2	281.70	281.38	0.32	0.10
CAT2	314.97	314.73	0.24	0.06
CAT2	164.77	164.05	0.72	0.52
CAT2	168.11	168.03	0.08	0.01
CAT2	164.58	163.86	0.72	0.52
CAT2	160.98	160.64	0.34	0.11
CAT3	239.29	238.81	0.48	0.23
CAT3	212.26	212.05	0.21	0.04
CAT3	220.14	219.97	0.17	0.03
CAT3	284.19	283.70	0.49	0.24
CAT3	286.50	286.32	0.18	0.03
CAT3	248.45	248.62	-0.17	0.03
CAT3	323.08	322.78	0.30	0.09
CAT3	333.10	332.86	0.24	0.06
CAT3	167.29	166.72	0.57	0.32
CAT3	162.84	162.22	0.62	0.39
CAT3	159.78	159.68	0.10	0.01
CAT3	160.32	160.42	-0.10	0.01
CAT4	234.76	234.64	0.12	0.02
CAT4	210.17	210.08	0.09	0.01
CAT4	240.66	240.61	0.05	0.00
CAT4	227.86	227.86	0.00	0.00
CAT4	241.79	242.18	-0.39	0.15
CAT4	325.77	325.19	0.58	0.34
CAT4	300.34	300.06	0.28	0.08
CAT4	303.06	302.73	0.33	0.11
CAT4	166.49	165.97	0.52	0.27
CAT4	163.20	162.81	0.39	0.16
CAT4	163.37	162.80	0.57	0.32
CAT4	160.70	160.89	-0.19	0.04
CAT5	238.27	238.20	0.07	0.00
CAT5	223.09	222.84	0.25	0.06
CAT5	227.43	226.87	0.56	0.31
CAT5	252.69	252.40	0.29	0.08
CAT5	268.91	268.06	0.85	0.72
CAT5	292.18	291.89	0.29	0.09
CAT5	253.57	253.25	0.32	0.10
CAT5	165.06	164.29	0.77	0.59
CAT5	163.91	163.40	0.51	0.26

RMSE (ft) = 0,37

RMSE (cm)=11,54

Jak widać z tabeli obliczony RMSE (z) wynosi **11.54 cm** i **znacznie przekracza** wymaganą dokładność.

Obliczone dla poszczególnych kategorii terenu wielkości RMSE(z) przedstawia poniższa tabelka.



Dla przykładu poniżej podano uzyskane dokładności na innych projektach o podanej przeważającej charakterystyce terenu:

Nazwa Projektu: TASK ORDER 14
 Kategoria terenu: Obszary rolne
 Powierzchnia: 2478 km²
 Ilość punktów kontrolnych: 59
RMSE(z)= 9.61cm

Nazwa Projektu: TASK ORDER 11
 Kategoria terenu: Obszary zabagnione
 Powierzchnia: 2394 km²
 Ilość punktów kontrolnych: 63
RMSE(z)= 14.09cm

Nazwa Projektu: TASK ORDER 13
 Kategoria terenu: Lasy
 Powierzchnia: 4872 km²
 Ilość punktów kontrolnych: 161
RMSE(z)= 12.53cm

Ostatnim etapem opracowania jest uzyskanie tzw. produktów finalnych, a następnie ich konwersja do odpowiednich formatów. Elementem podstawowym z którego tworzone są produkty finalne jest opracowany i sprawdzony pod względem dokładności model terenu TIN.

Z modelu tego generuje się model GRID o interwale 5m. Z modelu GRID generowane są warstwy o cięciu 2ft.

Poniżej wyszczególniono wszystkie dostarczane do zamawiającego produkty finalne opracowane w układzie oraz ich formaty:

linie nieciągłości – format ArcInfo -GEN

(breaklines)

contours_arc

warstwy (2ft) w formacie ArcInfo -E00

contours_usgs_dlg

lattice

usgs_dem

edited points

raw points

Podsumowanie

warstwice (2ft) w formacie USGS -dlg

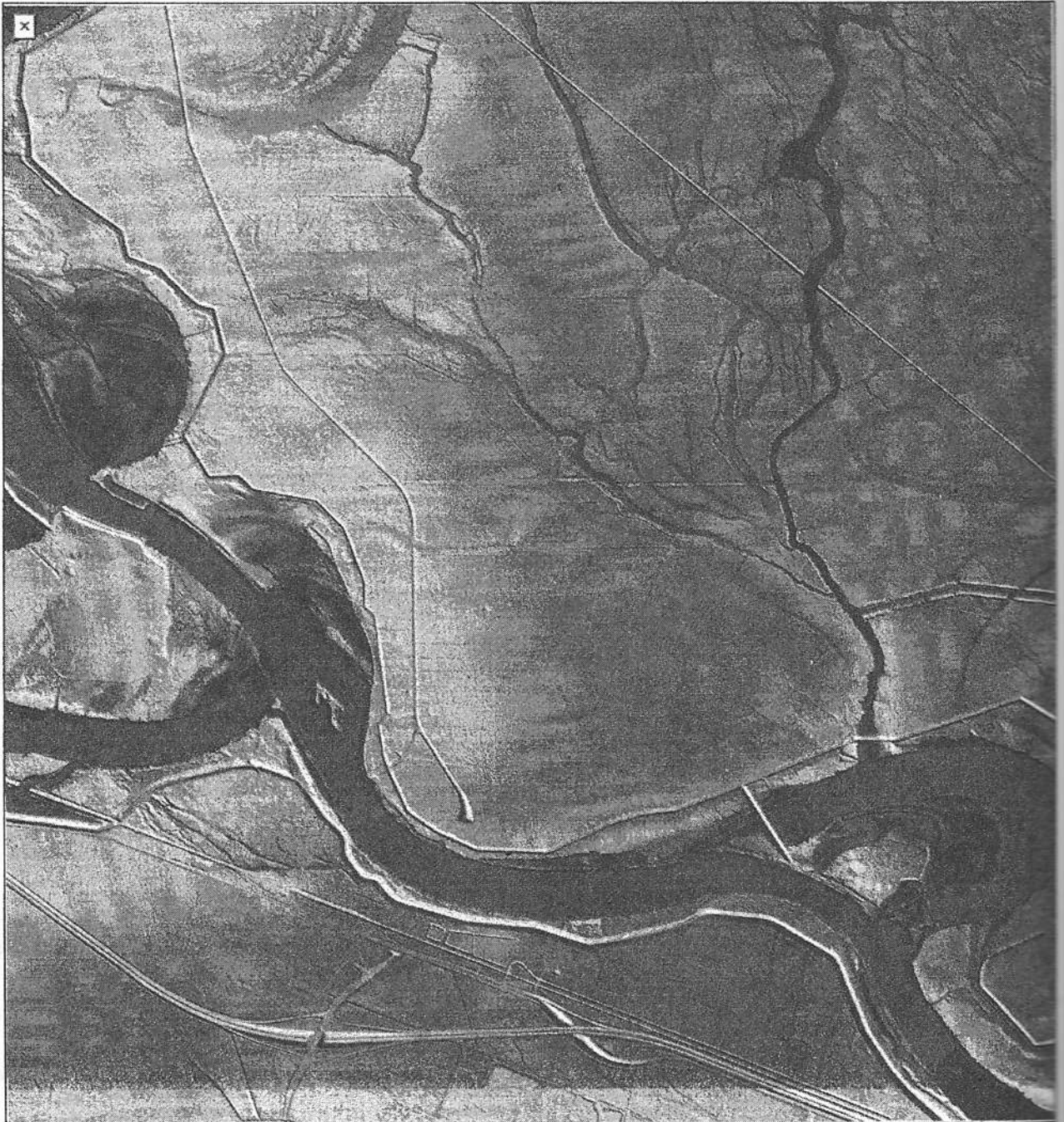
ArcInfo lattice w formacie -E00

DEM (Digital Elevation Model) w formacie USGS -DEM

zbiór punktów terenu w formacie -CSV

zbiór wszystkich punktów pomiaru w formacie -CSV

Metoda skaningu laserowego LiDAR zdobywa coraz większą popularność ze względu oferowane możliwości w zakresie pozyskania danych dla szeroko rozumianej branży GIS.



Rys. 5. Numeryczny Model Terenu opracowany z danych LiDAR. Dobrze widoczne waly przeciwpowodziowe wzdluz rzeki

Wśród możliwości tych wymienić należy przede wszystkim niski koszt, dokładność i szybkość opracowania Numerycznego Modelu Terenu dla obszarów zagrożonych katastrofami naturalnymi np. powodziami. Przytoczone w artykule uzyskiwane dokładności dowodzą tego w sposób jednoznaczny.

1. Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners – Federal Emergency Monitoring Agency (FEMA). – 2002. 2. ASPRS Guidelines – Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data – v.1.0- ASPRS2004. 3. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual- Editor: David F. Maune-2001.

Recenzował: Prof. Dr hab. inż. Oleksandr Dorozhynskyy, AR Kraków.