

LOTNICZY SKANING LASEROWY ZASTOSOWANIA PRAKTYCZNE

Andrzej Gola

Dyr. Zarządzający

EUROSYSTEM sp. Z o.o.

a.gola@eurosystem.com.pl

Tel. +48 501 317 651

PLAN PREZENTACJI

Krótki zarys technologii skaningu laserowego

Zastosowania praktyczne - przedstawione na przykładzie materiałów dostarczonych przez firmę **TopEye**

Proces przetwarzania danych laserowych - zaprezentowany na przykładzie aplikacji firmy **Terrasolid** działających w środowisku **MicroStation**

OPIS TECHNOLOGII SKANINGU LASEROWEGO

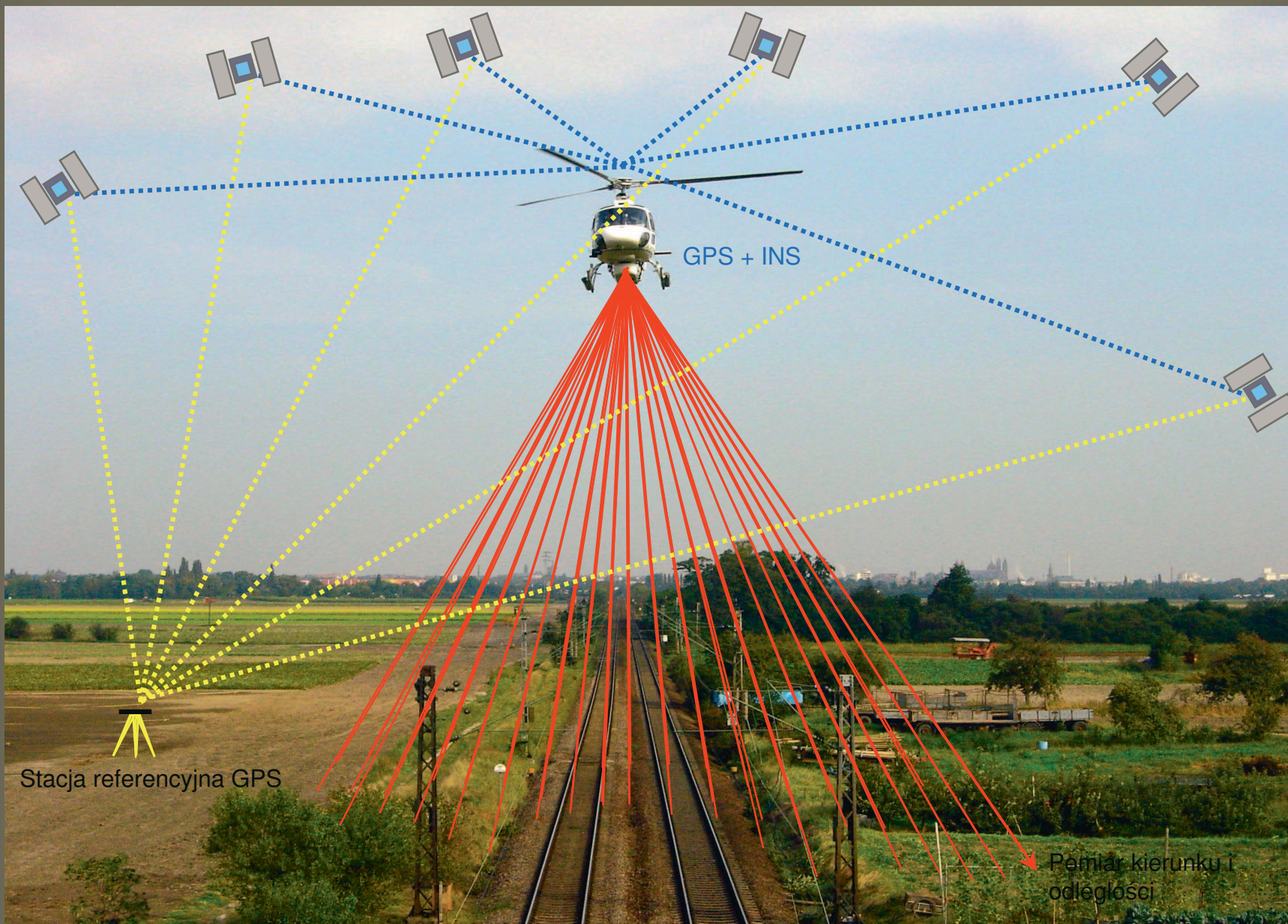
Zasada skaningu laserowego oparta jest na wyznaczeniu odległości od sensora do badanej powierzchni poprzez pomiar czasu pomiędzy wysłaniem a odbiorem pojedynczego impulsu laserowego. W celu określenia położenia i orientacji platformy wykorzystywany jest system pozycyjny i nawigacyjny oparty na Globalnym Systemie Pozycyjnym – GPS i Inercyjnym Systemie nawigacyjnym – INS.

Technologia może być stosowana dwojako :

- wysokiego pułapu lotniczego, na dużych obszarach,
- z pokładu śmigłowca, rejestrując jednorazowo mniejszy obszar lecz z większą dokładnością.

Impuls laserowy poprzez optyczny układ skanujący kierowany jest w płaszczyźnie poprzecznej do trajektorii lotu. W wyniku ruchu samolotu uzyskuje się w jednym przelocie obraz prostokątnego pasa terenu.

Połączenie danych pozyskanych z dalmierza laserowego oraz GPS i INS pozwala na wygenerowanie trójwymiarowej, gęstej chmury punktów o znanych współrzędnych terenowych – X,Y,Z.



GPS + INS

Stacja referencyjna GPS

Pomiar kierunku i odległości

SYSTEM LASEROWY

System laserowy można podzielić na segmenty:

- lotniczy (pokładowy),
- naziemny.

Segment lotniczy (pokładowy) zawiera:

- system nawigacyjny – INS,
- system pozycyjny – GPS,
- system pomiaru odległości:
 - nadajnik – dalmierz laserowy,
 - odbiornik rejestrujący dane,
- kamera video i/lub fotogrametryczna,
- system planowania i zarządzania lotem.

Dalmierz laserowy

Działa w zakresie bliskiej podczerwieni lub rzadziej w zakresie widzialnym. Najczęściej wykorzystywany jest laser działający impulsowo z wysoką częstotliwością, co pozwala na rejestrację kilku tysięcy punktów na sekundę.

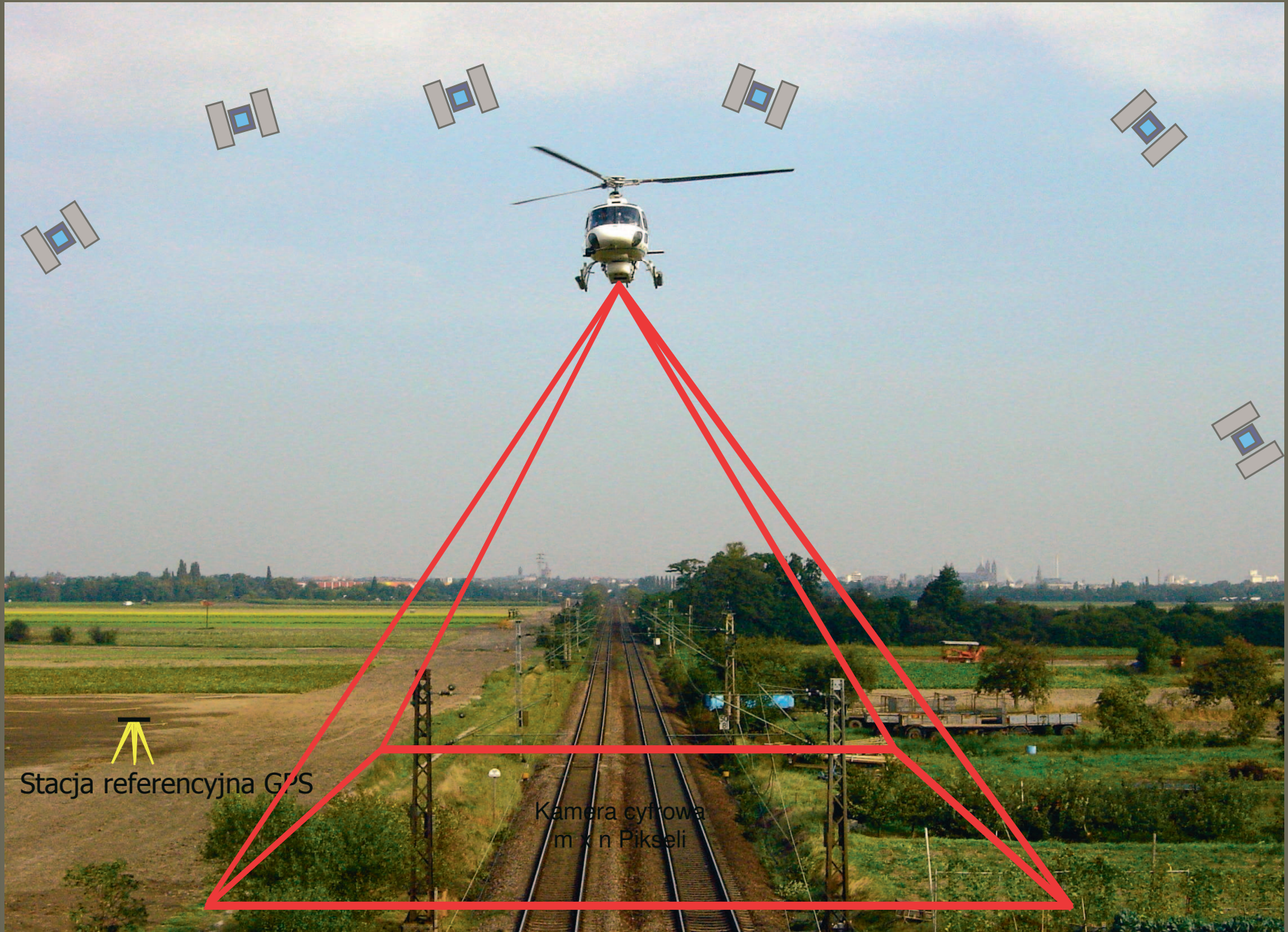
System nawigacyjny i pozycyjny oparty jest na integracji GPS z INS.

Trajektoria lotu samolotu wyznaczana jest poprzez system GPS, z wykorzystaniem pomiaru różnicowego. Inercjalny system nawigacyjny INS mierzy przyspieszenie wzdłuż trzech osi i zmiany kątowych pochyłeń platformy. Połączenie tych pomiarów pozwala wyznaczyć bardzo dokładnie trajektorię lotu samolotu i kąty pochylenia sensora laserowego.

Na **segment naziemny** składają się:

- naziemna referencyjna stacja GPS,
- stacja robocza do obróbki i przetwarzania danych.

Ze skanerem laserowym może współpracować kamera video i/lub kamera fotogrametryczna. Dla synchronizacji danych, każde zdjęcie i każda klatka zapisu video ma zarejestrowany numer i dokładny czas wykonania. Obrazy video są przydatne do interpretacji pokrycia terenu, natomiast zdjęcia lotnicze są wykorzystywane w procesie klasyfikacji danych pomiarowych i generowania ortofotomap.



Stacja referencyjna GPS

Kamera cyfrowa
m x n Pikseli

PRZYKŁADOWE ZDJĘCIE LOTNICZE WYKONANE PRZY MISJI SKANINGU LASEROWEGO Z WYSOKOŚCI 450 m

Szerokość pasa rejestracji = 330 m
Wielkość terenowa piksela = 11 cm

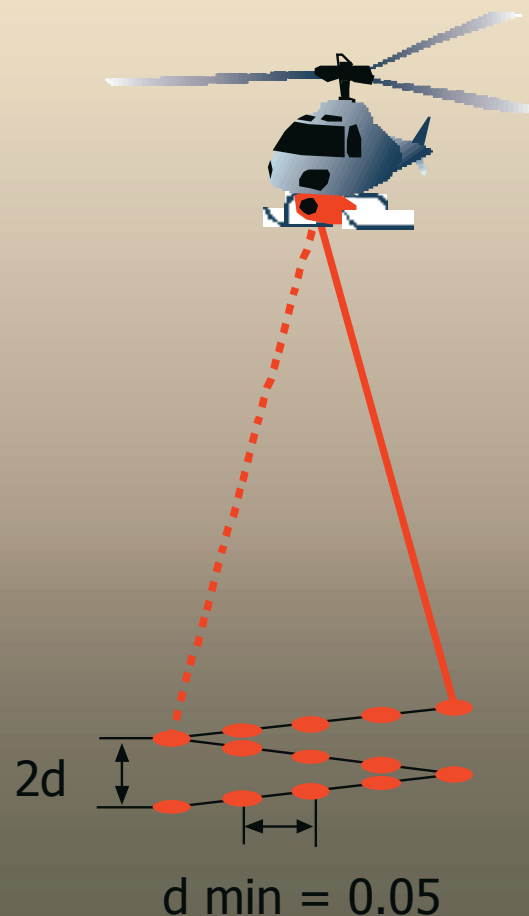


PODSTAWOWE PARAMETRY (na przykładzie systemu TopEye)

System rejestracji z pokładu śmigłowca idealnie nadaje się do rejestracji obiektów liniowych (autostrady, szlaki drogowe, kolejowe i wodne, rurociągi, kanały) dla których chcemy osiągnąć możliwie najwyższą dokładność.

Pułap lotu:
60 – 960 m

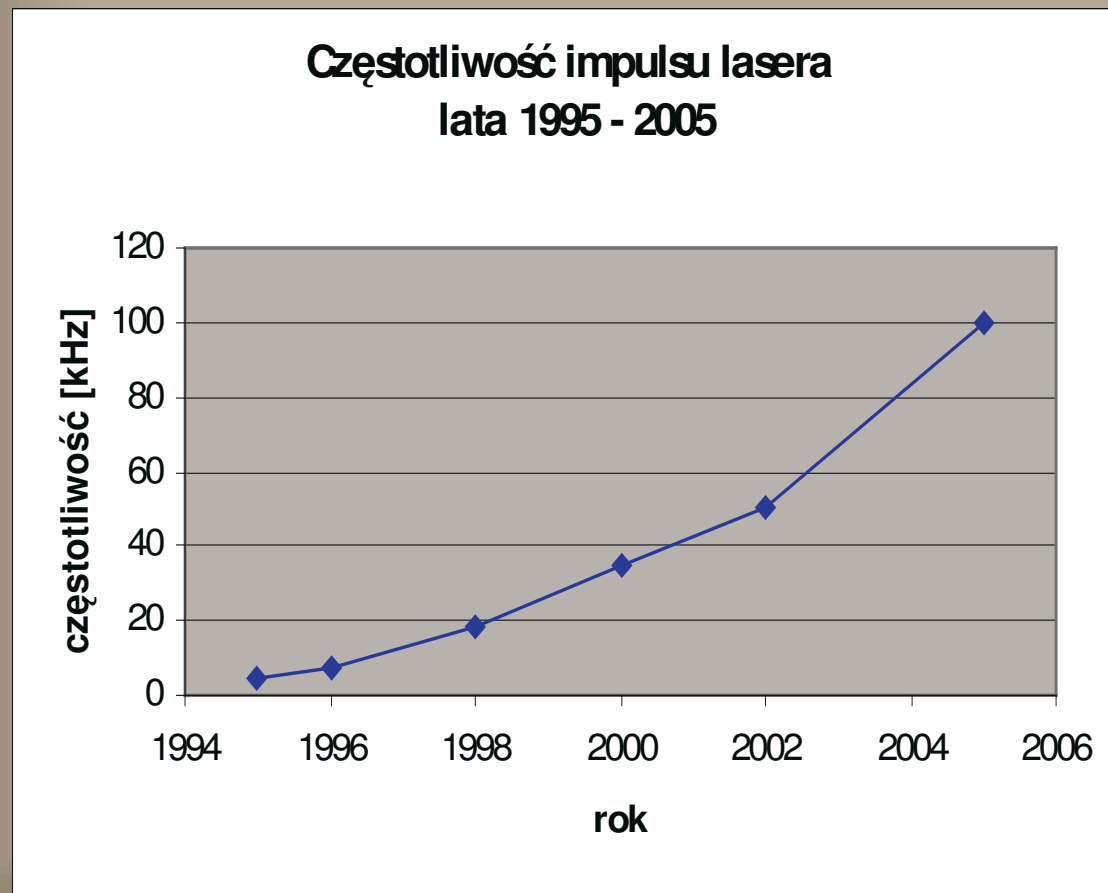
Szerokość pasa skanowania:
20 – 680 m



Prędkość lotu:
36 – 130 km/h

Średnica impulsu laserowego:
0.01 – 0.25 m

Częstotliwość impulsu lasera



Podczas zbierania danych Lidar, skaner rejestruje również informacje o **intensywności odbicia impulsów**. Taki zbiór danych tworzy obraz porównywalny z czarno – białą fotografią.

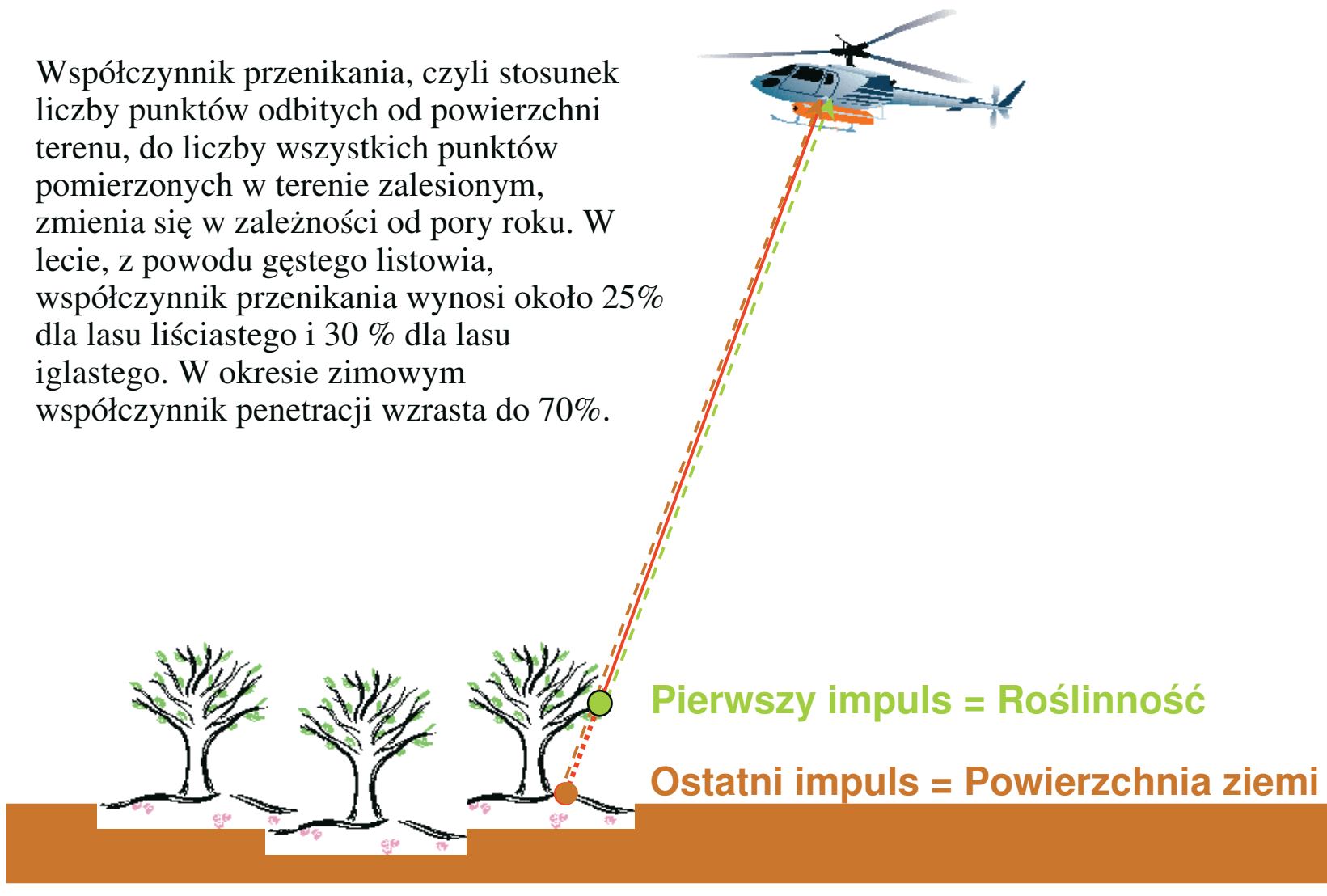


Impuls lasera ulega również rozproszeniu na powierzchni terenu.
Wielkość rozproszenia jest zależna od właściwości badanej powierzchni.
Zdolność odbicia wynosi:

- 10 – 20 % dla piasku
- 30 – 50 % dla roślinności
- 50 – 80 % dla śniegu i lodu

Bardzo ważną cechą technologii skaningu laserowego jest możliwość **rejestracji kilku odbić pojedynczego impulsu**. Zazwyczaj systemy laserowe posiadają zdolność rejestracji pierwszego i ostatniego odbicia, ale istnieją już komercyjne systemy rejestrujące do 7 odbić.

Współczynnik przenikania, czyli stosunek liczby punktów odbitych od powierzchni terenu, do liczby wszystkich punktów pomierzonych w terenie zalesionym, zmienia się w zależności od pory roku. W lecie, z powodu gęstego listowia, współczynnik przenikania wynosi około 25% dla lasu liściastego i 30 % dla lasu iglastego. W okresie zimowym współczynnik penetracji wzrasta do 70%.



DOKŁADNOŚĆ

Dokładność instrumentu laserowego: **2 – 3 cm**

Dokładność GPS (przy założeniu właściwych stacji naziemnych i poprawnym rozmieszczeniem satelitów) : **5 – 7 cm**

Dokładność INS – uzależniona od wysokości lotu

Ostateczna dokładność wysokościowa danych jest uzależniona od wielu czynników (wysokości lotu). Dla większości systemów nie spada ona poniżej:

± 15 cm

$W_{\text{lotu}} < 1200$ m

Można uzyskać lepsze dokładności zmniejszając wysokość lotu:

Ostatnio wykonany nalot: autostrada M-25 w Wielkiej Brytanii, wysokość lotu 100 m

$\pm 3,5$ cm

Ostateczna dokładność sytuacyjna: $1/1000 W_{\text{lotu}}$

GŁÓWNE ZASTOSOWANIA

- **TRÓJWYMIAROWE MODELOWANIE MIAST**
- **PROJEKTOWANIE PRZEBIEGU I MONITOROWANIE DRÓG**
- **PROJEKTOWANIE I OBSŁUGA LINII KOLEJOWYCH I OBIEKTÓW Z NIMI ZWIĄZANYCH**
- **ZARZĄDZANIE ZASOBAMI NATURALNYMI (LASAMI)**
- **MONITOROWANIE ZJAWISK GEOMORFOLOGICZNYCH**
- **STUDIA ZAGROŻEŃ POWODZIOWYCH**
- **MONITOROWANIE STREF PRZYBRZEŻNYCH**
- **MONITOROWANIE OBIEKTÓW WODNYCH (ZAPÓR, MOSTÓW)**
- **ANALIZY HAŁASU**
- **OKREŚLANIE ZASIĘGU ANTEN TELEKOMUNIKACYJNYCH**
- **REJESTRACJA LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA**
- **MONITOROWANIE OBIEKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH**

PRZYKŁAD EMPIRYCZNY

Trójwymiarowy model obszaru miasta

Instrument laserowy: TopEye Mark II – 7 000 Hz

Obszar Uniwersytetu Technicznego w Helsinkach – wrzesień 2002

Helikopter, wysokość lotu: 200 m

Gęstość punktów: 2-3 punkty/m²

Kamera cyfrowa: Hasselblad 3056x2032

Sesja pomiarowa (około 3 km²) zawiera 15 milionów punktów oraz około 3000 “surowych” obrazów cyfrowych.

Kilka faktów dotyczących finalnego produktu

Terenowa wielkość pixela ortofotomapy wynosi 5 cm.

Średnia dokładność wsp. XY ortofotomapy wynosi 7 cm

Średnia dokładność wsp. Z punktów lasera 7 cm

Dokładność XYZ wektorów krawędzi dachów budynków 10-20 cm

ETAPY REALIZACJI PROJEKTU



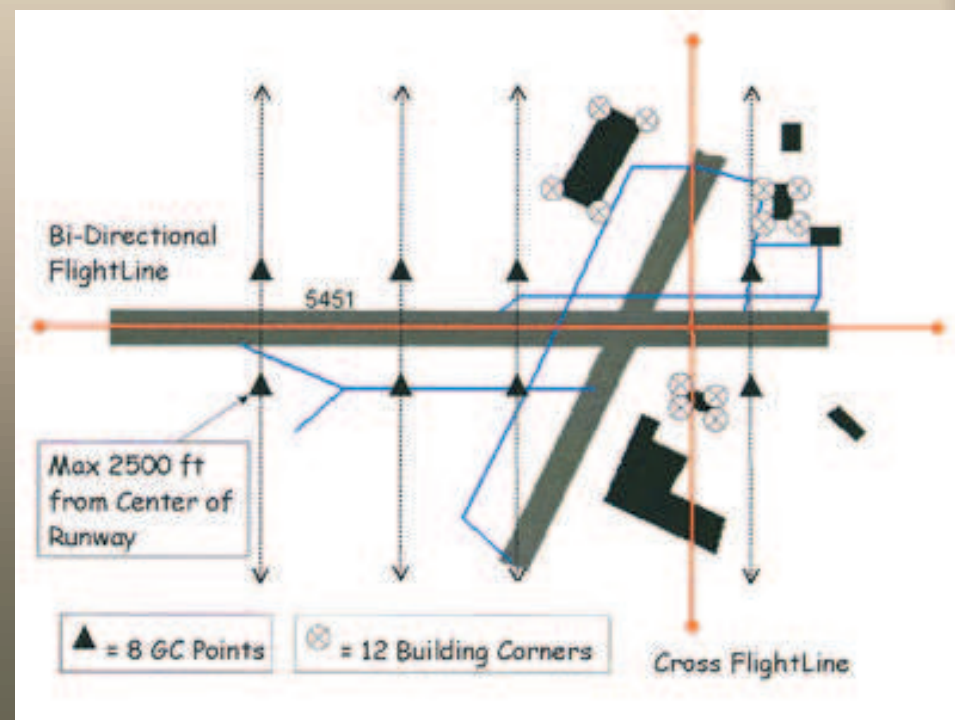
ETAPY REALIZACJI PROJEKTU

PLAN LOTU

Planowanie i realizacja misji skaningu laserowego jest zbliżona do projektu i wykonania nalotu fotogrametrycznego. W fazie przygotowań wykonuje się **kalibrację** instrumentów laserowych, GPS i INS.

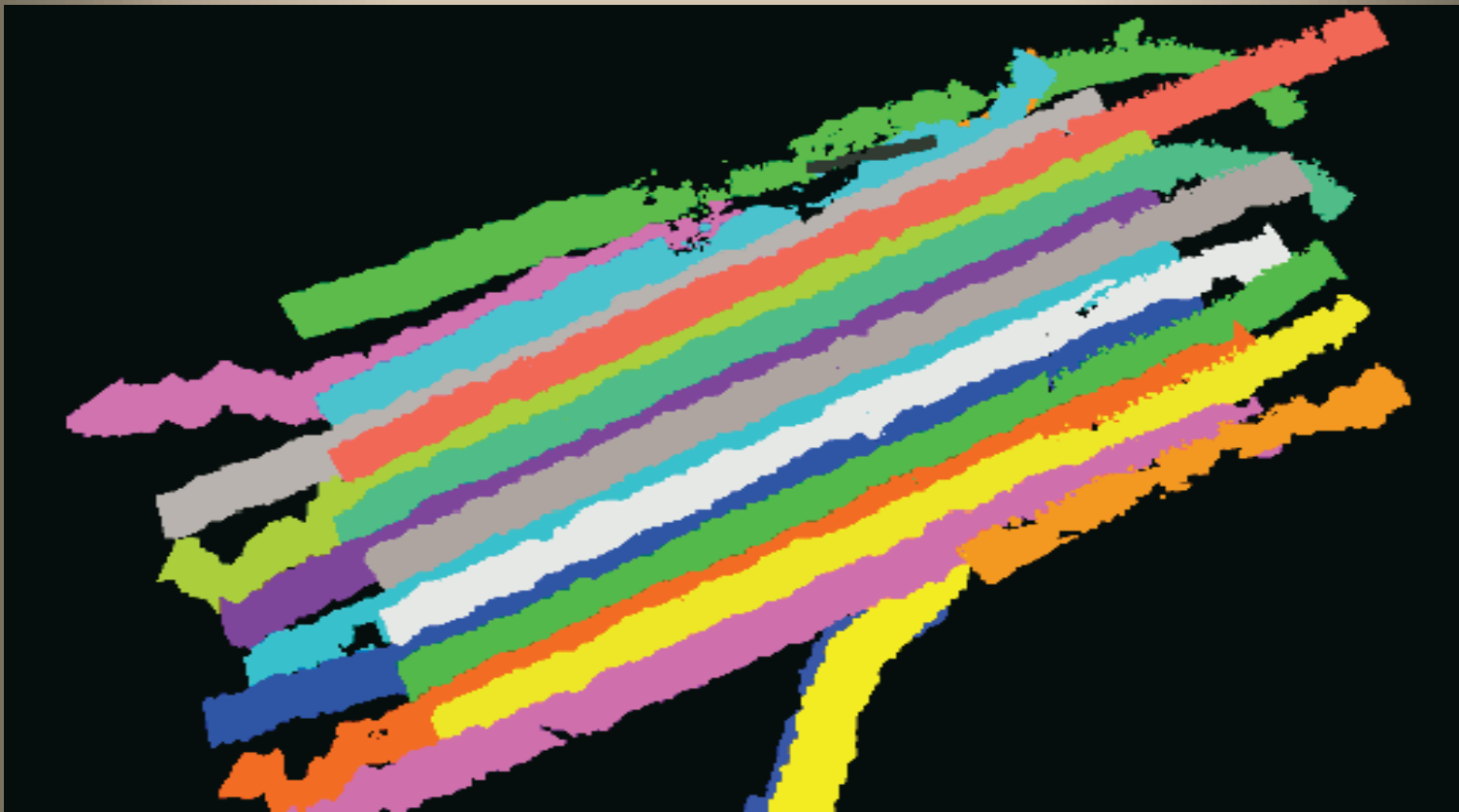
- przelot w dwóch przeciwnych kierunkach
- dodatkowy przelot w kierunku poprzecznym

Na powierzchni badanej, na punkcie lub punktach o znanych współrzędnych - **referencyjna stacja GPS**



Przykładowe pole kalibracji. Źródło: EarthData International

Jeżeli rejestrowany obiekt jest bardzo wydłużony (np. linia energetyczna, rurociąg, droga, rzeka), to pokrywa się o pojedynczym szeregiem. Obiekt powierzchniowy pokrywa się równoległymi szeregami z zachowaniem około 30% pokrycia między sąsiednimi obrazowanymi pasami terenu (odpowiednik pokrycia poprzecznego).



Liczba szeregów - 18

POZYSKANIE DANYCH

Dane pozyskiwane w trakcie misji skaningu laserowego to:

- dane ze stacji referencyjnych GPS,
- dane o parametrach lotu,
- dane o skanowanej powierzchni pozyskane ze skanera laserowego

Wzór danych pozyskanych ze skanera zależy od typu mechanizmu skanującego.

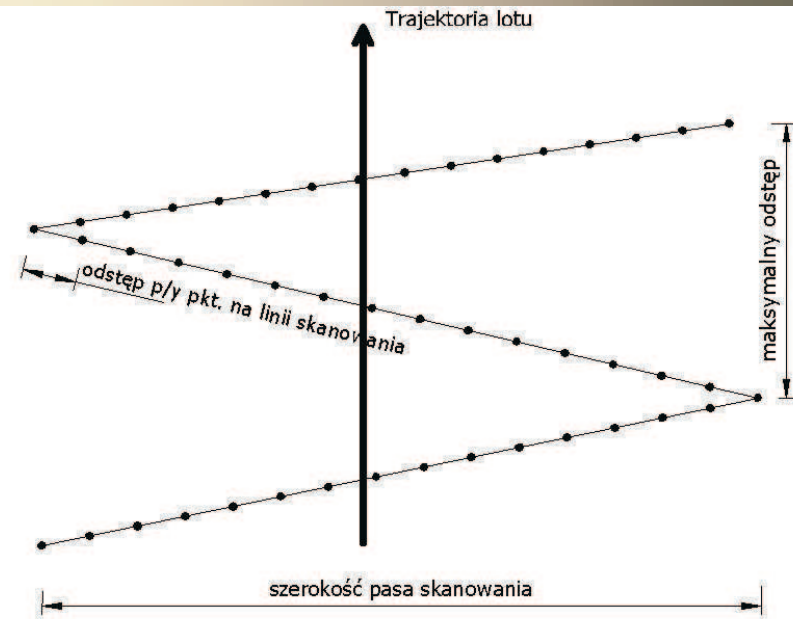
W zależności od wybranego mechanizmu zmienia się wzorzec skanowania na powierzchni ziemi.

Możliwe wzory to:

- zygzak,
- wzorzec równoległy,
- eliptyczny,
- sinusoidalny.

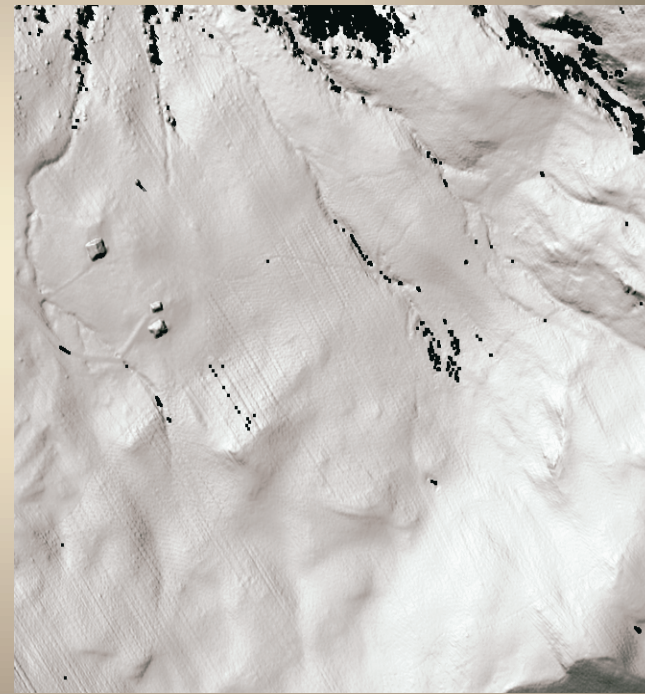
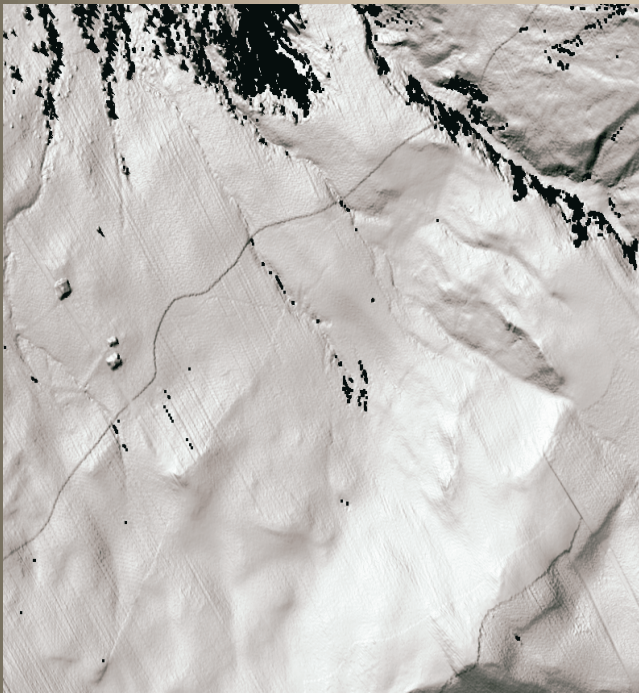
TopEye – lustro oscylujące – wzorzec zygzak

Z powodu przyśpieszenia lub zwalniania mechanizmu skanującego punkty znajdujące się na granicy pasma wykazują inną charakterystykę i są zazwyczaj usuwane ze zbioru danych pomiarowych.



PROCEDURA WYRÓWNIANIA

W związku z występowaniem błędów systematycznych, związanych głównie z GPS i INS stosuje się procedurę wyrównania danych.



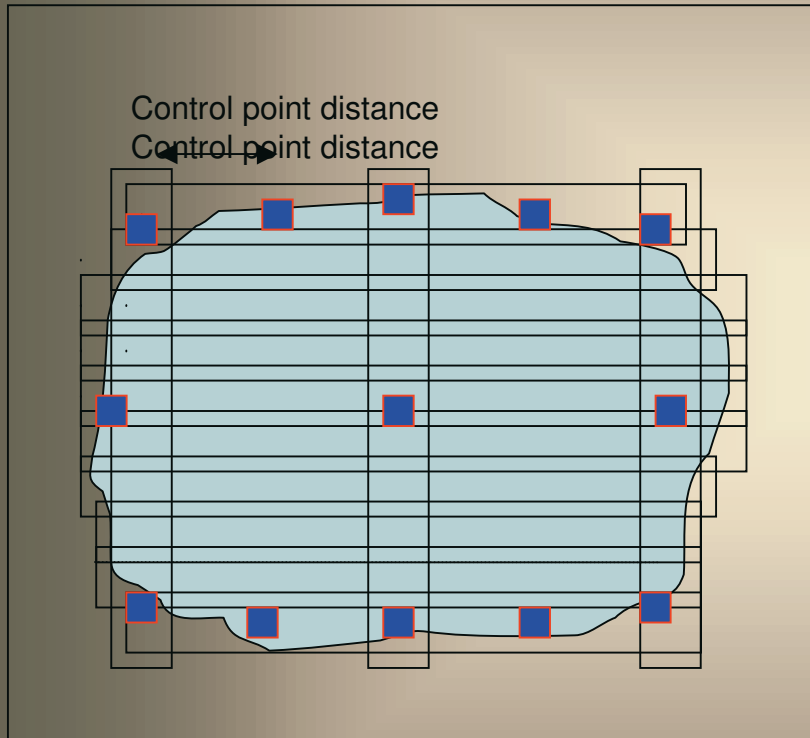
Przykładowe dane z sąsiadujących szeregów przed i po wyrównaniu (widoczny skok wysokościowy pomiędzy szeregami)

Procedura wyrównania polega na określeniu:

1. Punktów wiążących - odpowiadające sobie punkty w pasach wspólnego pokrycia szeregów, w związku ze sposobem skanowania dwa sąsiadujące szeregi nie będą zawierać identycznych punktów (interpolacja)

2. Punktów kontrolnych:

- wysokościowych:



- sytuacyjne:

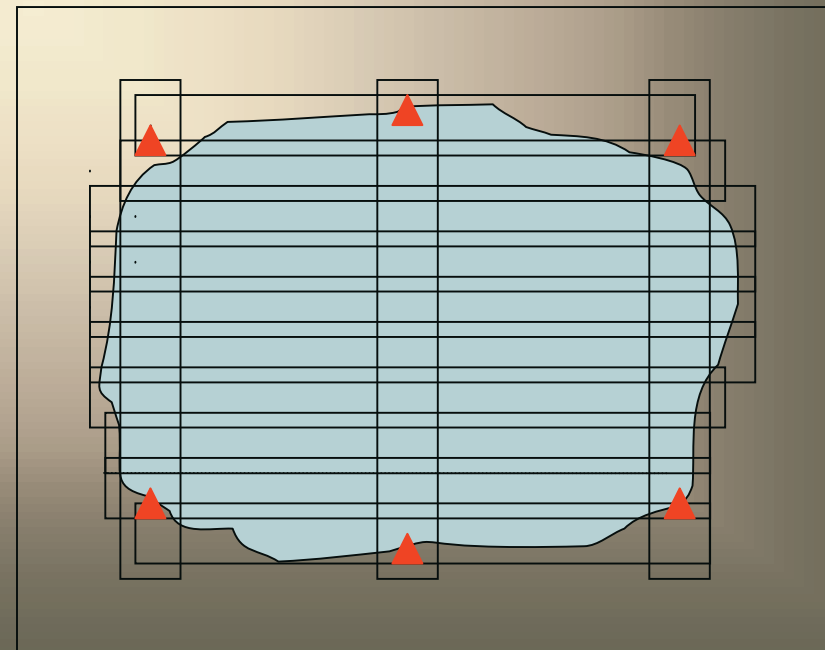
Dla poziomu A – 5 km

Dla poziomu B – 10 km

Odległość pomiędzy punktami kontrolnymi jest uzależniona od wymaganego poziomu dokładności

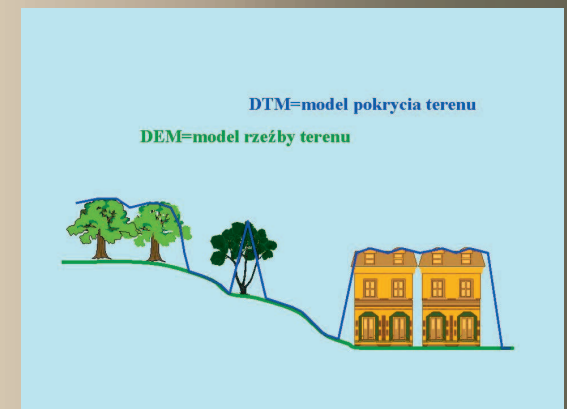
Dla poziomu A (< 10 cm) – 3 km

Dla poziomu B (< 20 cm) – 5 km



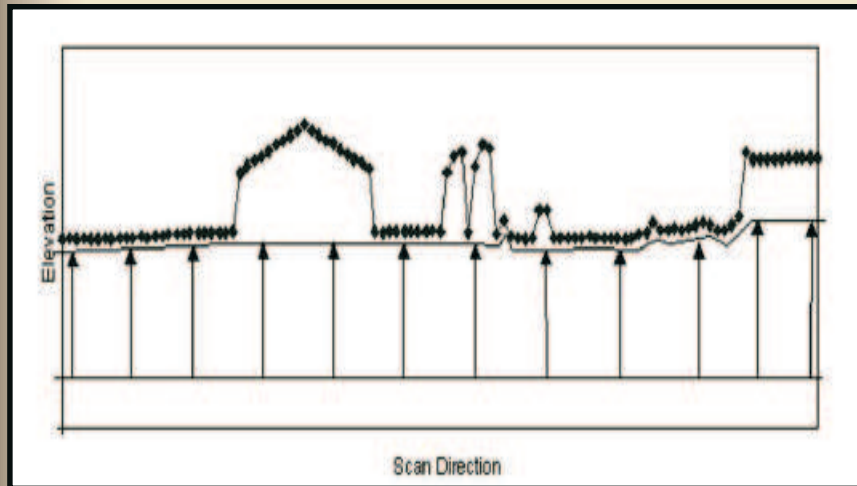
KLASYFIKOWANIE DANYCH – (FILTRACJA)

Pomiar laserowy dostarcza informacji w postaci trójwymiarowej „chmury punktów”, nieregularnie próbkowanych, zarówno o powierzchni topograficznej jak również o pokryciu badanego terenu (budynki, roślinność).



TerraSolid – moduł **TerraScan** – algorytm aktywnego modelu TIN

ALGORYTM AKTYWNEGO MODELU TIN

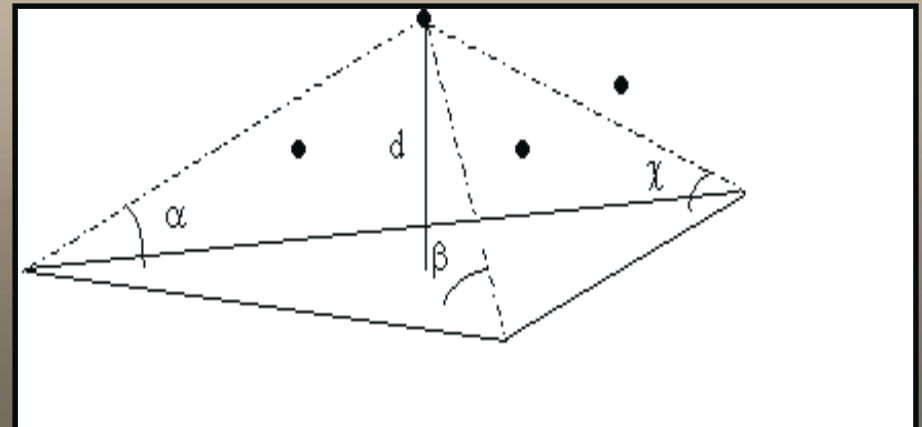


- Siatka prostokątna, rozmiar oczka jest określany przez parametry użytkownika.
- Wybór punktu najniższego dla każdego oczka jako punktu terenowego
- Triangulacja

odległość iteracyjna – odległość pomiędzy kandydatem na punkt terenowy a płaszczyzną trójkąta w danym kroku operacji

kąt iteracyjny – maksymalny kąt między kandydatem na punkt terenowy, rzutem tego punktu na płaszczyznę trójkąta i najbliższym wierzchołkiem trójkąta

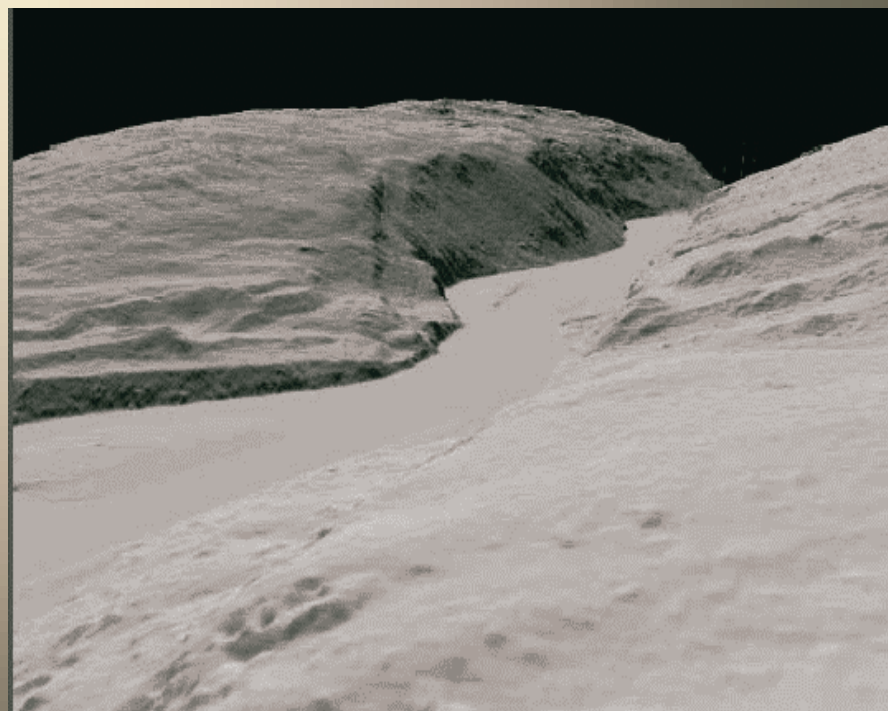
Parametry określające dopuszczalną odległość i kąt iteracyjny wyznaczane są w oparciu o medianę wartości, oszacowaną z histogramów różnic wysokości i kątów w powierzchni w danym kroku iteracyjnym.



Powierzchnia pokrycia terenu



Powierzchnia terenu uzyskana w wyniku procesu filtracji



TRÓJWYMIAROWE MODELOWANIE BUDYNKÓW

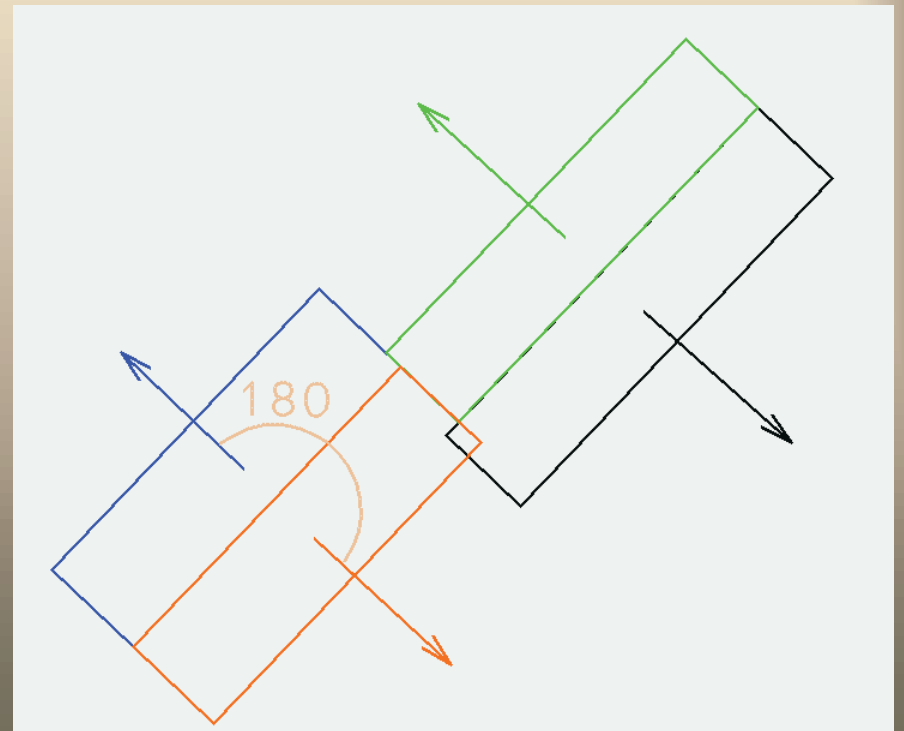
Przy wysokiej częstotliwości skanowania rozkład punktów laserowych pozwala na określenie położenia budynków i ich wizualizacji.

Oprogramowanie do obróbki danych pozwala również na automatyczną wektoryzację obiektów. W praktyce umożliwia to m.in. automatyczne wykonywanie trójwymiarowych budynków i innych struktur pokrycia terenu.

BUDYNKI

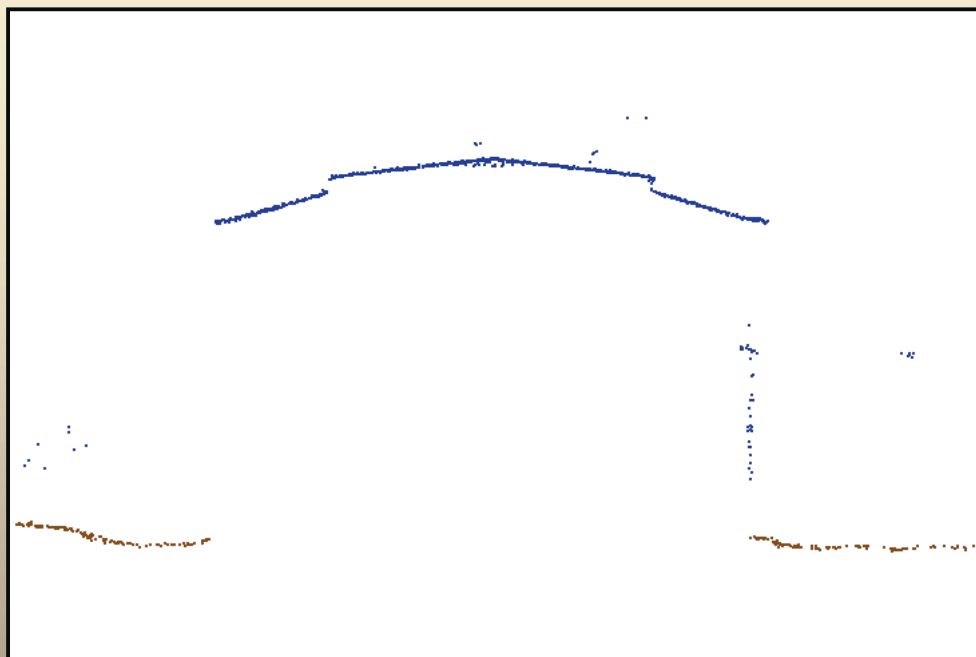
Cechy charakterystyczne budynków:

- Płaskie powierzchnie
- Kąty proste
- Symetria
- Poziome krawędzie



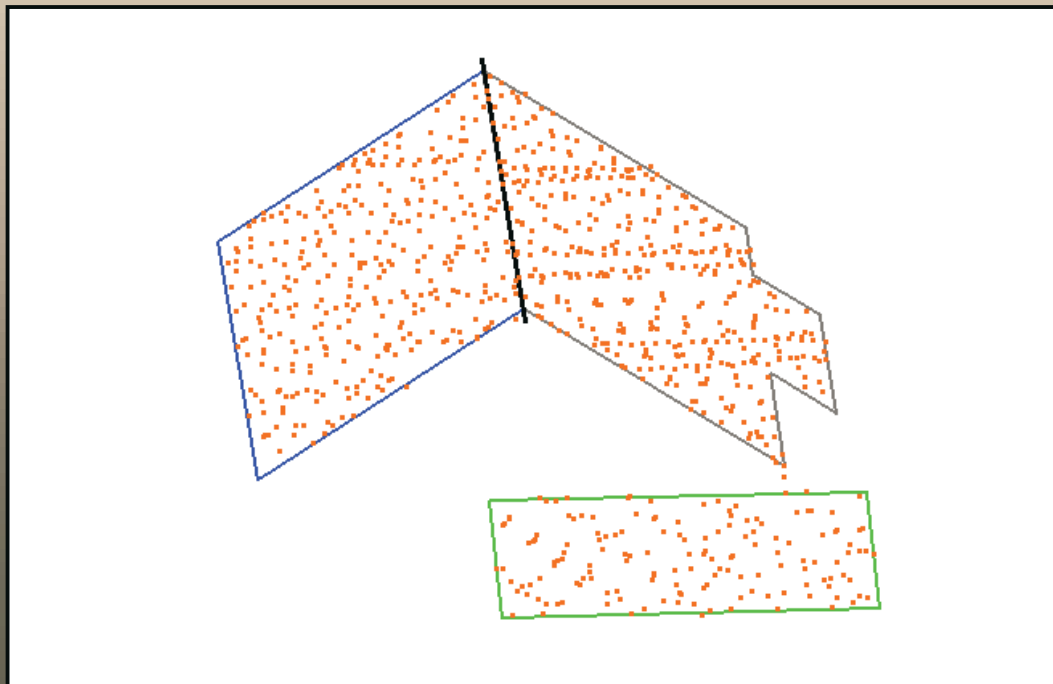
CO WIDZIMY?

- System powietrzny
 - Może pozyskać struktury dachu
 - Nie „widzi” wszystkich ścian
- Odbicie od ścian
 - Niedostateczny kąt pomiaru
 - Przeważnie od struktur z pewnymi poziomymi powierzchniami (otwory okienne, balkony...)



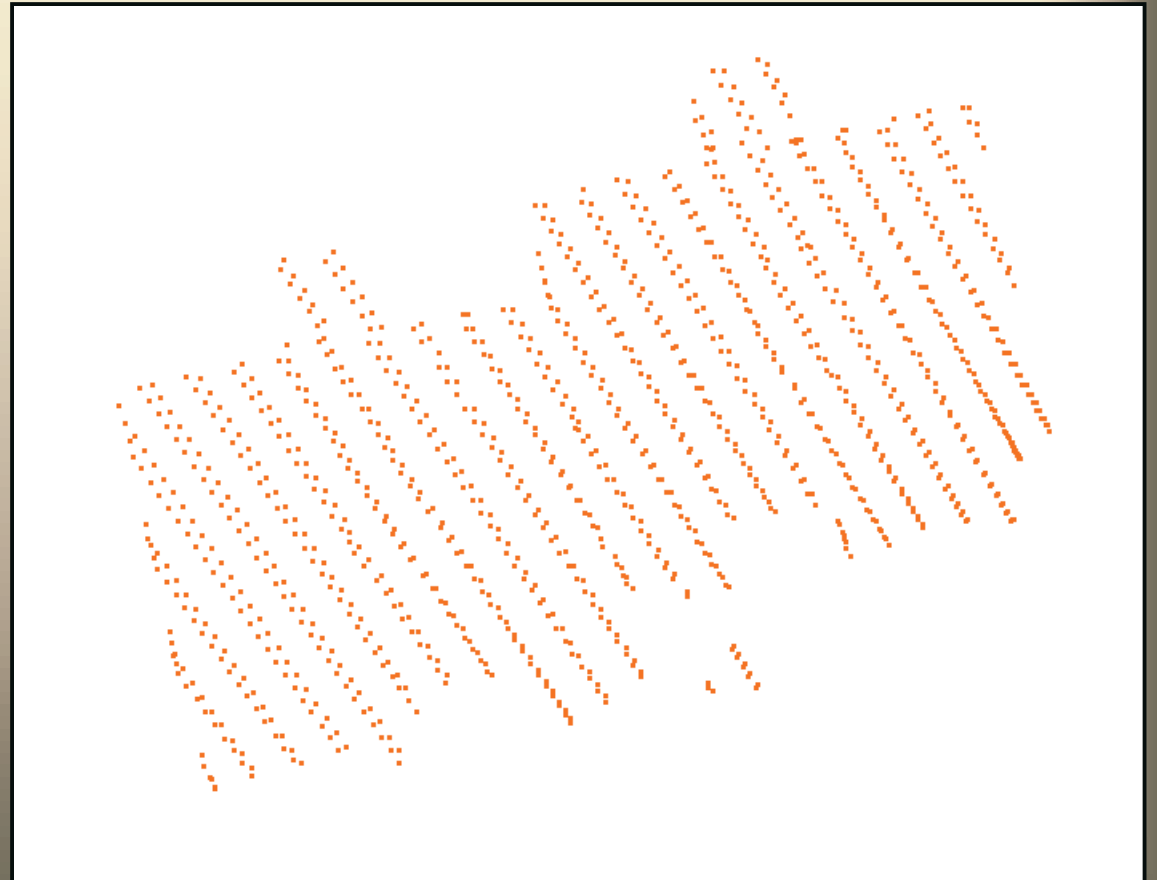
CO JEST DOKŁADNE Z DANYCH Z LASERA?

- Równanie płaszczyzny dużych powierzchni płaskich
 - Duża liczba pomierzonych punktów
- Linie przecięć
 - Punkty z dwóch powierzchni



CO JEST NIEDOKŁADNE W DANYCH Z LASERA?

- Niewielkie szczegóły
 - nie wystarczająca ilość „trafień”
- Pozycja krawędzi

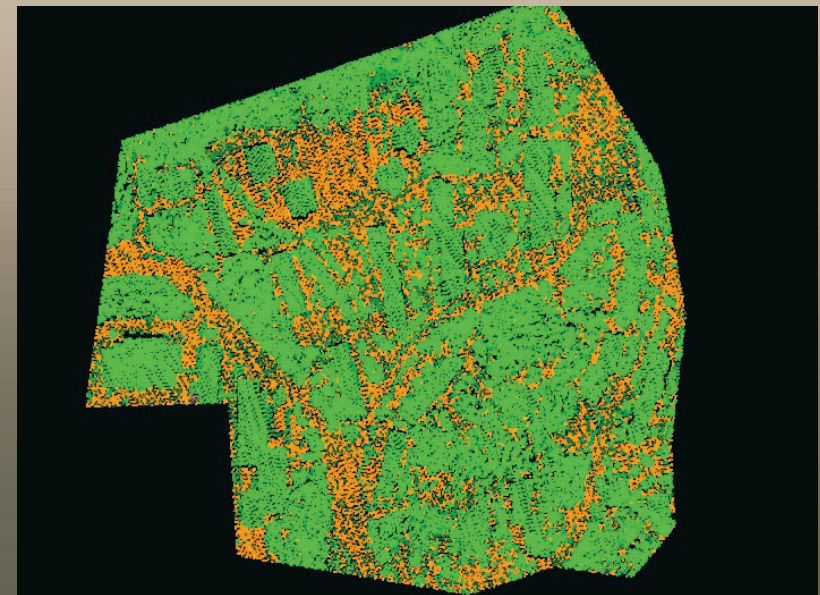
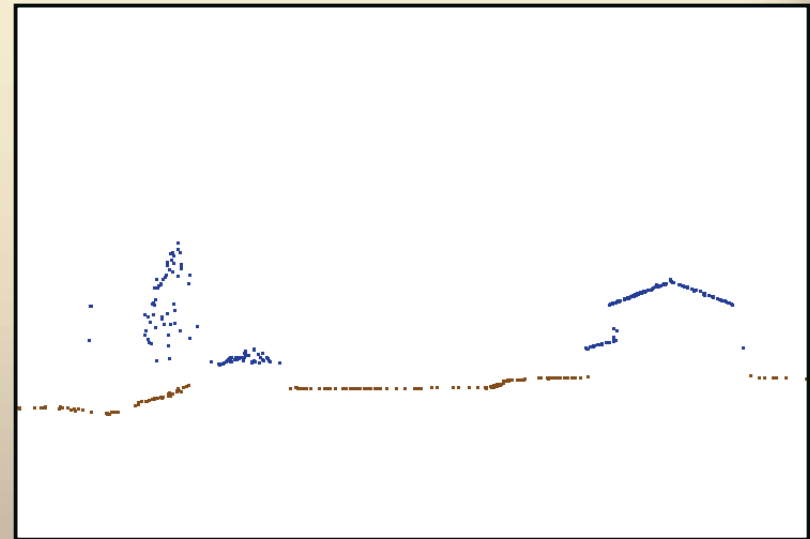


DANE WEJŚCIOWE

- Punkty z lasera
 - Płaskie powierzchnie dachów
- Zdjęcia lotnicze (opcjonalnie)
 - Bardziej dokładne umiejscowienie krawędzi
- Dwuwymiarowe obrysy budynków (opcjonalnie)
 - Wyrównanie „płaszczyzn budynków”
 - Pozycje ścian

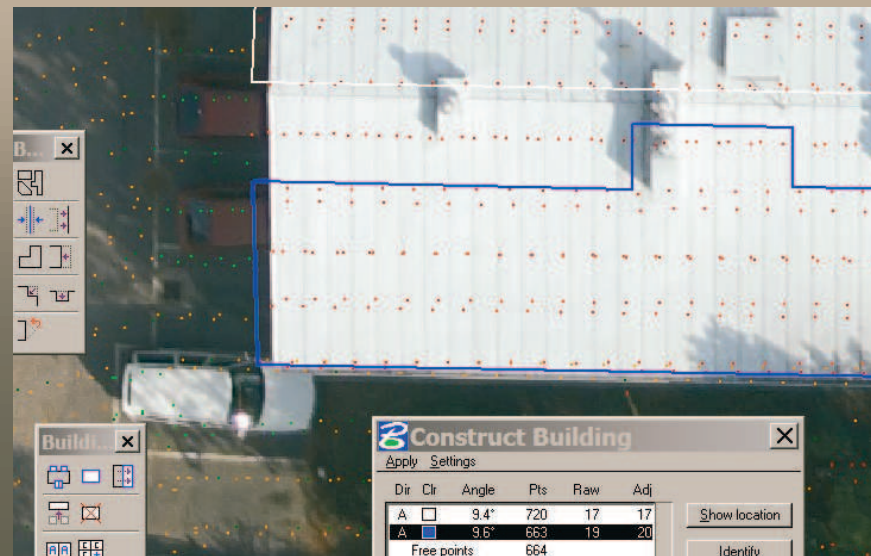
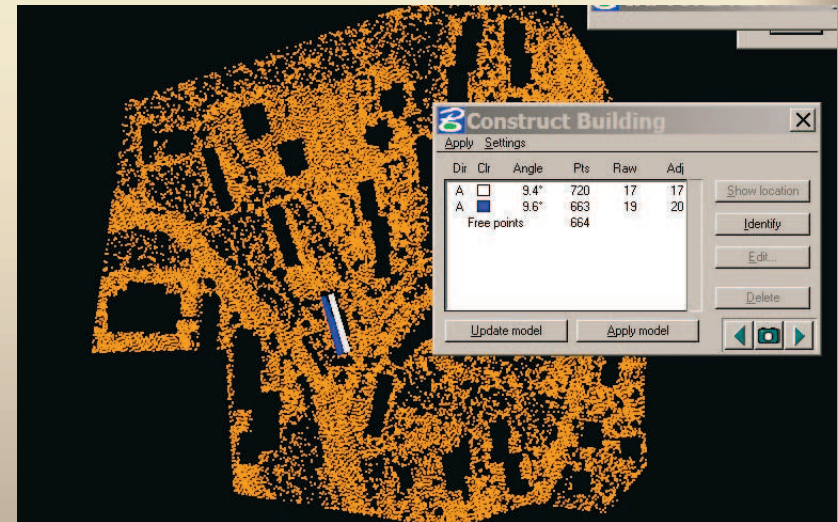
WSTĘPNE PRZETWARZANIE

- Klasyfikacja punktów z lasera:
 - Powierzchnia terenu
 - Wysokich obiektów jednej klasy



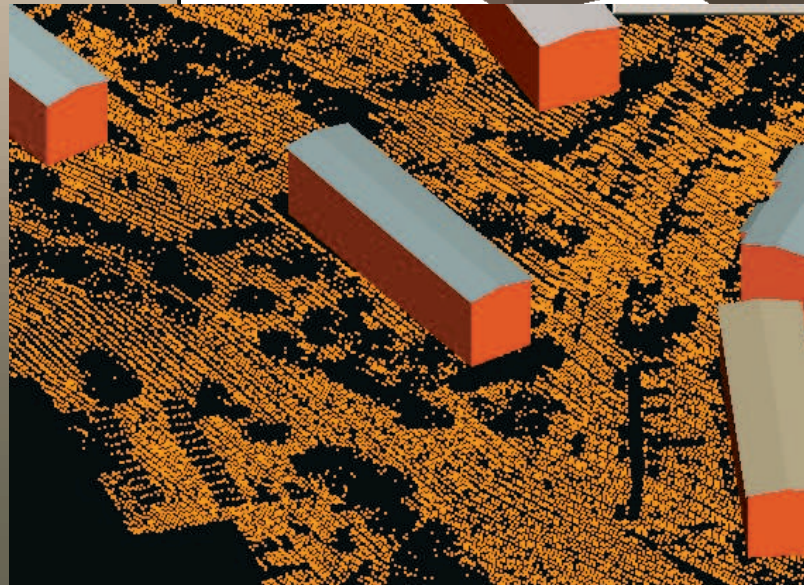
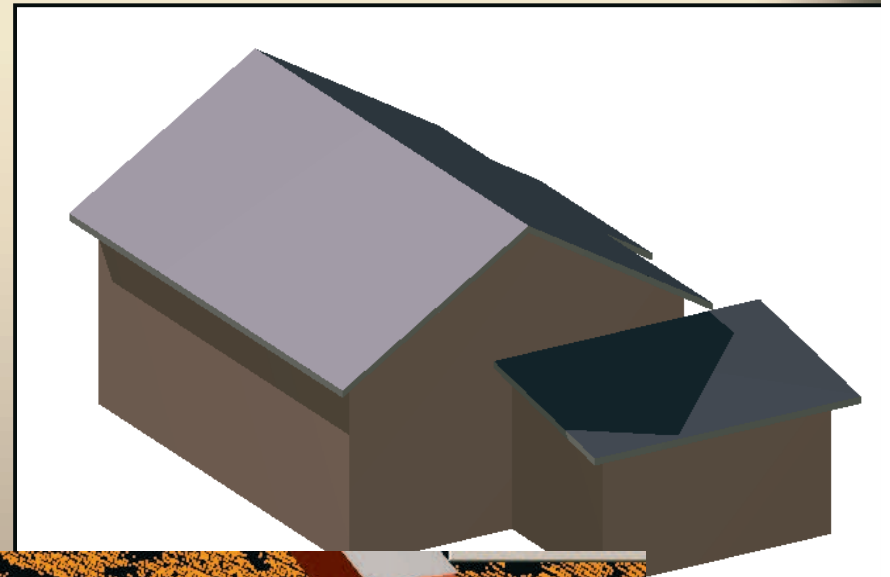
PODEJŚCIE PODSTAWOWE

- Znaleźć płaskie powierzchnie z „chmury” punktów
- Wykryć symetrię i wpasować równanie płaszczyzny
- Znaleźć granice płaszczyzn
- Wyrównać linie graniczne
 - Używając obrazów

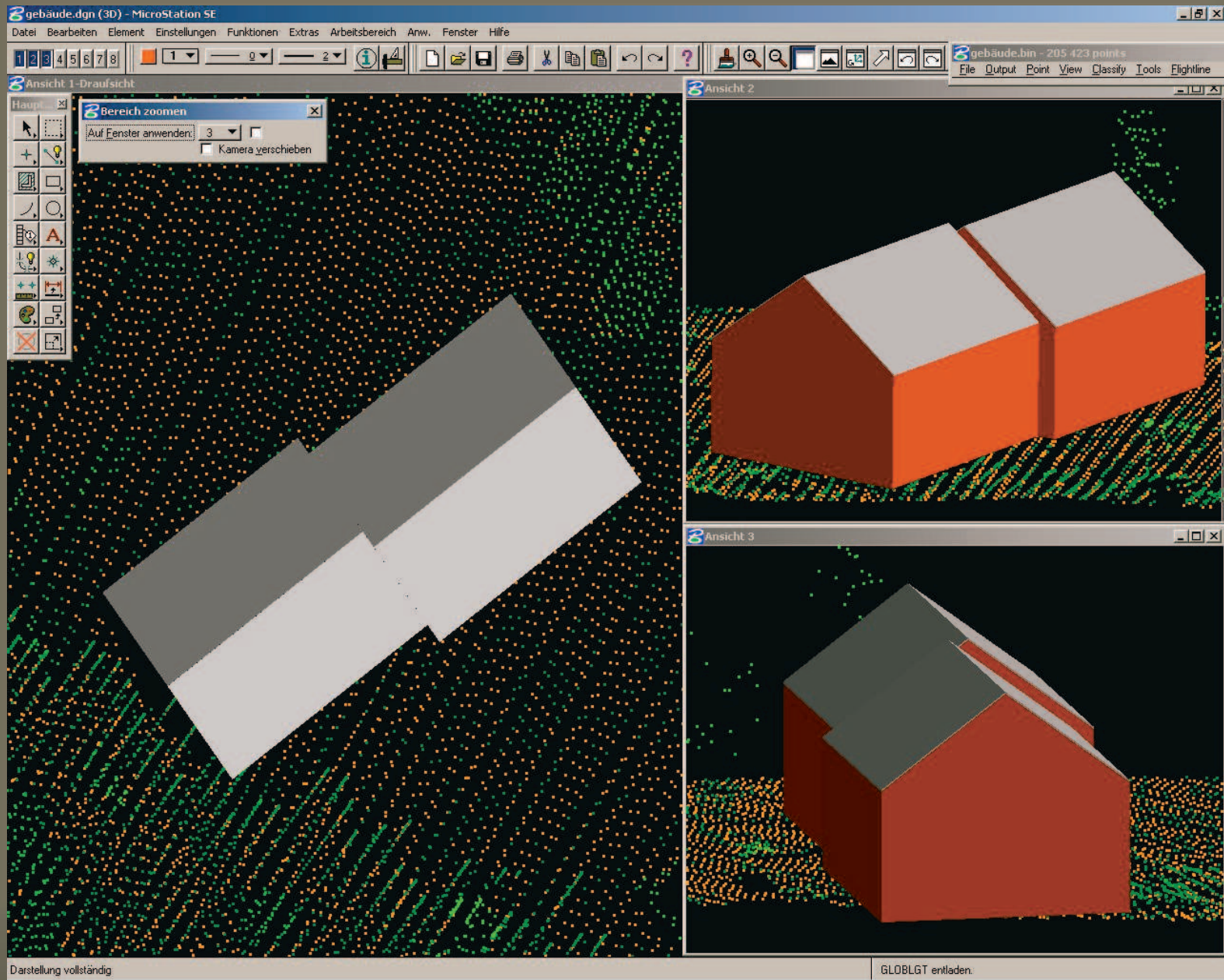


WYNIKOWY MODEL WEKTOROWY

- Uproszczony model wektorowy ignoruje:
 - Niewielkie formy i szczegóły
- Płaszczyzny dachów
 - „najwyższe” płaszczyzny
 - Płaszczyzny boczne dla ustalenia grubości
 - „najniższe” płaszczyzny
 - Kolor dachu ze zobrazań
- Ściany
 - Początek poniżej powierzchni terenu
 - Pozycja odgadywana lub z obrysów

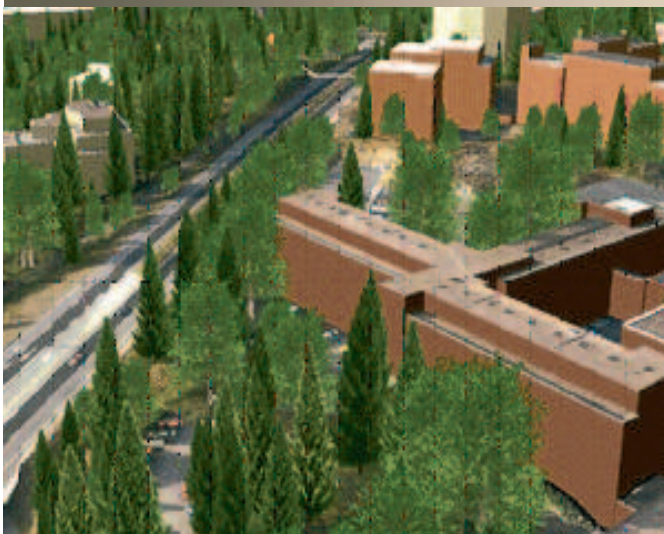


AUTOMATYZYCZNE WYKRYWANIE I WEKTORYZACJA BUDYNKÓW



Proces tworzenia modelu trójwymiarowego:

- Wczytywanie punktów, transformacja współrzędnych (TerraScan),
- Wyrównanie oraz wyznaczanie błędów systematycznych orientacji danych lotniczych (TerraScan & TerraMatch)
- Klasyfikacja punktów do różnych klas takich jak powierzchnia terenu, niska roślinność, wysoka roślinność (TerraScan).
- Przetwarzanie surowych obrazów: wyznaczenie parametrów kamery (TerraPhoto).
- Wykrywanie krawędzi dachów budynków przez użycie “surowych” obrazów cyfrowych oraz punktów z lasera, wydobycie koloru dachu z obrazów, zastosowanie krawędzi dachu do stworzenia modelu budynku (TerraScan & TerraPhoto)) – operacje półautomatyczna
- Modelowania powierzchni terenu (TerraScan & TerraModeler).
- Przetworzenie ortofotomozaiki do modelu terenu oraz krawędzi dachów (TerraPhoto).
- Wykrywanie drzew z “wysokich punktów” wegetacji oraz wyświetlanie ich jako komórki RPC .



Szacowany czas wykonania modelu 3D z surowych” danych:

- km²/tydzień / 1 profesjonalny operator systemu

Czas realizacji: dla miasta o pow. ok. 80 km² ok. 25 dni (z uzyskaniem pozwoleń) ok. 60 dni, oczywiście czas uzależniony od stopnia dokładności

Koszt wykonania: ok. 150.000 Euro

ANALIZA DOKŁADNOŚCI

Hanna Hyppa Ulla Pyysalo – HUT

Pomiar 2000 punktów (Leica SR530 RTK GPS):

2/3 punkty terenowe

1/3 drzewa, budynki itp...

Control Report

Altitude	200 m						550 m		Control points
	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 1		
Control Datasets	Average	Std	Average	Std	Average	Std	Average	Std	
			-8 cm						
RTK-GPS									
Asphalt	0.061	0.058	-0.019	0.058	-0.005	0.057	0.139	0.075	36
Grass	0.067	0.049	-0.013	0.049	0.001	0.045	0.12	0.066	14
Gravel	0.101	0.036	0.021	0.036	0.02	0.034	0.153	0.069	12
Terrain	0.149	0.082	0.069	0.082	0.087	0.091	0.302	0.172	25
Tachymeter									
Tree-Covered-Area	0.146	0.078	0.066	0.078	0.076	0.074	0.312	0.139	50
Non Covered	0.064	0.05	-0.016	0.05	-0.005	0.049	0.144	0.097	100
All	0.088	0.07	0.008	0.07	0.019	0.068	0.195	0.135	150

Quality of Laser Scanning Accuracy of Terraphoto Orthomosaic



Reference points - Real-Time-Kinematic GPS receiver

REJESTRACJA LINI WYSOKIEGO NAPIĘCIA (WYZNACZANIE KOLIDUJĄCYCH Z PRZEWODAMI KORON DRZEW)



POZYSKANIE DANYCH

Nalot z niskiego pułapu:

- wysokość lotu: 80 m
- 50 m pas skanowania
- kamera cyfrowa – Sony (zdjęcia nachylone pod kątem 15°)

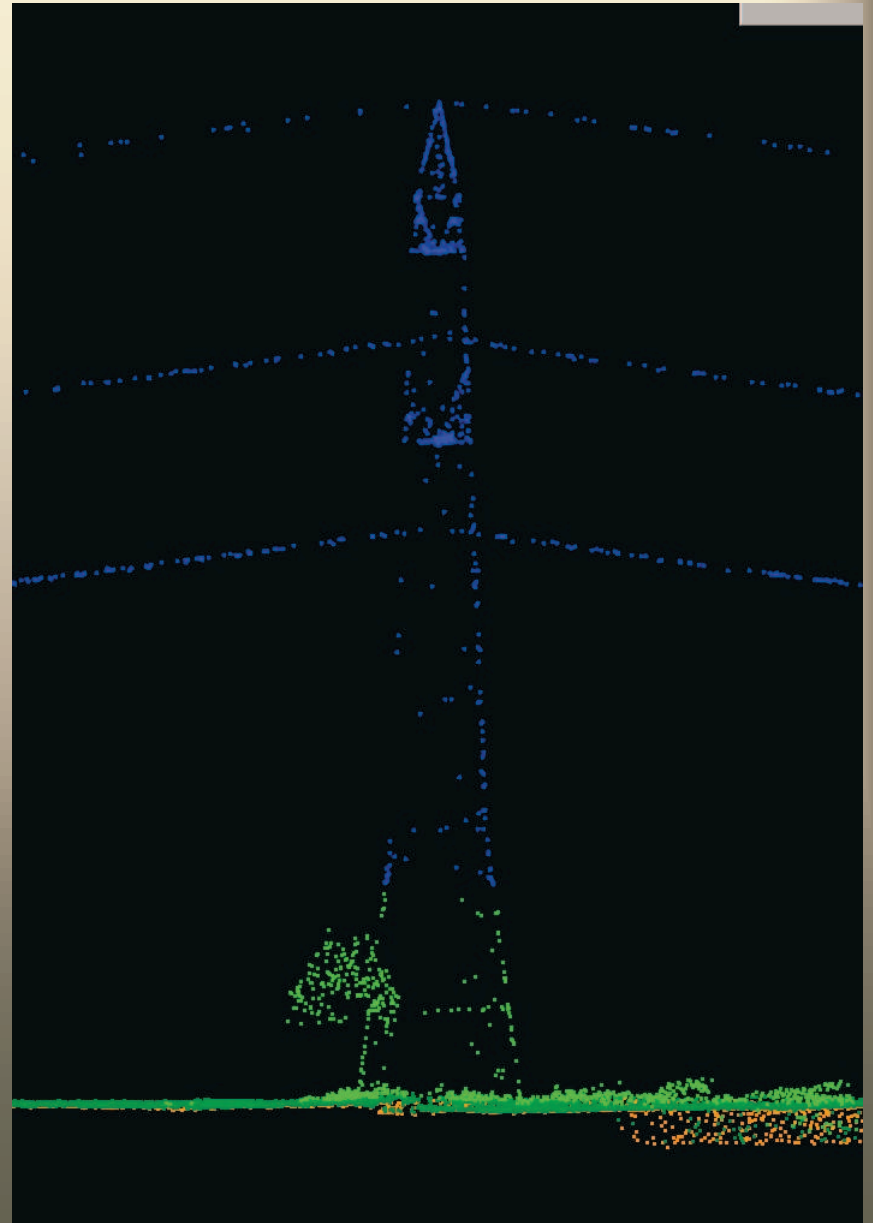
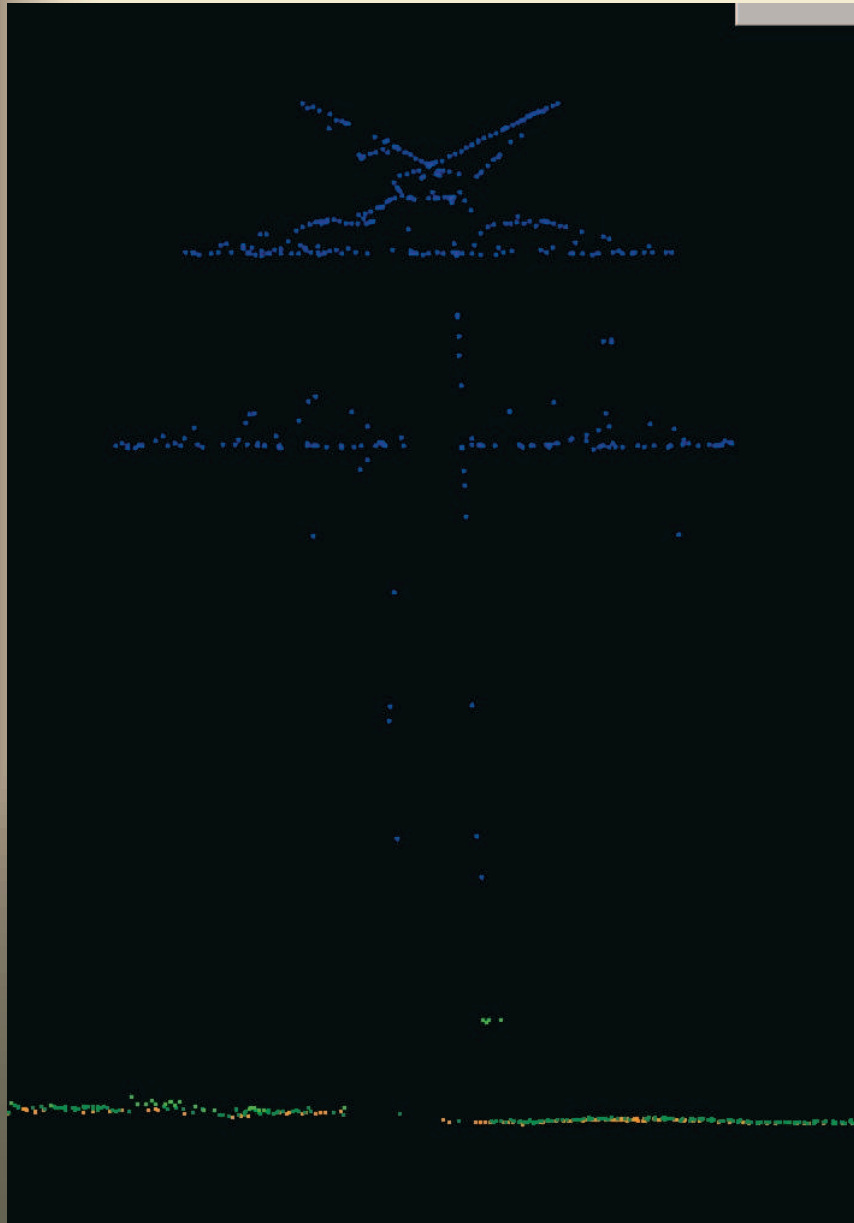


Nalot z wysokiego pułapu:

- wysokość lotu: 190 m
- 120 m pas skanowania
- kamera cyfrowa – Hasselblad (zdjęcia pionowe)



Dźwigar



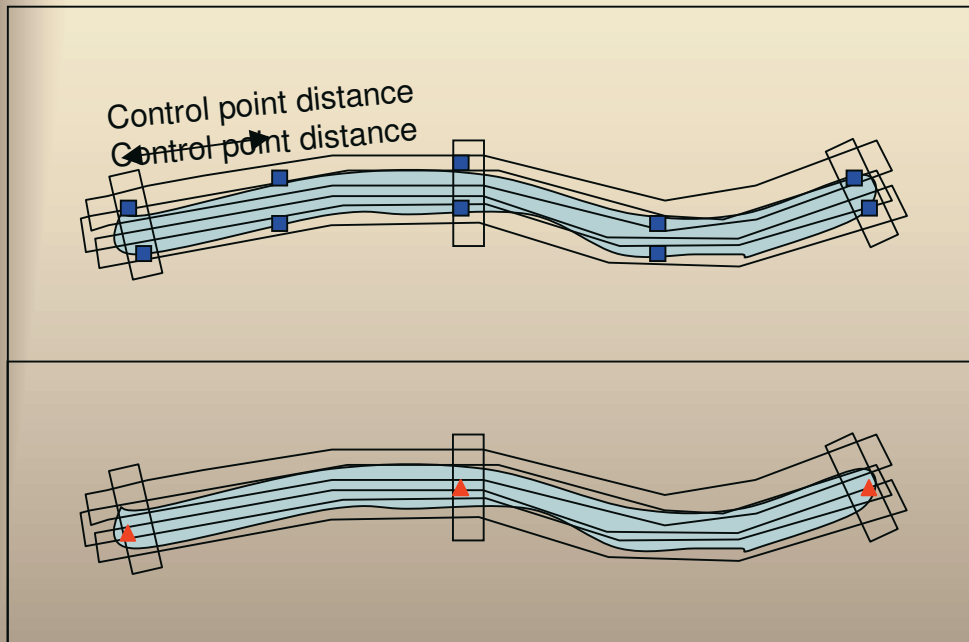
Przetwarzanie danych laserowych:

- wyrównanie
- klasyfikacja

Wektoryzacja linii wysokiego napięcia:

- manualne określenie lokalizacji dźwigarów
- wektoryzacja linii energetycznych (półautomatyczna)
- automatyczne wyszukiwanie punktów roślinności stanowiących zagrożenie

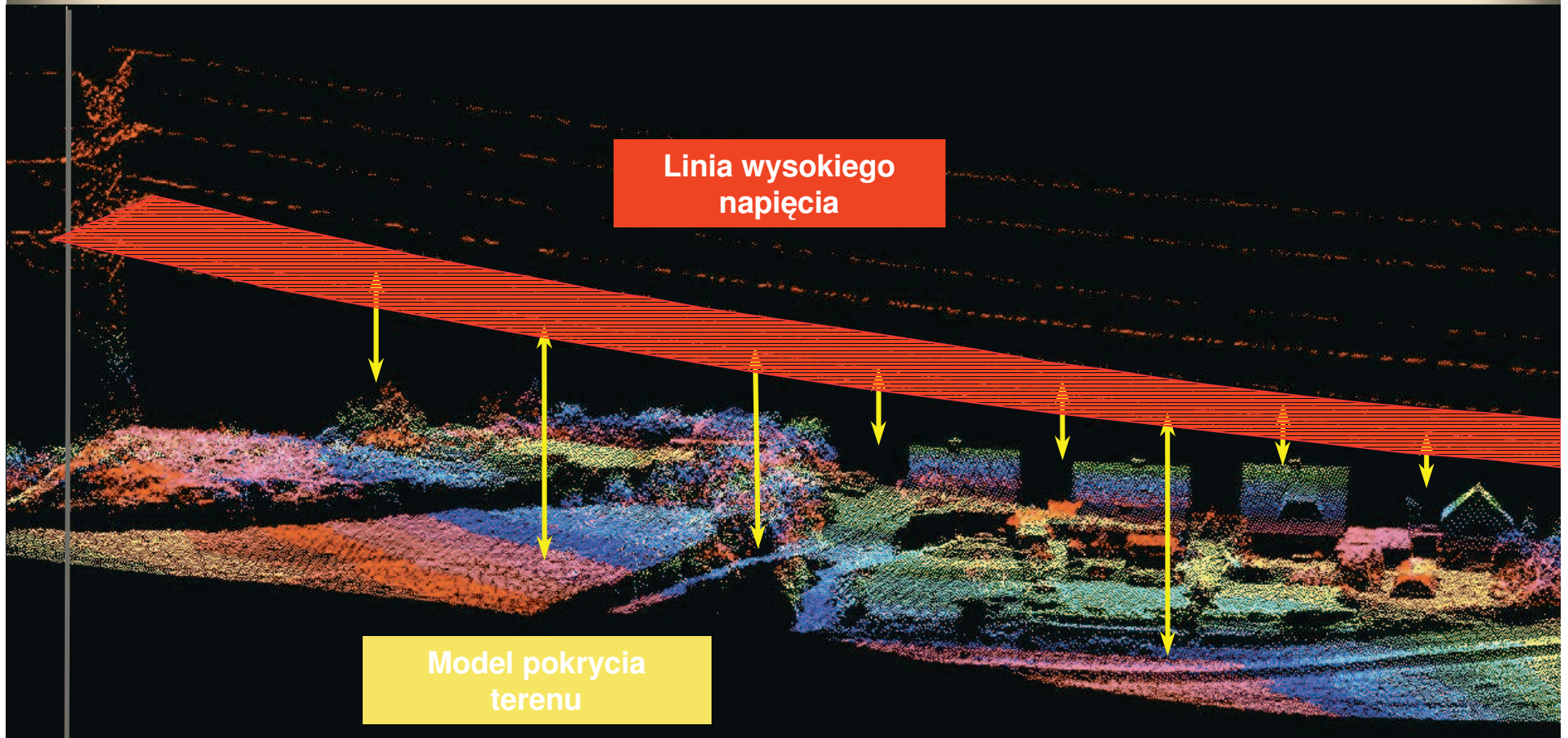
WYRÓWNIANIE DANYCH



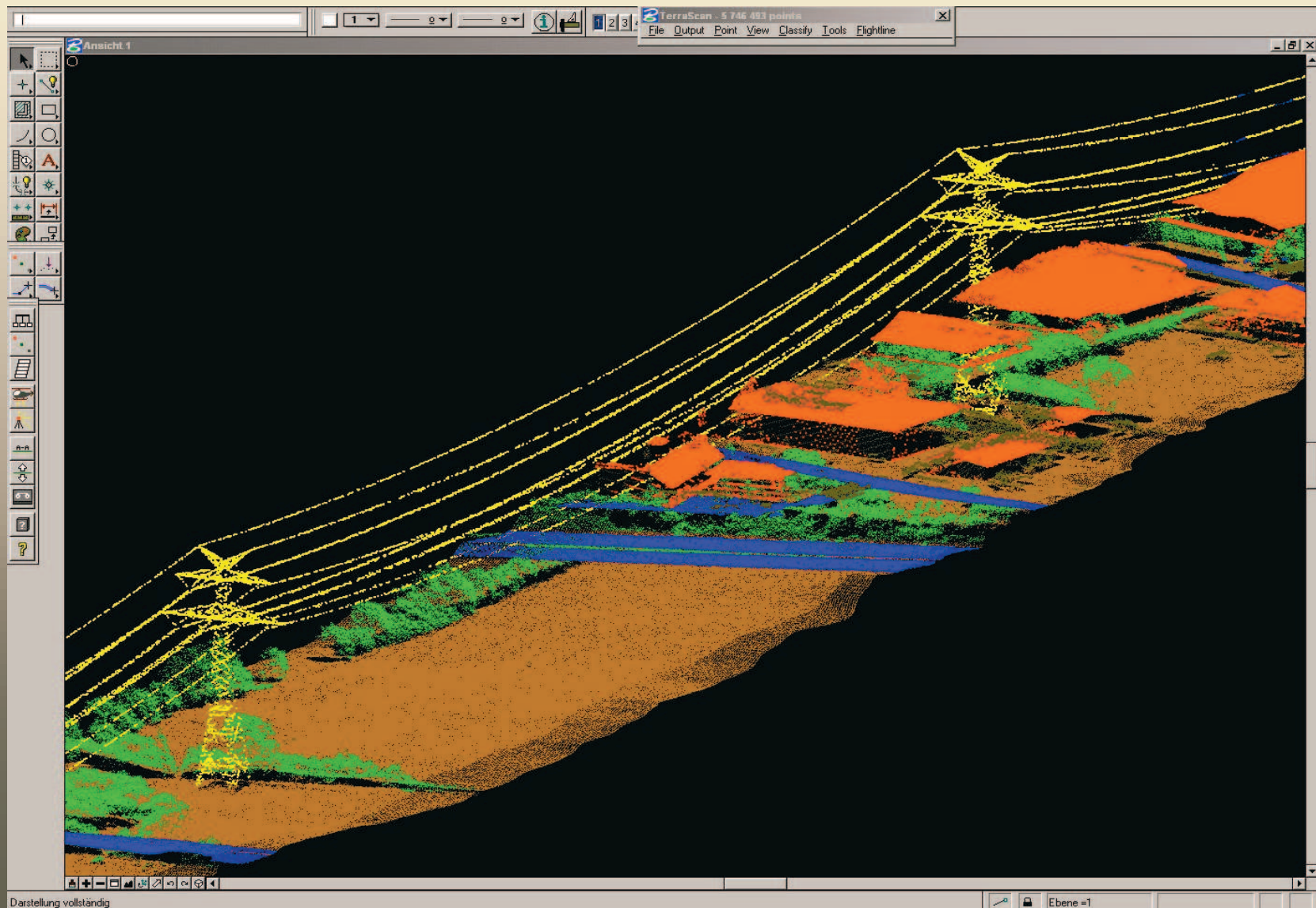
Punkty wysokościowe:
Dla poziomu A – 3 km
Dla poziomu B – 5 km

Punkty sytuacyjne:
Dla poziomu A – 5 km
Dla poziomu B – 10 km

OBLICZENIE ODLEGŁOŚCI POMIĘDZY PRZEWODAMI A OBIEKTAMI TERENU (DRZEWAMI, BUDYNKAMI)

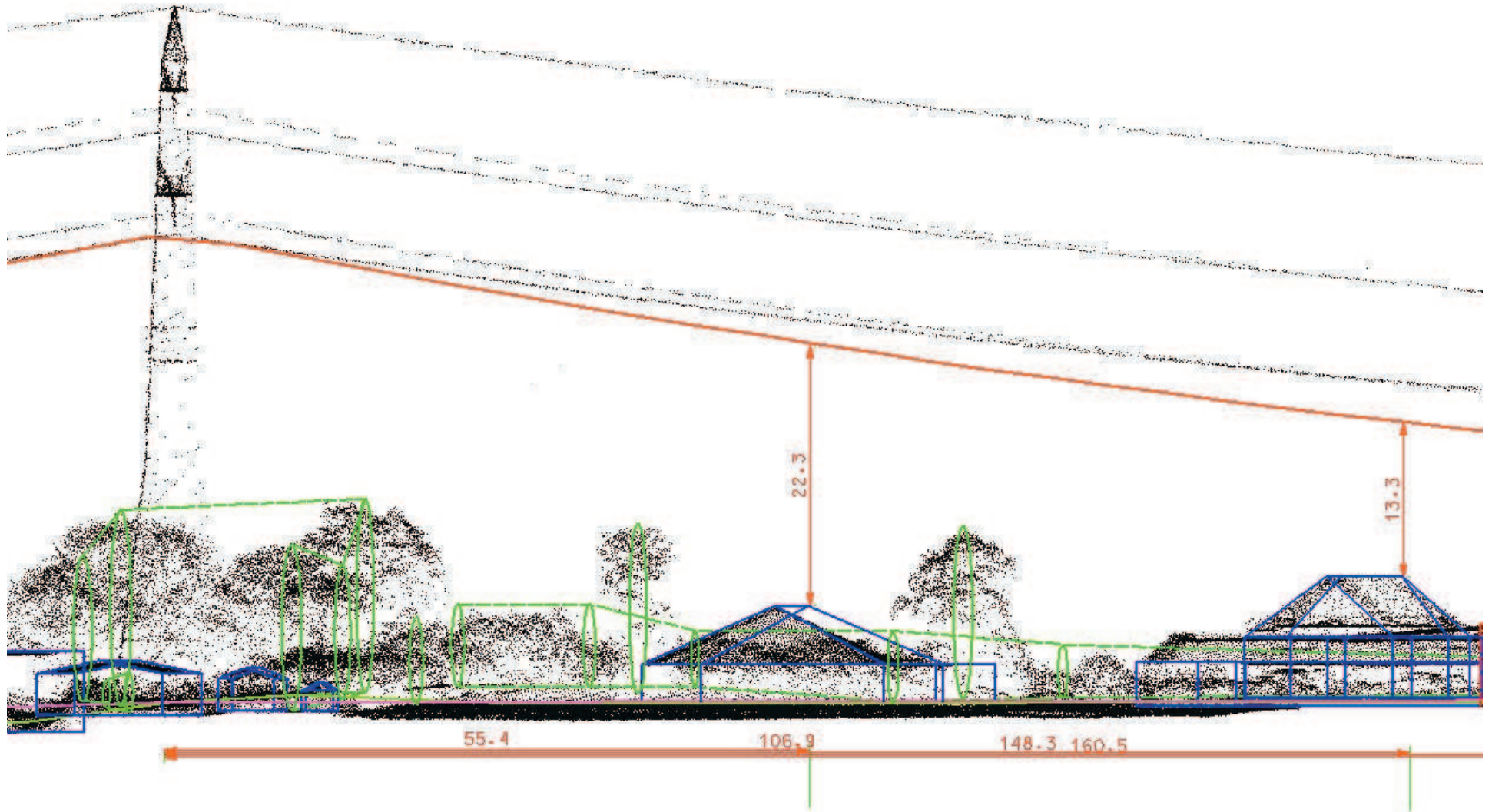


DANE PO KLASYFIKACJI

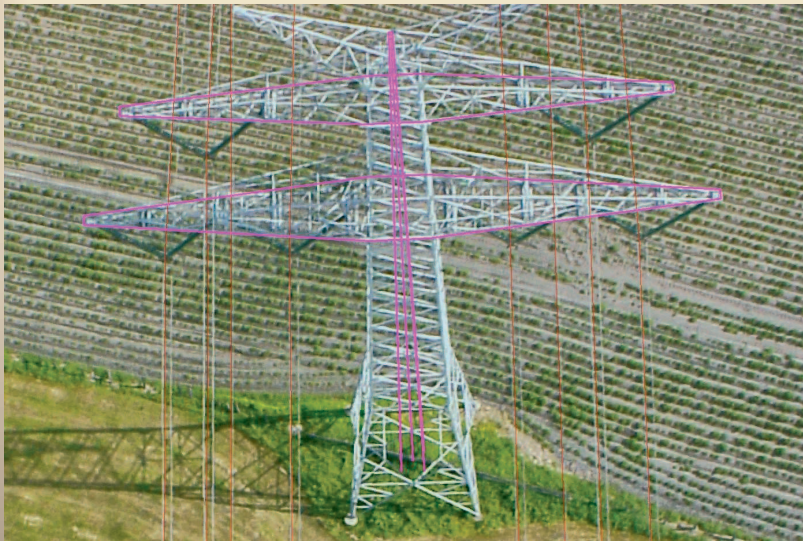


PRZEKRÓJ POPRZECZNY

211/24



WEKTORYZACJA



ZALETY I OGRANICZENIA TECHNOLOGII LIDAR

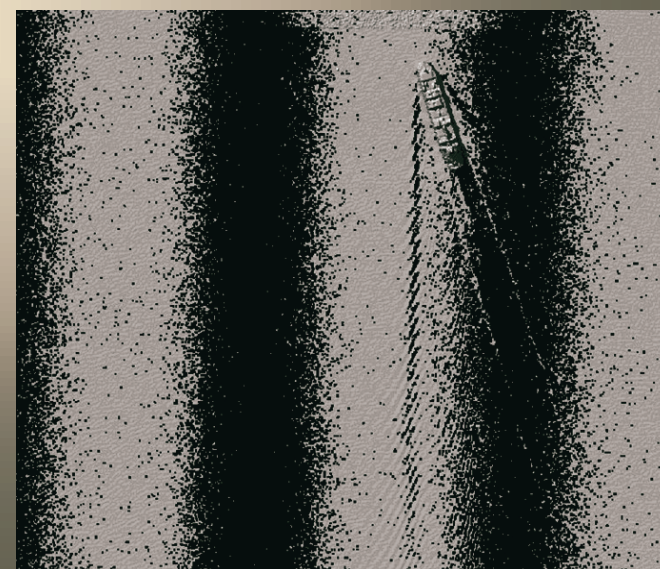
ZALETY:

- Niezależność od warunków oświetleniowych (możliwość operowania nocą).
- Znaczna niezależność od warunków pogodowych.
- Bardzo wysoka dokładność wysokościowa danych pomiarowych.
- Duża szybkość zbierania danych (np. 80 km. linii kolejowej w czasie 2 godzin)
- Krótki czas uzyskania produktu końcowego i relatywnie niski koszt.
- Dostarczanie ogromnej ilości informacji o terenie.
- Łatwa integracja danych z GIS.



OGRANICZENIA:

- Pochłanianie impulsów lasera przez niektóre powierzchnie (wodę, asfalt, smołę).
- Pochłanianie impulsów lasera przez gęste chmury i mgłę.
- Duża objętość zbiorów danych



PODSUMOWANIE I PRZEWIDYWANIA NA PRZYSZŁOŚĆ

Rozwój technologii lidarowej w najbliższych latach przewidywany jest w pięciu głównych kierunkach:

- zwiększenie gęstości danych (zwiększenie częstotliwości impulsu lasera)
- rozwój oprogramowania do przetwarzania danych
- zwiększanie zakresu zbieranej fali
- laserowe pomiary wodne i podwodne
- rozwój platform satelitarnych

Zdolność zbierania danych i obróbki dużej ilości danych wysokościowych, którą oferuje technologia Lidar, jest bardzo ważna w przypadku podejmowania krytycznych decyzji, w ograniczonym czasie.

W procesie produkcji ortofotomap i modeli terenu, edycja manualna i prace polowe zredukowane są do minimum. Dodatkowo, prace lidarowe mogą być prowadzone zarówno w dzień jak i w nocy, w przeciwieństwie do fotogrametrii nie są zależne od kąta padania promieni słonecznych, co znacznie skraca czas pozyskania danych. Przy wprowadzeniu automatycznej identyfikacji, zintegrowane przestrzenne i tekstowe dane będą kompletne i osiągnane szybciej niż tradycyjnymi metodami.

Rok	Liczba nowych instrumentów	Całkowita liczba stosowanych systemów laserowych
1995	3	3
1996	6	9
1997	2	11
1998	9	20
1999	18	38
2000	20	58
2005	prognozowana liczba	150