

## RECENZJA

### **Rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Jarząbek-Rychard nt. Modelowanie 3D zabudowy na podstawie danych skaningu laserowego**

#### **1. Przedmiot i cel rozprawy**

Przedmiotem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest opracowanie pełno automatycznej metody rekonstrukcji budynków, w celu trójwymiarowego modelowania zabudowy miejskiej, na podstawie nieuporządkowanego gęstego zbioru punktów, pozyskanego technologią lotniczego skaningu laserowego. Coraz szersze zastosowania przestrzennych modeli miast, o różnym poziomie dokładności i szczegółowości, wymagają opracowania wydajnych metod o wysokim stopniu automatyzacji. Problem automatycznego modelowania zabudowy jest zagadnieniem bardzo złożonym i wymaga opracowania algorytmów dla realizacji wielu pośrednich etapów, dla których muszą być automatycznie stworzone odpowiednie struktury danych oraz ustalone właściwe warunki i wartości progowe parametrów. Od szeregu lat problem automatyzacji dla modelowania zabudowy, był w kręgu zainteresowań wielu badaczy pochodzących z różnych ośrodków naukowych, i zagadnienie to było rozwijane w licznych projektach badawczych. Jednakże pomimo wielu badań w tym zakresie, poziom pełnej automatyzacji całego procesu rekonstrukcji zabudowy nie został jeszcze zadawalająco osiągnięty. Literatura naukowa dotycząca różnych aspektów tego zagadnienia jest bardzo szeroka.

Doktorantka od kilku lat intensywnie śledziła różne podejścia prezentowane przez innych autorów. Jednocześnie sukcesywnie wykonywała szereg zadań badawczych, pozwalających na zapoznanie się z istniejącymi oraz zaprojektowanie nowych narzędzi programowych, dla rozwiązywania składowych etapów modelowania. W efekcie zaimplementowane zostały autorskie algorytmy, umożliwiające automatyczną budowę wirtualnych modeli zabudowy na poziomie szczegółowości LoD2, bazujące wyłącznie na zbiorach danych ALS. Tym samym osiągnięty został postawiony przez doktorantkę cel badań, tj. opracowanie kompletnej automatycznej metody rekonstrukcji od nieprzetworzonej chmury punktów ALS do trójwymiarowych modeli budynków.

#### **2. Główne problemy badawcze – treść merytoryczna**

Rozprawa, o objętości 128 stron, zawiera 7 rozdziałów i spis literatury obejmujący 146 pozycji (136 w języku angielskim, 10 w polskim). W tekście zamieszczono 94 rysunki i 18 tabel.

Cztery rozdziały, od 2 do 5, przedstawiają kolejne etapy modelowania zabudowy, rozdział 6 jest poświęcony ocenie jakości otrzymanych wyników, a w rozdziale 7 zawarte są wnioski końcowe. Wszystkie rozdziały mają podobne układy, tj. w pierwszych częściach, na podstawie bogatej bibliografii, doktorantka zawarła krótkie opisy teoretyczne metod stosowanych przez różnych badaczy. W drugich częściach rozdziałów przedstawiła własne propozycje algorytmów automatycznego rozwiązania kolejnych etapów (bazujących wyłącznie na danych z ALS), częściowo jako modernizację podejść wcześniej stosowanych, a niektóre jako w całości oryginalne propozycje.

Pierwszy etap (rozd. 2) dotyczy automatycznej identyfikacji zabudowy / budynków. Na podstawie przeglądu wielu pozycji literatury, Autorka przedstawia dwie grupy metod dla identyfikacji zabudowy: (1) bazuje na danych przekształconych do postaci 2D obrazu wysokości pikseli, interpolowanych z sąsiadujących wysokości poprzez tzw. *binning*, lub poprzez zastosowanie przekształceń morfologicznych, z użyciem operatorów erozji, dylatacji, otwarcia, zamknięcia; (2) wykorzystuje bezpośrednio opracowanie oryginalnej chmury punktów 3D, gdzie np. za pomocą dwukierunkowego filtra 1D, analizuje się wysokości punktów zlokalizowanych

wzdłuż profili i umożliwia wykrycie dużych zmian nachylenia powierzchni. W celu wyodrębnienia ze zbioru danych grup punktów które nie należą do powierzchni terenu (odrębne budynki), przeprowadza się triangulację Delaunay'a lub stosuje algorytm tzw. ruchomego okna. Innym sposobem identyfikacji budynków w chmurze punktów 3D jest jednoczesna segmentacja całego zbioru punktów na podstawie podobieństwa cech, a następnie klasyfikacja otrzymanych segmentów na budynki i inne obiekty.

Opracowany przez doktorantkę algorytm identyfikacji zabudowy, bazuje na przetworzonym 2D obrazie wysokości pozyskanym w wyniku *binningu*. W etapie przygotowania danych, na rzutowaną na płaszczyznę chmurę punktów nakładana jest siatka GRID o rozmiarze zależnym od gęstości danych. Proces identyfikacji punktów reprezentujących odrębne budynki składa się z trzech etapów: (1) wstępnej identyfikacji maski zabudowy poprzez analizę profili terenu filtrem cztero-kierunkowym działającym w przeciwnych kierunkach, wykrywającym różnice pomiędzy nachyleniem terenu a obiektami wyniesionymi ponad jego powierzchnię (budynki i fragmenty roślinności); (2) zastosowanie algorytmu stosującego operatory erozji morfologicznej w celu usunięcia pozostałej roślinności z wstępnej maski zabudowy; (3) wyodrębnienie zbiorów punktów 3D reprezentujących indywidualne budynki, poprzez odpowiednie grupowanie pikseli, przeprowadzenie dylatacji elementem strukturalnym dla identyfikacji punktów należących do terenu otaczającego budynek i wyznaczeniu wysokości przyziemia, nałożenie uzyskanego obrazu rastrowego 2D na chmurę punktów, w celu identyfikacji tożsamyh z nimi zbiorów punktów 3D.

Drugi etap (rozdz. 3) dotyczy segmentacji danych, w którym zbiór danych wejściowych podlega dekompozycji na segmenty. W oparciu o przegląd literatury, doktorantka analizuje 4 algorytmy segmentacji (w różnych ich odmianach): (1) algorytm rosnących płaszczyzn, w którym punkty grupowane są na podstawie wzajemnych relacji przestrzennych, tworząc poszczególne segmenty tożsame z elementami budynków. Proces dzielony jest na 2 etapy, tj. przygotowanie danych który wymaga ustalenia topologii w zbiorze danych wejściowych oraz iteracyjny proces wykrywania płaszczyzn i grupowania punktów; (2) algorytm klasteryzacji bazujący na założeniu, że najpierw przeprowadzana jest detekcja istniejących potencjalnie obiektów, a następnie punkty są odpowiednio podporządkowywane na podstawie wektora cech w przestrzeni parametrów; (3) algorytm transformacji Hough'a, który podczas przeszukiwania chmury punktów 3D umożliwia wybór płaszczyzny o statystycznym najlepszym dopasowaniu do grupy danych, jednakże przy łączeniu punktów w jeden segment wymagane jest wprowadzanie dodatkowych warunków; (4) algorytm RANSAC umożliwia przeprowadzenie segmentacji zbioru danych zawierających znaczną liczbę błędów grubych, na które jest odporny, czyli punktów nienależących do modelowanego obiektu. Liczne modyfikacje tego algorytmu są stosowane dla realizacji różnych celów w modelowaniu zabudowy.

Autorski algorytm segmentacji opracowany przez doktorantkę jest zmodyfikowaną wersją metody rosnących płaszczyzn. Zbiorem danych wejściowych jest fragment oryginalnego zbioru danych ALS dla wyodrębnionego budynku, zidentyfikowany w poprzednim etapie. Proponowany algorytm zawiera 4 główne zadania: (1) identyfikacja relacji topologicznych, takich jak sąsiedztwo punktów bazujące na geometrycznych relacjach w zbiorze danych 3D. Rozwiązanie identyfikacji zbiorów 'n' najbliższych sąsiadów wymagało opracowania algorytmu bazującego na wykorzystaniu struktury drzew binarnych k-D ; (2) przygotowanie danych, tj. zapewnienie każdemu punktowi w zbiorze niezbędnych informacji dla ich przyporządkowania do określonych segmentów (wskaźniki do 'n' liczby najbliższych sąsiadów, parametry płaszczyzny lokalnej, obliczone miary wpasowania); (3) identyfikacja i rozrost płaszczyzn, poprzedzone ustaleniem warunków segmentacji i wartości progowych parametrów (maksymalnej odległości najbliższego sąsiedztwa  $t_s$ , kąta między wektorami normalnymi punktu i rosnącej płaszczyzny  $\alpha$ , odległości testowanego punktu od rosnącej płaszczyzny  $t_d$ ). Algorytm procesu ekspansji płaszczyzny realizowany jest iteracyjnie na podstawie testowania kolejnych punktów zgodnie z przyjętą hierarchią, która wynika z ustalonych wcześniej relacji topologicznych; (4) łączenie segmentów wymaga identyfikacji komplanarnych segmentów i ich sprawdzenie pod względem wzajemnej orientacji przestrzeni 3D oraz odległości

od środka układu współrzędnych. Opracowany algorytm dostarcza relacji sąsiedztwa między poszczególnymi płaszczyznami dachu, potrzebnych do późniejszej rekonstrukcji 3D budynku.

Trzeci etap (rozdz. 4) dotyczy zadania rekonstrukcji konturów 2D zabudowy, która w przypadku modelowania wyłącznie z danych ALT bazuje na rzutowaniu na płaszczyznę linii obrysu dachu. Metody rekonstrukcji konturów 2D obejmują zazwyczaj trzy etapy, które są rozwiązywane różnymi metodami analizowanymi przez doktorantkę na podstawie literatury: (1) wstępna identyfikacja konturu, jest wykonywana dwoma ogólnymi podejściami, z których pierwsze prostsze i szybsze, bazuje na 2D rastrze wysokości, oraz drugie oparte na nieuporządkowanej chmurze punktów wykorzystują często diagram Voronoi i 2D triangulację Delaunaya, a także algorytm  $\alpha$ -shape lub *ball-pivoting*. W efekcie uzyskane kontury budynków składają się z dużej liczby linii tworzących nieregularny, postrzępiony kształt, będący wynikiem nieregularnego rozmieszczenia punktów z chmury ALT; (2) redukcja krawędzi, czyli zmniejszenie liczby krawędzi np. algorytmem Douglas-Peuckera lub jego modyfikacjami a także skutecznym algorytmem RANSAC; (3) regularyzacja geometrii kształtu, która podlega pewnym określonym zasadom konstrukcyjnym budynków i jest stosowana w większości proponowanych metod. Proces obejmuje wyrównanie orientacji poszczególnych linii a także wstawianie brakujących odcinków wcześniej nie zidentyfikowanych. Wykorzystanie głównej orientacji budynku, która jest definiowana w różny sposób, jest podstawą wielu proponowanych metod, rozwiązywanych zwykle poprzez rozwiązanie iteracyjne.

Autorski algorytm rekonstrukcji konturów budynków jest trzecią zmodernizowaną wersją, opracowaną przez doktorantkę. Podejście składa się z trzech następujących po sobie etapów: (1) identyfikacji punktów krawędziowych wstępnie aproksymujących kontur budynku, do której zastosowano zmodyfikowany algorytm marszu Jarvis'a działający na chmurze 3D. W celu optymalnego skutku poszukiwań kolejnego wierzchołka konturu, przestrzeń została ograniczona do lokalnego obszaru sąsiedztwa (opisanego przez okrąg) o zmiennym rozmiarze dostosowanym do lokalnych zmian gęstości punktów; (2) uproszczenie konturu budynku w celu identyfikacji krawędzi budynku i podział zbioru na odpowiadające im podzbiory, za pomocą opracowanego algorytmu segmentacji punktów pozwalającego na rozpoznanie linii prostych, który realizuje zmodyfikowaną metodę rosnących regionów. Punkty definiujące proste na płaszczyźnie są łączone w segmenty na podstawie podobieństwa atrybutów ( $d, \alpha$ ), dla których określa się wartości progowe; (3) regularyzacja geometrii konturu budynku, bazuje na założeniu regularnej struktury, w której większość linii jest prostopadła lub równoległa do jednego kierunku. Działanie algorytmu polega na wyznaczeniu wpierw głównej linii orientacji budynku i podział prostych na trzy grupy (prostopadłe, równoległe, dowolne), a następnie na wyrównaniu kierunków i obliczeniu równań nowych prostych, łączeniu sąsiadujących linii należących do tej samej grupy oraz przecięciu prostych w celu wyznaczenia współrzędnych wierzchołków końcowego konturu budynku.

Ostatni etap modelowania (rozdz. 5) dotyczy konstrukcji bryły budynku 3D. Wśród wielu metod wyróżnia się 3 podstawowe podejścia: bazujące na wstępnie założonych modelach dachów budynków (model driven); wykorzystujące bezpośrednio dane 3D dla rekonstrukcji (data driven), oraz łączące obydwie podejścia, czyli podejścia hybrydowe. Analiza powyższych podejść przez doktorantkę uwypukliła ich zalety i wady. W odniesieniu do metod model driven, konieczne jest predefiniowanie podstawowych typowych kształtów dachów, do których są dopasowywane dane wejściowe 3D. Podstawową wadą jest generalizacja, która wynika z ograniczenia typów dachów w bazie oraz brak możliwości opisanie skomplikowanych konstrukcji. W metodach bazujących na danych (data driven) płaszczyzny rekonstruowane są wyłącznie na podstawie informacji geometrycznych bez analizy logiczności powiązań z pozostałymi elementami budynku, a więc zależą ściśle od jakości danych wejściowych, które w niektórych przypadkach nie są kompletne lub są błędne. Kompromisem obu podejść są algorytmy hybrydowe (5 z nich jest analizowanych w pracy), które pozwalają łączyć informacje uzyskane na podstawie przetwarzania danych źródłowych z powszechną wiedzą o standardowych kształtach budynków.

Autorski algorytm rekonstrukcji geometrii 3D, opracowany przez doktorantkę bazuje na podejściu hybrydowym, czyli wykorzystane są zarówno dane uzyskane ze zbioru punktów 3D, jak i predefiniowanych modeli parametrycznych, które dodają informacji semantycznych oraz reguł

topologicznych do zbioru danych 3D. Zbiorem danych wejściowych do proponowanego algorytmu są wyniki segmentacji danych, obejmujące podzbiory punktów tożsame ze zidentyfikowanymi płaszczyznami, oraz określone relacje topologiczne charakteryzujące przedstawione segmenty. Przed realizacją algorytmu niezbędne było opracowanie topologicznego schematu budynku oraz biblioteki elementarnych struktur dachów, które dostarczyły wiedzy o kształcie i topologii typowych budynków do automatycznego algorytmu rekonstrukcji. Algorytm obejmuje (1) konstrukcję grafu topologii rekonstruowanego dachu, który jest konieczny dla automatycznego rozpoznawania struktury dachu oraz przypisywania informacji semantycznych do poszczególnych płaszczyzn. Konstrukcja grafu wymaga wyznaczenia linii krawędziowych między sąsiadującymi płaszczyznami oraz nadania im odpowiednich etykiet sąsiedztwa, pozwalających na wyposażenie grafu w atrybuty; (2) rozpoznawanie struktury dachu które pozwala na późniejszą rekonstrukcję zidentyfikowanych elementów i ich odpowiednie połączenie. W podejściu hybrydowym następuje wielokrotne dopasowanie tych samych grafów do różnych częściowo nakładających się struktur, przez co te same płaszczyzny są modelowane wielokrotnie a finalny model nie stanowi topologicznej całości. Aby tego uniknąć, doktorantka zdefiniowała dodatkowe warunki sterujące procesem rozpoznawania struktur; (3) modelowanie struktur elementarnych opracowane zostały w oparciu o powszechną wiedzę o typowych budynkach mieszkalnych i są zapisane w bazie danych. Pomimo, że każdy predefiniowany kształt posiada swój indywidualny schemat modelowania, podlega on kilku wspólnym zasadom rekonstrukcji krawędzi i wierzchołków; (4) konstrukcja modelu 3D która polega na połączeniu zrekonstruowanych indywidualnie struktur elementarnych w jeden kompletny model. Proces ten przeprowadzony jest na podstawie wyznaczonych relacji topologicznych zapisanych w grafie topologii budynku.

Rozdział 6 jest poświęcony ocenie jakości otrzymanych przez doktorantkę wyników. Ocena ta jest podsumowaniem koncepcji i działania opracowanych algorytmów, które zostały podsumowane powyżej tej części recenzji. Testy numeryczne opracowanych algorytmów zostały przeprowadzone na nieprzetworzonych źródłowych danych z ALS, dla 3 obszarów zróżnicowanych urbanistycznie (Vaihingen–dane ISPRS, Świnary, Opole), udostępnionych wraz z referencyjnymi danymi przez 1 międzynarodowy i 2 polskie projekty. Doktorantka przedstawiła charakterystykę kilkunastu parametrów modelowania wraz z automatycznie zdefiniowanymi wartościami progowymi, które zostały przyjęte w proponowanych algorytmach realizujących cztery etapy rekonstrukcji. W ramach oceny jakościowej wyników modelowania 3D na poszczególnych etapach, przeprowadziła szereg testów w celu zbadania różnorodnych aspektów modelowania. W zależności od dostępności danych referencyjnych, wieloaspektowa analiza numeryczna dotyczy oceny wyników pozyskanych na płaszczyźnie (identyfikacja zabudowy i precyzja lokalizacji modeli) oraz wyników określonych w przestrzeni 3D (rekonstrukcji struktur 3D). W obu przypadkach wykonane zostały bardzo szczegółowe analizy tematyczne (2D i 3D) oraz geometryczne (2D i 3D), a ponadto analiza skuteczności rozpoznawania struktur 3D, różnic topologicznych 3D, oraz ocena jakościowa końcowych wyników modelowania 3D zabudowy zwartej. W ocenie przyjęto, zgodnie z stosowanymi przez ISPRS zasadami walidacji, miary jakości: kompletność, poprawność i jakość. Wyniki pozyskiwane przez proponowane algorytmy, porównywano z dostępnymi danymi referencyjnymi zbiorów testów *Vaihingen*, *Świnary* i *Opole*. W zakresie analizy tematycznej 2D, ocena jest przeprowadzona na dwóch poziomach, w odniesieniu do pikseli oraz obiektów (przyziemia, dachy), i większość wyników dotyczy obiektu *Vaihingen*, dla którego były udostępnione adekwatne dane referencyjne z projektu ISPRS. Dla zbioru danych testowych ‘Świnary’ dane referencyjne stanowiła ortofotomapa i przyziemia z bazy TBD i ocena dotyczyła działania algorytmu rekonstrukcji konturów zabudowy. Analiza geometryczna 2D dotycząca oceny dokładności wyznaczenia lokalizacji wykrytych budynków (identyfikacji zabudowy – poligony 2D oraz końcowego usytuowania modeli 3D) wykonana została dla zbioru danych *Vaihingen* i porównana z dostępnymi danymi referencyjnymi. Druga część oceny jakościowej dotyczy dokładności modelowania 3D. Pierwszy test dotyczący określenia skuteczności działania algorytmu automatycznego rozpoznawania struktur 3D wykonano na danych *Świnary* i analiza wyników została oparta o wewnętrzne miary jakości. Analiza tematyczna 3D, dokonana na danych

*Vaihingen*, dotyczyła rekonstrukcji poszczególnych płaszczyzn połączeń dachu w przestrzeni 3D, a wyniki analiz zawierały liczby i powierzchnie płaszczyzn dachów, wskaźniki kompletności i poprawności rekonstrukcji modeli 3D. Analiza geometryczna 3D obejmuje ocenę dokładności wysokościowej, którą wyrażono jako różnicę wysokości między opracowanymi modelami 3D budynków a referencyjnymi uzyskanymi w projekcie ISPRS dla danych *Vaihingen*. Podobne porównanie wykonano dla różnic topologicznych 3D. Ostatnią ocenę jakości wyników wykonano w ramach analizy przydatności algorytmu do celu rekonstrukcji budynków w zabudowie zwartej o nietypowych kształtach dachów, dla historycznej części miasta Opole. Ze względu na bardzo gęstą zabudowę, kontury poszczególnych testowanych budynków pozyskano z bazy ewidencyjnej. Po nałożeniu ich na chmurę punktów, dokonano automatycznej rekonstrukcji 3D. Wyniki porównano z opracowaniem wykonanym przez doktorantkę w trybie manualnym. Analiza wyników wykazała, że w przypadku bardzo nieregularnych typów dachów, proponowana automatyczna metoda hybrydowa nie spełnia wymagań, ze względu na brak w bibliotece tego rodzaju skomplikowanych kształtów dachów.

### **3. Ocena merytoryczna i uwagi szczegółowe**

Całość pracy została opracowana przez doktorantkę bardzo profesjonalnie i wykazała Jej szeroką wiedzę w zakresie realizowanego tematu. Postawiony cel badań, dotyczący opracowania w pełni automatycznej metody rekonstrukcji 3D modeli budynków na podstawie wyłącznie nieprzetworzonej chmury punktów ALS, przystosowanej do budowy modeli zabudowy z dokładnością i szczegółowością na poziomie LoD2, został osiągnięty. Autorka opracowała zarówno podstawy teoretyczne proponowanych podejść oraz autorskie algorytmy dla kolejnych etapów modelowania zabudowy 3D, jak i dokonała bardzo szerokiej, wnikliwej oceny wyników. Dla każdego z czterech etapów rekonstrukcji 3D (zawartych w oddzielnych rozdziałach 2 – 5), doktorantka przyjęła taki sam układ, tj. w pierwszej części przedstawiła i analizowała stosowane podejścia przez innych badaczy, w drugiej części prezentowała swoje propozycje algorytmów. Kolejne etapy modelowania dotyczyły: automatycznej identyfikacji zabudowy; segmentacji danych, w którym zbiór danych wejściowych podlega dekompozycji na segmenty; rekonstrukcji konturów budynków; konstrukcji 3D brył budynków. Dla każdego etapu oddzielnie, doktorantka przeprowadziła bardzo szeroką analizę szeregu prac badawczych prowadzonych w kilku ośrodkach europejskich, oraz publikowanych w wielu aktualnych pozycjach literatury, głównie anglojęzycznej. Tak wnikliwa analiza różnych metod oraz kilkuletnie zdobywanie wiedzy teoretycznej i wcześniejsze doświadczenia praktyczne w zakresie modelowania 3D, pozwoliły Autorce dojrzeć pozytywne i negatywne aspekty różnych stosowanych podejść i w różny sposób wykorzystać w opracowywaniu podstaw autorskich algorytmów. W projektowaniu algorytmów realizujących kolejne etapy, doktorantka zwraca uwagę, na stosowanie podejść które nie są zbyt skomplikowane lecz zabezpieczające relacje topologiczne i geometryczne, jak i umożliwiają uzyskanie wysokiej jakości modeli 3D. W testowaniu poszczególnych algorytmów zwraca uwagę także na dobranie odpowiednich wartości progowych parametrów. Warty podkreślenia jest podjęta przez doktorantkę próba opracowania, dla konstrukcji 3D brył budynków, algorytmu który realizuje podejście hybrydowe, z wykorzystaniem danych przetworzonych ze zbioru źródłowego ALT oraz ich dopasowanie do zbioru elementów predefiniowanych modeli parametrycznych, dodających do zbioru danych 3D informacji semantycznych oraz reguł topologicznych..

Bardzo ważną częścią badań doktorantki była odpowiednia ocena jakości rekonstrukcji 3D, według metod walidacji standaryzowanych przez ISPRS. W tym celu wykonała testy numeryczne dla opracowanych algorytmów, które zostały przeprowadzone na nieprzetworzonych źródłowych danych z ALS, dla 3 obszarów zróżnicowanych urbanistycznie (*Vaihingen*, *Świnary*, *Opole*). Ze względu na kompletność danych, zarówno referencyjnych jak i źródłowych, szczególnie przydatny dla testów numerycznych był obszar '*Vaihingen*', dla którego doktorantka uzyskała wszystkie dane za pośrednictwem Niemieckiego Towarzystwa DGPF w ramach otwartego międzynarodowego projektu testowego ISPRS. We wszystkich prowadzonych testach numerycznych (dla analiz

tematycznych i geometrycznych), wykonywanych na różnych etapach modelowania, dwa kluczowe wskaźniki jakości rekonstrukcji, tj. kompletność i poprawność mieściły się odpowiednio w przedziale 80.4 – 93.4 % i 86.4 – 100 %. Wyniki uzyskane przez doktorantkę są porównywalne z tymi, które uzyskano w ramach testowego projektu ISPRS przez inne jednostki. Co oznacza, że opracowana przez autorkę automatyczna metoda rekonstrukcji 3D jest konkurencyjna do innych opracowanych w ramach projektu metod. Testy numeryczne prowadzone były także dla pozostałych obszarów (Świnary, Opole), jednakże nie tak szczegółowe ze względu na ograniczone dane referencyjne. Istotny wniosek doktorantka wysunęła na podstawie badań prowadzonych dla obszaru historycznej części Opola z budynkami o bardzo nieregularnych kształtach dachów, dla których proponowana automatyczna metoda hybrydowa nie spełnia wymagań, ze względu na brak w bibliotece tego rodzaju skomplikowanych kształtów dachów.

Podsumowując ocenę merytoryczną chcę podkreślić, że poziom wykonanych badań jest bardzo wysoki i wykazuje zarówno odpowiednią wiedzę doktorantki w zakresie tematu, jak i duże Jej zaangażowanie w realizację pracy. Podstawy i zasady modelowania 3D, które zostały odniesione do ponad 140 publikacji innych naukowców, są w pełni adekwatne do postawionego celu pracy oraz badań prowadzonych przez autorkę. Treść pracy jest logiczna i pomimo przedstawiania skomplikowanych problemów związanych z różnymi podejściami modelowania 3D jest przejrzysta. Wyniki poszczególnych etapów są odpowiednio prezentowane w formie licznych klarownych rysunków, wykresów i tabel.

Oceniając inne aspekty przedstawionej do recenzji rozprawy, należy wspomnieć o kilku zauważonych drobnych uchybieniach, które jednak należałoby poprawić w przypadku późniejszego opublikowania pracy w formie monografii:

- w tekście brakuje odniesienia do 12-tu pozycji literatury umieszczonych w spisie bibliograficznym oraz 14-cie pozycji wymienionych w tekście nie znalazło się w spisie;
- str. 26 (dół) brakuje fragmentu zdania; na str. 35 (dół) błąd w nr. rysunku: 3.13→3.12;
- na str.15 błędne odniesienie do nr. rozdziałów.: 2.1.1→2.2.1, 2.1.2→2.2.2, 2.1.3→2.2.3, oraz na str. 64 : 5.11→5.2.1, 5.2.1→5.2.2, 5.2.2→5.2.3, 5.2.3→5.2.4, 5.2.4→5.2.5, 5.2.5→5.2.6;
- w różnych miejscach tekstu istnieją pomyłki dot. opuszczenia, przestawienia, lub nieprawidłowo użytych liter lub słów (str. 1, 2, 3, 11, 13, 14, 15, 16, 26, 38, 42,46)

#### **4. Wniosek końcowy**

Na podstawie wnikliwej analizy przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej, jak również kilku publikacji doktorantki w zakresie badanego przedmiotu, bardzo wysoko oceniam Jej samodzielny wkład w rozwój metod automatycznego modelowania zabudowy 3D.

Wartym podkreślenia jest wysoki poziom wiedzy i umiejętności jaki doktorantka osiągnęła w wielu zakresach nowoczesnych metod, koniecznych dla zrealizowania wieloaspektowych badań, niezbędnych dla opracowania oryginalnej pełno automatycznej metody rekonstrukcji 3D, konkurencyjnej w stosunku do innych badanych w świecie podejść.

Badania prowadzone przez doktorantkę wnoszą istotne wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie metodologii automatycznego modelowania zabudowy 3D i są rozpoznawalne na arenie międzynarodowej. Stwierdzam, że mgr inż. Małgorzata Jarzabek-Rychard wykazała się umiejętnością samodzielnej pracy naukowej. W mojej opinii, zarówno poziom prowadzonych badań, jak i całościowa ich prezentacja w rozprawie doktorskiej zasługują na wyróżnienie.

Recenzja spełnia warunki dla rozpraw doktorskich określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 ze zmianą w Dz. U. z 20005 r. nr 164 poz. 1365).

Wnoszę zatem o dopuszczenie pracy doktorskiej przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu do publicznej obrony.

Aleksandra Dujakiewicz