

**ANALIZA ALGORYTMÓW DETEKCJI OBIEKTÓW
INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ NA PODSTAWIE CHMURY
PUNKTÓW MOBILNEGO SKANINGU LASEROWEGO**

**ANALYSIS OF DETECTION ALGORITHMS OF RAILWAY
INFRASTRUCTURE OBJECT BASED ON SCANNING MOBILE LASER
POINT CLOUD**

Urszula Marmol

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, AGH Akademia
Górniczno- Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: mobilny skaningu laserowy, filtracja, detekcja obiektów

STRESZCZENIE: Tematem niniejszego artykułu jest detekcja obiektów infrastruktury kolejowej na podstawie chmury punktów mobilnego skaningu laserowego. Pierwszym istotnym etapem, zanim przystąpi się do właściwej detekcji, jest usunięcie szumu pomiarowego. W przypadku skaningu mobilnego szum jest kluczowym problemem, gdyż wprowadza duże zakłócenia do danych pomiarowych.

W pierwszej części artykułu zawarto krótką charakterystykę programów pod kątem prostych filtrów geometrycznych, które zarówno usuwają szumy jak i przeprowadzają proste operacje klasyfikacji (na przykład wydzielenie obiektów oddalonych o określoną wartość głębokości).

Dopiero po usunięciu szumu jest możliwe rozpoznawanie obiektów. Jest to stosunkowo nowe zagadnienie, otwierające szerokie pole do analiz i badań naukowych. Do tej pory zostało opisanych kilka metod klasyfikacji danych pochodzących z mobilnych systemów laserowych.

Część algorytmów opiera się na metodach wywodzących się z teorii przetwarzania obrazów. Rozproszona chmura punktów jest zapisywana w siatce regularnej jako raster, którego wartości pikseli odpowiadają głębokości lub intensywności danych laserowych. Do metod opartych na obrazach możemy zaliczyć: algorytmy wykorzystujące filtry morfologiczne i algorytmy wyszukiwania. Inne metody detekcji obiektów bazują na danych rozproszonych, czyli oryginalnej chmurze punktów. Przykładem może być metoda oparta na algorytmie RANSAC.

Przeprowadzona analiza algorytmów filtracji ujawniła, że mobilny skaningu laserowy może stanowić miarodajne źródło do wyodrębniania obiektów.

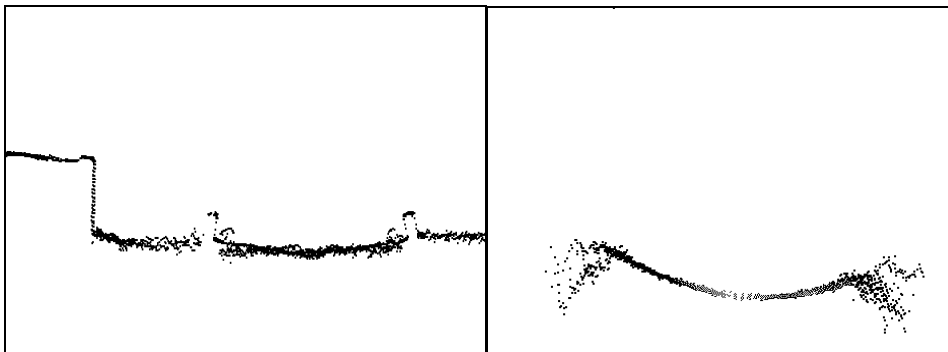
1. SZUM POMIAROWY A PROBLEMY Z DETEKCJĄ OBIEKTÓW

Dane przestrzenne zarejestrowane przez skaner laserowy zawsze posiadają szum pomiarowy. Szum spowodowany jest głównie rozbieżnością wiązki lasera. Wzrost wartości kąta padania również skutkuje większym poziomem szumu (Lenda i Marmol, 2010).

W przypadku skanowania mobilnego szum pomiarowy jest istotnym mankamentem pozyskanych danych. Na rysunku 1.1 zaprezentowano surowe dane pozyskane z platformy

mobilnej. Po lewej widoczny jest fragment krawędzi peronu i szyn. Duże zaszumienie danych spowodowane jest efektem krawędziowym, czyli błędnym odbiciem na krawędzi. Wynika to z właściwości plamki lasera, która odbija się częściowo od właściwej powierzchni, a częściowo od powierzchni znajdującej się bezpośrednio za nią.

Należy także zwrócić uwagę na właściwości odbijające danego obiektu. W przypadku materiałów silnie odbłaskowych (główka szyn lub srebrny walec widoczny po prawej) mogą pojawiać się znaczące anomalie pomiarowe, jak na przykład duże przesunięcia grup pomierzonych punktów.



Rys. 1.1. Szum pomiarowy. Fragment peronu (po lewej), walec pokryty srebrnym materiałem (po prawej)

W niniejszej publikacji tylko zasygnalizowano problem redukcji szumów. Zagadnienie to wymaga wnikliwych analiz, gdyż w innym przypadku dalsze przetwarzanie chmury punktów będzie mało efektywne i obciążone błędami.

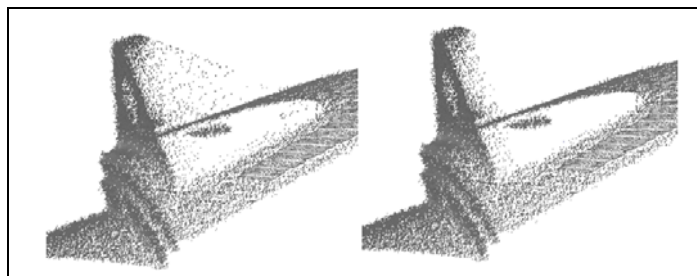
2. PRZEGLĄD PROSTYCH FILTRÓW REDUKUJĄCYCH SZUMY ZAIMPLEMENTOWANYCH W OPROGRAMOWANIACH

W dostępnych na rynku oprogramowaniach zostały zaimplementowane proste filtry, które zarówno usuwają szumy jak i przeprowadzają proste operacje klasyfikacji (na przykład wydzielenie obiektów oddalonych o określoną wartość głębokości). W niniejszym rozdziale zawarto krótką charakterystykę programów pod kątem algorytmów filtracyjnych.

2.1. FARO Scene

Poprzez zastosowanie filtrów, wybrane punkty laserowe są poprawiane lub usuwane. Zaimplementowane filtry analizują każdy punkt chmury i oceniana jest jego wartość według określonych kryteriów. Jeśli wartość przewyższa ustaloną wartość progową, punkt laserowy jest poprawiany lub usuwany. W celu określenia punktów błędnych, filtry porównują punkt laserowy z punktami w ustalonym otoczeniu (masce filtru). Dostępne filtry w FARO Scene to :

Stray – usuwa punkty, które powstały poprzez rejestrację dwóch obiektów w jednej plamce lasera (rys.2.1).



Rys. 2.1. Filtr Stray. Źródło: (FARO Scene 4.8 – Manual)

Parametr *Grid size* określa rozmiar otoczenia, dla którego dane są porównywane. Porównywana jest odległość między punktami w otoczeniu, a punktem badanym. Jeśli przynajmniej ustalony procent punktów (*Allocation Threshold*) w otoczeniu punktu analizowanego jest w zakresie ustalonego progu (*Distance Threshold*), dany punkt pozostaje. Pozostałe są usuwane.

Distance Based – usuwa punkty laserowe w zadanej odległości od lasera.

Dark Scan Points – usuwa punkty laserowe bazując na wartościach intensywności.

Smooth – minimalizuje szum na powierzchni. Filtr ten zastępuje pomierzone wartości przez wartość średnią z ustalonego otoczenia. *Grid Size* określa rozmiar otoczenia. *Distance Threshold* jest progiem dla wyznaczenia wartości średniej. Jeśli odległość pomiędzy punktem centralnym a punktem w otoczeniu jest poza ustalonym progiem, punkt centralny nie jest wykorzystywany do przeliczenia wartości średniej.

2.2. DEPHOS Mapper

Filtracja w oprogramowaniu DEPHOS została podzielona na trzy etapy (Rzonca, 2008):

1. Usunięcie punktów nienależących do analizowanego obiektu

Program wykorzystuje funkcję o nazwie SCVALONEPOINTREMOVER (ang. *ScanView Alone Point Remover*). Użytkownik podaje dwa parametry: promień sfery o środku w analizowanym punkcie chmury lub połowę boku sześcianu, w którego środku geometrycznym znajduje się punkt (dla obu przypadków parametr *Radius*) oraz minimalną ilość punktów (parametr *Min. Points*). Jeśli punktów wewnątrz sfery/sześcianu jest mniej niż parametr *Min. Points*, punkt znajdujący się w środku sfery/sześcianu jest eliminowany. Algorytm ten pozwala na pozostawienie punktów stanowiących spójne powierzchnie skanowane.

2. Usunięcie punktów leżących w drugim planie

Filtr SCVCLEARSCAN (ang. *ScanView Clear Scan*) usuwa punkty znajdujące się w drugim planie. Dla każdego analizowanego punktu, algorytm oblicza równanie normalnej, a następnie sprawdza wzdłuż normalnej, czy istnieje jakiś kolejny punkt, którego odległość od płaszczyzny rzutowania jest większa niż odległość punktu analizowanego. Sprawdzanie wzdłuż normalnej przebiega wewnątrz walca/ graniastoslupa,

którego osią jest normalna, przechodząca przez analizowany punkt, a promień walca lub połowa boku kwadratu będącego podstawą graniastosłupa, dobrana jest jako jeden z parametrów (*Radius*) podawanych przez operatora. Drugim parametrem jest tolerancja (*Tolerance*). Tolerancja jest to wartość zbliżona do połowy faktycznej grubości chmury punktów w danym planie. Warunek ten ma na celu pozostawienie punktów, które należą do tej samej powierzchni co punkt analizowany.

3. Wygładzanie chmury punktów.

Trzecim, ostatnim etapem jest wygładzenie chmury punktów. Do tego celu służy filtr SCVSMOOTHER, który analogicznie, jak w SCVCLEARSCAN, dla każdego analizowanego punktu generuje walec o zadanym promieniu (*Radius*), którego oś obrotu pokrywa się z normalną do płaszczyzny rzutni, przechodzącą przez dany punkt. W takim walcu tworzymy dla danego punktu w zadanym przedziale (*Tolerance*) poszukiwane są inne punkty. Odległość wszystkich punktów od płaszczyzny, znalezionych w takim walcu wraz z punktem analizowanym, jest uśredniana. Wynik stanowi nową głębokość (odległość od płaszczyzny) punktu analizowanego.

2.3. Z+F Laser Control

W oprogramowaniu dostępne są proste filtry pozwalające na usuwanie punktów błędnie zarejestrowanych na krawędziach, punktów na określonej odległości od skanera, punktów o ustalonej intensywności. Niestety nie ma możliwości bardziej wnikliwej analizy zastosowanych filtracji, gdyż nie są dostępne informacje o szczegółach zaimplementowanych algorytmów.

3. PRZEGLĄD METOD DETEKCJI OBIEKTÓW

Po etapie redukcji szumów możliwe jest zastosowanie bardziej złożonych analiz, czyli na przykład detekcji obiektów.

Wykrywanie obiektów na podstawie mobilnego skaningu laserowego jest stosunkowo nowym zagadnieniem, otwierającym szerokie pole do analiz i badań naukowych. Do tej pory zostało opisanych kilka metod klasyfikacji tego typu danych laserowych.

Niektóre algorytmy opierają się na metodach wywodzących się z teorii przetwarzania obrazów. Rozproszona chmura punktów jest zapisywana w siatce regularnej jako raster, którego wartości pikseli odpowiadają wysokości lub intensywności danych laserowych.

Do metod opartych na obrazach możemy zaliczyć: algorytm oparty na filtrach morfologicznych (Hernández i Marcotegui, 2009a, 2009b) i algorytm wyszukiwania (*ang. retrieval algorithm*) (Jaakkola et al., 2008).

Inne metody detekcji obiektów bazują na danych rozproszonych, czyli oryginalnej chmurze punktów. Przykładem może być metoda oparta na algorytmie RANSAC (Neubert et al., 2008).

3.1 Algorytm oparty na operacjach morfologicznych

W publikacji (Hernández i Marcotegui, 2009a) została opisana metoda segmentacji danych 3D, pochodzących z mobilnego skanowania. Opracowano automatyczny algorytm filtracji i klasyfikacji obiektów znajdujących się w pobliżu drogi.

Zaproponowana metoda oparta jest na obrazach zasięgu i akumulacji. Obrazy te są generowane poprzez rzutowanie punktów 3D na płaszczyznę z użyciem „wirtualnej” kamery. Kamera jest zlokalizowana na płaszczyźnie o wektorze normalnym $n = [0,0,1]$, w punkcie $(0,0, z_{\min})$. Współrzędne obrazu (u,v) są definiowane przez funkcję parametryczną związaną z kamerą.

Obraz zasięgu jest reprezentacją 3D informacji, gdzie wartość jasności piksela jest funkcją mierzonych odległości pomiędzy punktami 3D, a płaszczyzną kamery. Dla obrazu zasięgu stosowany jest algorytm Z-bufora, który wyznacza odległości właściwe dla dalszych etapów przetwarzania.

Obraz akumulacji sumuje liczbę pikseli, które są rzutowane na ten sam piksel (u,v) obrazu kamery.

Etapy algorytmu:

1. Wykrycie obiektów pionowych

W celu wykrycia obiektów pionowych wykorzystano transformację Hough’a. Algorytm ten wykrywa kierunek przebiegu budynków. W kolejnym etapie wzdłuż linii generowany jest profil wysokościowy. Profil ten pozwala na wydzielenie bloków stanowiących oddzielne budynki. Na danych tych przeprowadzana jest segmentacja wododziałowa.

2. Filtracja powierzchni terenu

Metoda bazuje na surowej segmentacji obrazu zakresu, z wykorzystaniem algorytmu zaznaczania płaskich regionów (*ang. flat zones labeling algorithm*).

Definicja:

Dwa sąsiednie piksele p i q , należą do tego samego obszaru płaskiego funkcji f , jeśli różnica $|f_p - f_q|$ jest mniejsza lub równa zadanej wartości λ .

$$\forall(p, q) : |f_p - f_q| \leq \lambda \quad (1)$$

Ponieważ różnice wysokości na powierzchni terenu w przypadku drogi są małe, określono λ na poziomie 2 m, co pozwoliło na klasyfikację wszystkich pikseli terenowych do tego samego regionu.

3. Wykrycie pozostałych obiektów

Proponowana metoda bazuje na algorytmie zamykania otworów (*ang. hole filling algorithm*) (rys.3.1). Otwory w obrazie odpowiadają zbiorom pikseli, które posiadają

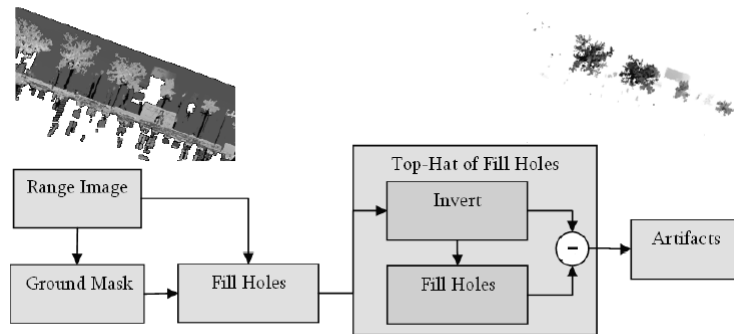
minimalne wartości i nie są łączne z granicą obrazu. Algorytm usuwa wszystkie minima z wykorzystaniem morfologicznych operacji:

$$Fill(f) = R_f^\varepsilon(mk) \quad (2)$$

gdzie:

$$mk = \begin{cases} f_p & \text{jeżeli } p \text{ jest na granicy} \\ \max(f) & \text{w innym przypadku} \end{cases}$$

Algorytm zamykania otworów jest użyty dwukrotnie. Po pierwsze do redukcji cieni obiektów (czyli w przypadku braku danych). Po drugie do wykrycia obiektów. Obiekty mogą być traktowane jako wypukłość na drodze. W związku z tym generowany jest negatyw obrazu zasięgu, wypukłości terenu stają się nowymi otworami, które powinny zostać wypełnione. Obiekty są wykrywane jako różnica między negatywem obrazu zasięgu a obrazem z zamkniętymi otworami.



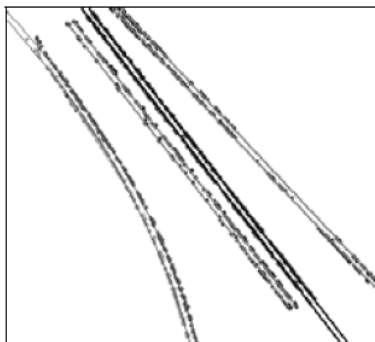
Rys. 3.1. Algorytm wykrywania obiektów (Hernández i Marcotegui, 2009b)

3.2. Metoda oparta na algorytmie RANSAC

Metoda wyodrębniania torów kolejowych, oparta na algorytmie RANSAC została zaprezentowana w (Neubert et al., 2008). Algorytm RANSAC (*ang. RANdom SAMple Consensus*) to iteracyjna metoda estymowania parametrów modelu matematycznego ze zbioru obserwacji, które zawierają błędy grube. Jest to algorytm niedeterministyczny w znaczeniu, że przynosi wiarygodne wyniki tylko z pewnym prawdopodobieństwem. Algorytm ten został po raz pierwszy opublikowany w 1981 przez (Fischer, Bolles, 1981). Podstawowe założenie jest następujące: obserwowane dane zawierają punkty, które mogą być opisane z wykorzystaniem zbioru parametrów i punkty, będące obserwacjami odstającymi, które nie wpasowują się w model. Najprostszym przykładem jest wpasowanie linii w zbiór punktów 2D, ale istnieje możliwość wpasowywania innych modeli np. płaszczyzn (Jarzabek-Rychard i Borkowski, 2010).

W pierwszym etapie dane dzielone są na mniejsze podzbiory wzdłuż kierunku torów. Następnie dla każdego podzbioru stosowany jest algorytm RANSAC. W omawianym

przypadku algorytm został przystosowany do wykrycia wielu linii i krzywych. Następnie zostały dopasowane funkcje liniowej regresji w oparciu o wykryte linie i odpowiadające im punkty (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Wpasowane linie i łuki z wykorzystaniem algorytmu RANSAC

4. ANALIZA WYBRANYCH METOD DETEKcji OBIEKTÓW

W celu analizy omówionych powyżej metod filtracji wybrano niewielkie pole testowe, obejmujące fragment torów kolejowych w okolicach Słomnik pod Krakowem. Odstęp między punktami to około 0.04 m.

4.1. Algorytm oparty na filtrach morfologicznych

Jako pierwszy przetestowano algorytm zamykania otworów. Wykorzystano w tym celu środowisko MATLAB. W pierwszym etapie dane zostały wstępnie sklasyfikowane w oprogramowaniu TerraSolid i została wyznaczona powierzchnia terenu, z wykorzystaniem algorytmu Axelssona. W kolejnym etapie została przeprowadzona procedura opisana w podrozdziale 3.1 punkt 3. Wynik zastosowania algorytmu opartego na filtrach morfologicznych przedstawiono na rysunku 4.1. Metoda w sposób zadawalający przeprowadziła wydzielenie budynków i innych artefaktów o powierzchniowym charakterze. Jednakże nie wszystkie punkty zostały we właściwy sposób zaklasyfikowane, na przykład tory kolejowe nie zostały wykryte.



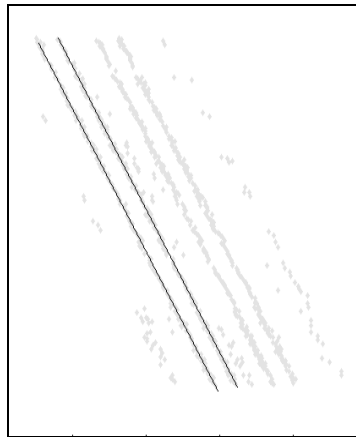
Rys. 4.1. Wynik zastosowania algorytmu zamykania otworów

4.2. Algorytm RANSAC

Ze względu na brak możliwości wykrycia torów kolejowych z wykorzystaniem operatorów morfologicznych, zdecydowano się wprowadzić do analizy algorytm RANSAC.

Najprostszym przykładem zastosowania algorytmu jest wpasowanie linii w zbiór punktów 2D, co zostało przeprowadzone dla analizowanych danych.

Algorytm, opisany w podrozdziale 3.2, został zastosowany dla zgrubnie sklasyfikowanych punktów stanowiących szyny (Kovesi, 2012). Procedura została zaimplementowana w środowisku MATLAB. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 4.2



Rys. 4.2. Wynik zastosowania algorytmu RANSAC

Algorytm RANSAC we właściwy sposób wyznaczył przebieg torów kolejowych. Jednakże na razie przeanalizowano przykład najprostszy – gdy szyny są liniami prostymi. W dalszych pracach badawczych będą rozważane bardziej skomplikowane próbki testowe, czyli łuki kołowe i krzywe przejściowe.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analiza stosowanych metod filtracji ujawniły, że mobilny skaning laserowy może stanowić miarodajne źródło do wyodrębniania obiektów. Niestety należy zdawać sobie sprawę z dużego zaszumienia danych. Niektóre materiały na skutek przepuszczalności światła i właściwości odbijających zmieniają mierzoną długość w stosunku do długości rzeczywistej (Lenda i Marmol, 2010). Drugim znaczącym błędem są smugi powstające na krawędziach rejestrowanych obiektów. Dlatego ważnym etapem przetwarzania danych jest usunięcie szumów pomiarowych. Dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów geometrycznych jakość otrzymanych wyników może ulec znaczącej poprawie. Dopiero wówczas można przeprowadzić próby wydzielenia obiektów, będących

w polu zainteresowania jak i obiektów, które mogą zostać wyeliminowane z dalszej analizy.

W niniejszej publikacji przeanalizowano dwie metody wyodrębniania obiektów: algorytm oparty na filtrach morfologicznych i algorytm RANSAC. Kompilacja tych dwóch metod przyniosła zadawalające wyniki. Jednakże problematyka filtracji i detekcji obiektów na podstawie danych mobilnego skaningu laserowego jest nadal istotnym zagadnieniem badawczym.

6. LITERATURA

FARO Scene 4.8 – Manual.

Fischler M. A., Bolles R. C. 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Comm. of the ACM* 24 (6): pp. 381–395.

Hernández J., Marcotegui B., 2009a. Point cloud segmentation towards urban ground modeling. GRSS/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban area. Shanghai, China.

Hernández J., Marcotegui B., 2009b. Filtering of artifacts and pavement segmentation from mobile LIDAR data. *LaserScanning'09*, Paris, France. September.

Hernández J. Marcotegui B., 2010. Segmentation et Interprétation des Nuages de Points pour la Modélisation d'Environnements Urbain. *Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection*. n.191, pp. 28-35.

Jaakkola A., Hyyppä J., Hyyppä H., Kukko A., 2008. Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping. *Sensors* vol.8, pp. 5238-5249.

Jarząbek-Rychard M., Borkowski A., 2010. Porównanie algorytmów RANSAC oraz rosnących płaszczyzn w procesie segmentacji danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol.21, s. 119-129.

Kovesi P. 2012. <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/#robust>.

Lenda G., Marmol U., 2010. Dokładność dalmierzy bezzwierciadlanych dla pomiaru obiektów wykonanych z materiałów syntetycznych. *PAK* vol.56, nr 11.

Neubert, M., Hecht, R., Gedrange, C.; Trommler, M.; Herold, H., Krüger, T., Brimmer, F. Extraction of Railroad Objects from Very High Resolution Helicopter-borne LiDAR and Ortho-Image Data. 2008. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; XXXVIII-4/C1.

Rzonca A., 2008. Integracja danych pozyskiwanych metodami fotogrametrycznymi i skanowania laserowego przy inwentaryzacji obiektów zabytkowych. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Praca została wykonana w ramach projektu o numerze 11.11.150.949.

**ANALYSIS OF FILTRATION ALGORITHMS OF MOBILE LASER SCANNING
POINT CLOUD IN THE ASPECT OF OBJECT DETECTION**

KEY WORDS: mobile laser scanning, filtering, object detection

Summary

The subject of this paper is detection of railway infrastructure objects based on mobile laser scanning. The first important step, made before proceeding with correct detection, is to remove the measurement noise. In the case of mobile scanning noise is a key issue, since it introduces a large distortion of the measurement data.

In the first part of the article a brief description of the programs in terms of simple geometric filters which both remove noise and carry out simple operations of the classification (for example, the separation of objects spaced by a certain depth).

Object recognition is possible only after the removal of the noise. This is a relatively new problem, opening a wide field for analysis and research. So far several methods have been described for the classification of the mobile data.

Some algorithms based on methods derived from the image processing theory. Scattered cloud of points is stored in a regular grid, the pixel values correspond to the depth or intensity of the laser data. The image-based methods: algorithms using morphological filters and retrieval algorithms. Other methods are based on the detection of objects from the original cloud of points. An example is the method based on RANSAC algorithm.

An analysis of filtering algorithms revealed that mobile laser scanning can be a reliable information source to extract objects.

Dane autora:

Dr inż. Urszula Marmol
e-mail: entice@agh.edu.pl
telefon: 12 617 23 02
fax: 12 617 39 93