

TRANSFORMATA HOUGH'A JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE WYKRYWANIE DACHÓW BUDYNKÓW

HOUGH TRANSFORM AS A TOOL SUPPORT BUILDING ROOF DETECTION

Natalia Borowiec

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH Kraków

SŁOWA KLUCZOWE: transformata Hough'a, chmura punktów, detekcja, płaszczyzna

STRESZCZENIE: Pozyskanie informacji na temat kształtu dachu budynków wciąż jest aktualnym zagadnieniem. Jednym z wielu źródeł, z którego można pozyskać dane dotyczące budynków jest lotniczy skaniny laserowy. Jednak z chmury punktów określenie w sposób automatyczny połączeń dachowych budynków jest zadaniem złożonym. Można to zadanie wykonać wspomagając się dodatkowymi informacjami pochodzącymi z innych źródeł, bądź w oparciu wyłącznie o dane lidarowe.

W niniejszym artykule został przedstawiony sposób wykrycia i określenia połączeń dachu budynku tylko na podstawie chmury punktów. Zdefiniowanie kształtu dachu odbywa się w trzech etapach. Pierwszy etap to znalezienie miejsc występowania budynku, drugi to dokładne określenie krawędzi, natomiast trzeci to wskazanie płaszczyzn dachu. Analiza pseudo-rastra otrzymanego z punktów laserowych, ma prowadzić do określenia miejsca występowania budynku. Zastosowano segmentację przez progowanie jasności (wysokości), która jest jedną z podstawowych metod segmentacyjnych obrazu. Wykorzystane narzędzia do detekcji obszaru zainteresowania (budynku), opierają się na morfologii matematycznej. Na otrzymanych obrazach binarnych wskazywany jest przebieg krawędzi dachu budynku na podstawie linii otrzymanych dzięki wykorzystaniu transformacji Hough'a. Transformacja Hough'a jest metodą detekcji współliniowych punktów, dlatego doskonale pasuje do określenia linii opisujących dach. Do prawidłowego określenia kształtu dachu nie wystarczą tylko krawędzie, ale również konieczne jest wskazanie połączeń dachowych. Zatem w badaniach transformata Hough'a, również posłużyła jako narzędzie do wykrycia płaszczyzn dachu. Z tą różnicą, że zastosowane narzędzie w tym przypadku ma charakter przestrzenny, czyli w formie 3D.

1. WPROWADZENIE

Szybkie pozyskanie informacji przestrzennej na temat obiektów, jak również automatyzacja przetwarzania danych to są obecnie dwa kluczowe zadania w dziedzinie geodezji. Lotniczy skaniny laserowy pozyskuje informację 3D w sposób szybki, z dużą dokładnością i gęstością, dlatego zastosowanie tego typu systemu na terenach zurbanizowanych jest coraz bardziej powszechne. W celu zbudowania modelu miasta 3D niezbędne jest wykonanie dwóch kroków. Pierwszy krok to segmentacja chmury punktów

na odpowiednie klasy: teren, roślinność, budynki. Natomiast drugi krok to proces modelowania budynków. Wyłonienie odpowiednich grup punktów można wykonać poprzez zastosowanie różnych metod filtracji na punktach rozproszonych lub zbudować siatkę regularną i wyłonić miejsca występowania budynków wykorzystując przekształcenia morfologiczne obrazu. Natomiast rekonstrukcję budynku można wykonać stosując jedno z dwóch podejść (ang. *model driven* lub *data driven*) opisywanych w literaturze (Sampath, 2008), (Elberink, 2008). Jedno z podejść bazuje na budowie modelu parametrycznego (ang. *parametric model*), który oparty jest na bibliotece predefiniowanych kształtach dachów. Podejście to w literaturze angielskojęzycznej nazywane jest „*model driven*”. Natomiast drugie podejście polega na budowie modelu nieparametrycznego (ang. *nonparametric model*) i bazuje na określeniu kształtu dachów i budynków z wykorzystaniem chmury punktów. Rozwiązanie to nazywane jest „*data driven*”.

W podejściu „*model driven*” wykorzystuje się założone kształty dachów budynków, które automatycznie dopasowuje się do chmur punktów, pozyskanych ze skaningu laserowego lub automatycznej korelacji obrazów. Modele parametryczne budynków uzyskiwane są poprzez minimalizację różnicy między oczekiwanym, a rzeczywistym modelem opisanym przez punkty laserowe, aż do momentu osiągnięcia optymalnej zgodności modeli (Maas, Vosselman, 1999). Analizowane są wartości parametrów budynku, co umożliwia określenie głównych kątów załamania dachów, nachylenie płaszczyzn dachów, wysokość oraz jego powierzchnię. W rozwiązaniu tym pomocnicze są przyziemia budynków pozyskane z baz danych, które wskażą miejsca występowania budynków. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać model zgodny z rzeczywistym, jednak metoda ta stosowana jest tylko dla budynków o podstawowych i typowych kształtach dachów, występujących na obszarach o rzadkiej zabudowie (Verma *et al.*, 2006).

Podczas budowy modelu nieparametrycznego, w przeciwieństwie do pierwszego podejścia, nie jest definiowany model kształtu dachu, a rozwiązania bazują na pomierzonych danych. W celu określenia szkieletu budynku, wykorzystuje się dużą liczbę danych uzyskaną z gęstej chmury punktów ze skaningu laserowego lub obrazów cyfrowych. W podejściu tym stosowanych jest wiele metod np. rozrost regionów (ang. *region growing*), algorytm RANSAC, czy transformata Hough'a. W niniejszym artykule dokonano próby zastosowania transformaty.

2. DANE

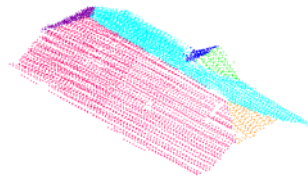
W badaniach wykorzystano dane, które zostały udostępnione przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa. Pomiar lidarowy obejmował obszar miasta Krakowa oraz jego okolice w sumie około 400 km².

Nalot został wykonany w 2006 roku, gdzie wykorzystano śmigłowiec z systemem pomiarowym Fli-Map 400, średnia wysokość trajektorii lotu wynosiła 350 m. Gęstość punktów jest zmienna i waha się w przedziale od 11 do 30 punktów na m². Dodatkowo system pomiarowy dostarczył informację na temat odbicia wiązki laserowej. Zostały zarejestrowane dwa odbicia: pierwsze (ang. *first echo – FE*) i ostatnie odbicie (ang. *last echo – LE*). W efekcie uzyskano informację o wysokości elementów pokrycia terenu, a także dane potrzebne do zbudowania modelu powierzchni topograficznej.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano mały fragment danych (łącznie 36 210 punktów), który obejmował budynek o dachu czterospadowym (rys. 1). Wśród czterech połaci można wyróżnić dwie główne, skierowane w kierunku wschód - zachód, oraz dwie boczne połacie skierowane północ - południe. Na jednej z głównych połaci znajduje się dwuspadowa jaskółka. W celu zobrazowania charakteru dachu, punkty lidarowe zostały ręcznie sklasyfikowane, gdzie kolor odpowiada płaszczyźnie dachu (rys. 2).



Rys. 1. Chmura punktów przedstawiająca budynek poddany analizie. Po lewej: rzut z góry, po prawej: rzut izometryczny



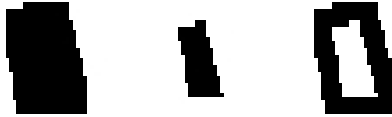
Rys. 2. Sklasyfikowany dach budynku - rzut izometryczny

3. DETEKcja BUDYNKÓW NA DRODZE ANALIZ RASTROWYCH

W celu ułatwienia pola poszukiwań krawędzi i połaci dachowych budynku została przeprowadzona analiza obrazu wysokości. W oparciu o informację na temat ostatniego odbicia wykonano interpolację punktów do siatki regularnej, budując obraz. Powstały obraz posłużył do znalezienia miejsca, gdzie występuje budynek.

Analiza obrazu przebiega następująco: w pierwszym kroku przeprowadzana jest reklasyfikacja, polegająca na ustaleniu wartości progowej. Wartość progowa uzależniona jest od jasności pikseli (czyli wysokości). Pikselom nie spełniającym kryterium przypisywana jest wartość „0”, pozostałe zostają bez zmian. Następnie obszary zainteresowania (budynek) wyszukuje się stosując filtr morfologiczny. W celu usunięcia pikseli reprezentujących roślinność zastosowano operacje zwaną erozją. Erozja stanowi filtr minimalny, który faktycznie usuwa niewielkie skupiska pikseli, ale również zmniejsza pole powierzchni figur. Jednak, aby zachować jak najbardziej wiarygodny kształt budynków i nie zminimalizować jego powierzchni, filtr minimalny powinien zostać zastosowany tylko parokrotnie. Następnie dokonywana jest różnica logiczna dwóch obrazów (pierwszy uzyskany w procesie wejściowym - reklasyfikacji oraz drugi w wyniku erozji), a uzyskany wynik określa wstępne miejsca występowania krawędzi budynku (rys. 3).

Analiza gridowa wskazała miejsca występowania budynku, jak również określiła prawdopodobne położenie krawędzi dachu budynku. Zatem zakres poszukiwań krawędzi został znacznie ograniczony, co znacznie ułatwiło konkretne ich wskazanie.



Rys. 3. Wykryty budynek w wyniku przeprowadzenia analiz gridowych: od lewej: budynek uzyskany po reklasyfikacji, drugi budynek to wynik erozji, trzeci to różnica logiczna dwóch pierwszych obrazów

4. TRANSFORMATA HOUGH'A

4.1. Zagadnienie i zasada działania TH

Transformacja Hough'a (ang. *Hough Transform*) została opracowana przez Paul'a Hough'a w 1962 roku, jako metoda wykrywania wzorców na obrazach binarnych (Hough, 1962). Istota transformacji Hough'a polega na tym, że każda kolejna wartość wejściowa (punkt na płaszczyźnie), dodaje swój wkład do globalnego rozwiązania (element na obrazie, której częścią jest dany punkt). Innymi słowy, przez pojedynczy punkt (x,y) na płaszczyźnie, przechodzi nieskończenie wiele linii prostych, a każda z tych linii może być opisana równaniem:

$$y = mx + b \quad (1)$$

gdzie:

x,y – współrzędne punktu,

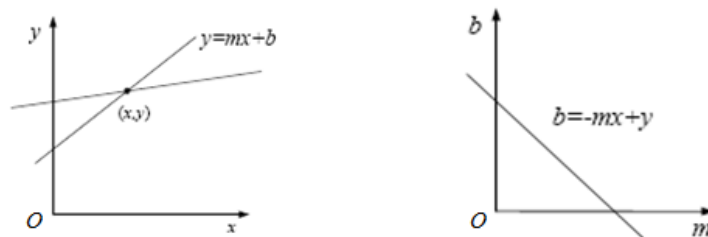
m – tangens kąta, jaki linia tworzy z dodatnią półosią OX ,

b – punkt przecięcia linii z osią OY .

Następnie każdą linię przechodzącą przez punkt (x,y) można przedstawić jako punkt w przestrzeni parametrów m oraz b . W istocie, dla wszystkich linii przechodzących przez ustalony punkt (x,y) istnieje dokładnie jedna wartość b dla danej wartości m .

$$b = y - mx \quad (2)$$

Zatem każdemu punktowi w przestrzeni Oxy odpowiada prosta w przestrzeni Omb , i odwrotnie – każdemu punktowi przestrzeni Omb odpowiada prosta w przestrzeni Oxy (rys. 4).



Rys. 4. Po lewej: punkt na płaszczyźnie, po prawej: prosta odpowiadająca pojedynczemu punktowi

Reprezentacja linii prostych w przestrzeni Omb posiada zasadniczą wadę, a mianowicie w przypadku linii pionowych parametry m i b przyjmują wartość nieskończoną, dlatego linie proste, z wykorzystaniem transformacji Hough'a, reprezentowane są w przestrzeni $O\rho\theta$, gdzie ρ jest to odległość linii prostej od początku układu współrzędnych, a θ to kąt zawarty pomiędzy odcinkiem ρ , a dodatnią półosią OX (Duda, 1972).

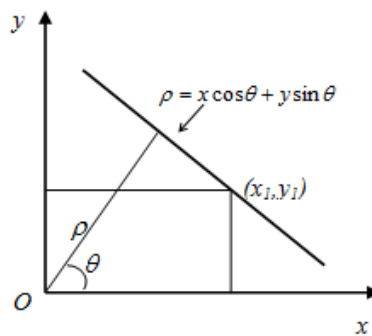
$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

gdzie:

ρ – odległość linii prostej od początku układu współrzędnych,

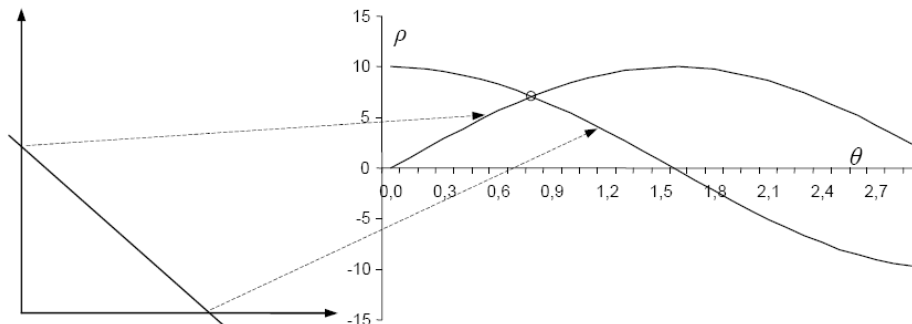
θ – kąt zawarty pomiędzy odcinkiem ρ , a dodatnią półosią OX (rys. 5).

W przypadku analizy obrazów, współrzędne x i y punktu (piksela) w równaniu (3) są stałe, zaś ρ i θ są zmiennymi, gdzie dla każdej kolejnej wartości kąta θ wyznacza się ze wzoru (3), odpowiadającą mu wartość ρ . W rezultacie każdemu punktowi (x,y) – pikselowi, odpowiada w przestrzeni $O\rho\theta$ krzywa sinusoidalna. Jeżeli na obrazie znajdują się dwa lub więcej współliniowych pikseli, to odpowiadające im sinusoidy przecinają się w jednym punkcie. Współrzędne (ρ, θ) tego punktu określają parametry linii, wzdłuż której położone są współliniowe piksele.



Rys. 5. Parametryzacja prostej za pomocą zmiennych ρ oraz θ

Transformacja Hough'a jest implementowana za pomocą podziału ciągłej przestrzeni $O\rho\theta$ na zbiór skończonych komórek, zwanych akumulatorami. Na początku wszystkie komórki tablicy są wyzerowane. Następnie w czasie pracy algorytmu, każdy punkt obrazu jest przekształcany w dyskretną krzywą sinusoidalną w przestrzeni $O\rho\theta$. Obliczane wartości ρ dla ciągu wartości parametru $\theta \in (0, 360^\circ)$, zaznacza się przez wpisanie jedynek w odpowiednie miejsca w tablicy (dodanie wartości jeden, gdy komórka ma liczbę, wpisanie zero, gdy komórka jest pusta). W efekcie, jeśli przez daną komórkę przejdzie wiele sinusoid, to osiągnie ona stosunkowo dużą wartość w porównaniu z sąsiednimi komórkami. W wyniku, czego każdej prostej na obrazie odpowiada lokalne maksimum w przestrzeni $O\rho\theta$. Położenie komórki określają parametry odpowiadającej prostej, zaś jej wysokość odpowiada długości linii.

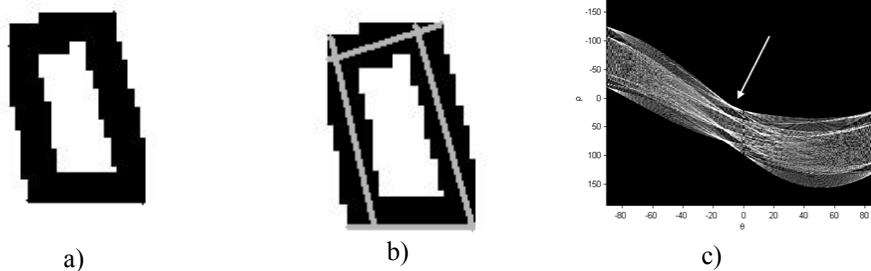


Rys. 6. Dwa współliniowe punkty i odpowiadające im krzywe sinusoidalne w przestrzeni Hough'a

4.2. Zastosowanie TH w wykryciu krawędzi dachu budynku

W badaniach zastosowano nieco udoskonaloną transformację Hough'a (Anagnou, 1993). Transformacja ta, w porównaniu ze standardową transformacją Hough'a, pozwala na określenie i uzyskanie większej rozdzielczości kątowej oraz radialnej znajdujących linii. Równocześnie istnieje możliwość określenia liczby maksimów lokalnych, co w rzeczywistości określa liczbę linii, które mają zostać wykryte (inaczej jest to określenie liczby boków, z których złożony jest dany budynek).

Na obrazie binarnym przedstawiającym obrys budynku zastosowano transformację Hough'a, w celu wyłonienia krawędzi dachu. Na rysunku poniżej (rys. 7) przedstawiono obraz binarny konturu budynku (rys. 7a), odpowiadający mu obraz z wykrytymi odcinkami (rys. 7b) oraz akumulator transformacji Hough'a (rys. 7c).



Rys. 7. a) Obraz binarny przedstawiający kontury budynku, b) obraz binarny obrysu budynku wraz z wykrytymi odcinkami TH, c) akumulator transformacji Hough'a wraz ze wskazaniem maksimów lokalnych odpowiadającym czterem wykrytym odcinkom

4.3. Transformata Hough'a w przestrzeni trójwymiarowej

Wykrycie samych krawędzi niestety nie jest wystarczające do określenia modelu budynku. Niezbędnym elementem są płaszczyzny dachu. Połączenia dachowe zostały

określone w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie chmury punktów. Do analizy wykorzystano tylko te punkty, które odbiły się od powierzchni dachu. Powrót do oryginalnej chmury punktów nastąpił z ograniczeniem do miejsca wykrytego budynku w analizie gridowej. W badaniach dokonano próby zastosowania transformaty Hough'a w przestrzeni 3D do wykrycia płaszczyzn dachu.

Transformata Hough'a może zostać zaimplementowana w przestrzeni 3D, w analogiczny sposób jak w przestrzeni 2D. A mianowicie każdej płaszczyźnie w przestrzeni $OXYZ$ (równanie poniżej) odpowiada dokładnie jeden punkt o współrzędnych (a, b, c) w przestrzeni $Oabc$.

$$z = ax + by + c \quad (4)$$

Podobnie, jeżeli równanie płaszczyzny ma postać:

$$ax + by + c = 0 \quad (5)$$

wówczas płaszczyzna nie może zostać przedstawiona w przestrzeni parametrycznej $(Oabc)$, ponieważ wartość na osi Z wynosi zero. Aby uniknąć tego typu problemów należy zastosować równanie normalne płaszczyzny (6) (Overby *et al.*, 2004):

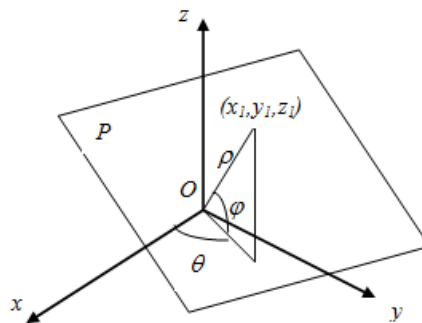
$$\rho = x \cos \theta \cos \varphi + y \sin \theta \cos \varphi + z \sin \varphi \quad (6)$$

gdzie:

ρ – odległość pomiędzy środkiem układu przestrzennego O a punktem,

φ – kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną OXY , a punktem,

θ – kąt zawarty pomiędzy rzutem punktu na płaszczyznę OXY , a osią OX (rys. 8).

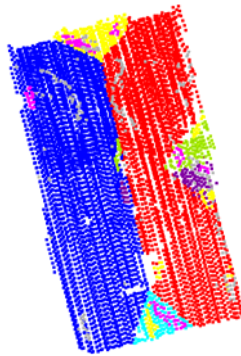


Rys. 8. Schemat przedstawiający rozmieszczenie elementów równania płaszczyzny w postaci normalnej

θ , φ i ρ są to zmienne, gdzie dla każdego kolejnego wartości kątów θ i φ wyznacza się ze wzoru (6), odpowiadającą wartość ρ . W rezultacie każdemu punktowi (x, y, z) w trójwymiarowej przestrzeni $O\rho\varphi\theta$ odpowiada płaszczyzna sinusoidalna.

Zasada działania algorytmu w przestrzeni 3D jest analogiczna do działania w 2D. Przestrzeń $O\rho\varphi\theta$ dzielona jest na woksele, gdzie każdy przyjmuje wartość równą zero. Następnie, każdy punkt z chmury jest przekształcany w dyskretną płaszczyznę sinusoidalną w przestrzeni $O\rho\varphi\theta$. Obliczoną wartości ρ dla ciągu wartości parametrów $\theta \in (0^\circ, 360^\circ)$ oraz $\varphi \in (-90^\circ, +90^\circ)$ zaznacza się przez wpisanie jedynek w odpowiednie miejsca w tablicy przestrzennej. W efekcie, jeśli przez dany woksel przejdzie wiele płaszczyzn sinusoidalnych, to osiągnie on stosunkowo dużą wartość w porównaniu z sąsiednimi wokselaми. Wówczas współrzędne woksela o największej wartości opisują płaszczyznę, do której zaliczają się, wszystkie te punkty lidarowe, na podstawie których wymodelowano wejściowe płaszczyzny sinusoidalne.

Na rysunku poniżej (rys. 9) przedstawiony jest wynik detekcji płaszczyzn dachowych. Kolorystyka opisuje przynależność punktów do odpowiednich płaszczyzn. Widać, że uzyskany efekt nie jest idealny, pojawiają się punkty rozrzucone i nie należące do żadnej istniejącej płaszczyzny. Można powiedzieć, że prawidłowo zostały wykryte dwie główne połacie dachowe, natomiast dwie mniejsze połacie oraz jaskółka dwuspadowa nie najlepiej. W celu poprawy rezultatów należałoby udoskonalić transformatę Hough'a poprzez zwiększenie rozdzielczości kątowej. Jednak w takim przypadku czas przetwarzania danych byłby znacznie większy, oraz pamięć RAM musiałaby być znacznie większa.



Rys. 9. Wykryte płaszczyzny dachu z zastosowaniem transformaty Hough'a 3D

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niniejszy artykuł jest próbą wydobycia informacji na temat budynku w oparciu o transformatę Hough'a. O ile, tą metodą, wykrywanie krawędzi figury jest zagadnieniem znanym i prostym, to wydobycie informacji na temat płaszczyzn nie jest pospolitym rozwiązaniem. Transformata Hough'a w postaci 3D wykorzystuje podstawowe zasady matematyczne, dzięki którym możliwe jest znalezienie zbioru punktów, w który można wpasować płaszczyznę. Warto zaznaczyć, że w metodzie tej szukana jest grupa punktów, która ma reprezentować połacie dachowe. W tym ujęciu, „najlepsza płaszczyzna”, nie oznacza najbardziej prawdopodobną płaszczyznę wpasowaną w chmurę punktów np. metodą najmniejszych kwadratów, ale jest to płaszczyzna, która zawiera najwięcej punktów. Dlatego może się zdarzyć, że zbiór punktów może reprezentować kilka

płaszczyzn. Ponadto, metoda ta jest bardzo obciążona czasowo, ponieważ opiera się na wprowadzaniu i uwzględnieniu trzech zmiennych, a następnie przestrzennej analizie zbudowanych wokseli, w celu wydobywania woksela z największą wartością. Znalezienie woksela o największej wartości (maksimum) odbywa się poprzez obliczenie różnic między sąsiednimi woksalami, dlatego jest to zabieg bardzo czasochłonny i trudny do zautomatyzowania.

W zaproponowanej metodzie wykrywania budynków, na uwagę zasługuje fakt, że wykorzystano to samo podejście matematyczne (TH), ale zastosowane w przestrzeni 2D (do wykrycia krawędzi), oraz w przestrzeni 3D (do wykrycia płaszczyzn).

Wszystkie obliczenia omówione w niniejszym artykule zostały wykonane w środowisku MATLAB (The MathWorks). Badania wykonano w ramach grantu dziekańskiego nr 15.11.150.214/12.

6. LITERATURA

Anagnou A., Blackledge J. M.. Pattern Recognition using the Hough Transform. *Sciences and Engineering Research Centre, De Montfort University, Leicester* 1993.

Borowiec N., Building extraction from ALS data based on regular and irregular tessellations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B6b, p.125 – 132.

Duda R., Hart P. Use of the Hough Transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications ACM*, vol.15, s.11-15, 1972.

Elberink S.O., Problems in automated building reconstruction based on dense airborne laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Commission 3, Pekin 2008.

Hough P., Method and means for recognizing complex patterns. U. S. Patent 3,069,654, 1962.

Maas H.G., Vosselman G.. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), s. 153-163, 1999.

Overby, J., Bodum, L., Kjems, E. and Ilsoe, P. M., 2004. Automatic 3D building reconstruction from airborne laser scanning and cadastral data using Hough transform. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXV, part B3.

Sampath A., Shan J., Building roof segmentation and modeling from LiDAR point clouds using machine learning techniques, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Commission 3, Pekin 2008.

Tarsha – Kurdi F., Landes T., Grussenmeyer P., 2007. Hough-Transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from lidar data. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI, part 3/W52, p. 407-412.

Verma V., Kumar R., Hsu S.. 3D building detection and modeling from aerial LiDAR data, *IEEE*, 0-7695-2597-0/06, 2006.

HOUGH TRANSFORM AS A TOOL SUPPORT BUILDING ROOF DETECTION

KEY WORDS: Hough Transform, cloud of points, detection, plane

Summary

Gathering information about the roof shapes of the buildings is still current issue. One of the many sources from which we can obtain information about the buildings is the airborne laser scanning. However, detect information from cloud o points about roofs of building automatically is still a complex task. You can perform this task by helping the additional information from other sources, or based only on lidar data.

This article describes how to detect the building roof only from a point cloud. To define the shape of the roof is carried out in three tasks. The first step is to find the location of the building, the second is the precise definition of the edge, while the third is an indication of the roof planes. First step based on the grid analyses. And the next two task based on Hough Transformation. Hough transformation is a method of detecting collinear points, so a perfect match to determine the line describing a roof. To properly determine the shape of the roof is not enough only the edges, but it is necessary to indicate roofs. Thus, in studies Hough Transform, also served as a tool for detection of roof planes. The only difference is that the tool used in this case is a three-dimensional.

Dane autora:

Dr inż. Natalia Borowiec
e-mail: nboro@agh.edu.pl
telefon: +48 12 617 23 02