



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Imię i nazwisko autora rozprawy: **Marek Kulawiak**
Dyscyplina naukowa: **Informatyka**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim:

**Przetwarzanie hydroakustycznych i lidarowych danych przestrzennych
w celu konstrukcji trójwymiarowych modeli rzeczywistych obiektów**

Tytuł rozprawy w języku angielskim:

**Processing of Hydroacoustic and LiDAR Data for Construction
of Three-dimensional Models of Real World Objects**

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
dr hab. inż. Zbigniew Łubniewski, prof. nadzw. PG	dr hab. inż. Marek Moszyński, prof. nadzw. PG

Gdańsk, rok 2019



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Streszczenie rozprawy w języku polskim:

Zautomatyzowana rekonstrukcja kształtu powierzchni reprezentowanych przez chmury punktów jest zagadnieniem badanym od wielu lat, jednak rezultaty osiągnięte za pomocą istniejących algorytmów odtwarzania modeli są dalekie od satysfakcjonujących, jeżeli wejściowe zbiory punktów cechują się nieregularną strukturą przestrzenną, co jest częstym zjawiskiem w przypadku danych pochodzących z sondowania hydroakustycznego czy skaningu laserowego. Sformułowana teza pracy doktorskiej zakładała możliwość uzyskania dokładniejszych modeli badanych obiektów w porównaniu do wyników osiągniętych z użyciem znanych algorytmów, poprzez zastosowanie odpowiedniej kombinacji metod i technik przetwarzania danych wejściowych mających na celu zwiększenie ich poziomu regularności przed zastosowaniem faktycznego procesu odtwarzania kształtu reprezentowanych przez nie powierzchni. W pracy wykorzystano kombinacje różnych sposobów przetwarzania danych przestrzennych pochodzących z różnych źródeł, które zostały przetestowane dla wielu przypadków. Wykazano, że ich zastosowanie ma pozytywny wpływ na jakość odtworzonych modeli. Przedstawione wyniki zastosowania zaproponowanej metodyki pokazują, że wykorzystywane przez nią na różnych etapach procedury pozwalają na uzyskanie dokładniejszych trójwymiarowych modeli badanych obiektów w porównaniu do wyników osiągniętych z użyciem znanych algorytmów.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim:

For many years, the matter of automatic shape reconstruction of objects represented by point clouds has been a subject of intense research. However, the results obtained with the use of known surface reconstruction algorithms are far from satisfactory if the input point clouds are characterized by irregular spatial structure, which is a common case for data acquired by sonar echosounders and laser scanners. The formulated PhD thesis assumed that by using the appropriate combination of methods and techniques of input data processing, dedicated to improving the regularity of their spatial structure before applying the actual process of surface reconstruction, it is possible to obtain more accurate models of researched objects in comparison to the results achieved with the use of known algorithms. Different combinations of spatial data processing were used for various test data obtained from many different sources. It was shown that their application leads to improving the quality of the reconstructed meshes. The presented results, achieved with the use of the proposed methodology, show that the applied procedures, utilized at various stages of data processing, allow to obtain more accurate three-dimensional meshes of the researched objects when compared to the results achieved with the use of known algorithms.



Spis treści

1. Wstęp.....	5
1.1. Wprowadzenie.....	5
1.2. Cele i teza pracy.....	8
1.3. Przegląd zawartości pracy.....	8
2. Przegląd wybranych rozwiązań w zakresie trójwymiarowej rekonstrukcji rzeźby terenu i kształtu obiektów.....	11
2.1. Przetwarzanie danych otrzymywanych z sondowania dna morskiego i obiektów podwodnych.....	11
2.2. Przetwarzanie danych otrzymywanych ze skanowania terenu za pomocą systemów LiDAR.....	16
2.3. Analiza i podsumowanie przeglądu metod.....	19
2.4. Kryteria oceny jakości zrekonstruowanych modeli.....	21
3. Opis danych przestrzennych przetwarzanych w ramach badań.....	27
3.1. Wstęp.....	27
3.2. Dane podwodne.....	27
3.3. Dane naziemne.....	33
3.4. Modele referencyjne.....	37
4. Opis zaproponowanych rozwiązań.....	41
4.1. Wprowadzenie. Koncepcja rozwiązania.....	41
4.2. Symulacja danych źródłowych.....	44
4.3. Wstępne przetwarzanie danych.....	51
4.3.1. Zmodyfikowany filtr maksymalny.....	52
4.3.2. Algorytm siatki.....	57
4.3.3. Generowanie nowych punktów w zbiorze danych.....	60
4.4. Detekcja i klasyfikacja obiektów.....	61
4.4.1. Dane podwodne.....	62
4.4.2. Dane naziemne.....	67



4.5. Algorytm kostki.....	70
4.6. Rekonstrukcja trójwymiarowych modeli.....	74
4.6.1. Wstęp.....	74
4.6.2. Rekonstrukcja w przestrzeni dwuwymiarowej.....	75
4.6.3. Rekonstrukcja w przestrzeni trójwymiarowej.....	82
4.7. Określanie jakości odtworzonych modeli.....	83
4.8. Optymalizacja złożoności modeli.....	85
5. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów.....	87
5.1. Modele odtworzone metodą siatki.....	87
5.2. Modele odtworzone metodą kostki.....	93
5.3. Wyniki optymalizacji złożoności modeli.....	116
5.4. Testy wydajności zaproponowanych metod przetwarzania.....	120
6. Opracowane i wykorzystane narzędzia.....	123
7. Podsumowanie.....	125
7.1. Weryfikacja tezy pracy.....	125
7.2. Główne osiągnięcia pracy.....	126
Słownik pojęć.....	130
Wykaz oznaczeń.....	131
Bibliografia.....	133
Spis rysunków.....	142
Spis tabel.....	150

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Technologie sondowania z użyciem fal akustycznych oraz technologie skanowania laserowego stanowią wydajne i powszechnie wykorzystywane źródło informacji dotyczące rzeźby terenu i kształtu różnorodnych obiektów [1] w odniesieniu do pomiarów podwodnych [2,3] i naziemnych [4]. W badaniach dotyczących morskiego środowiska podwodnego często stosowane są echosondy jedno- i wielowiązkowe [5–8], sonary boczne [9,10] oraz kamery akustyczne [11], natomiast w przypadku pozyskiwania danych lądowych coraz powszechniejsze staje się wykorzystanie technologii LiDAR (Light Detection And Ranging) [12–14] poprzez automatyczne skanowanie badanego obiektu przy użyciu wielkiej ilości emitowanych wiązek. Uzyskane za pomocą wspomnianych technik dane przestrzenne o rzeźbie terenu oraz występujących w nim obiektach mają szeroki zakres zastosowań. W przypadku danych dotyczących środowiska podwodnego przykładowe zastosowania obejmują:

- pozyskiwanie informacji na temat dna morskiego istotnych z punktu widzenia bezpiecznej nawigacji [15], np. monitoring torów wodnych oraz rejonów niebezpiecznych dla żeglugi, detekcja miejsc wymagających pogłębienia itp.,
- wybór oraz monitoring lokalizacji instalacji podwodnych, takich jak platformy wiertnicze, podwodne rurociągi [16], elektrownie pływowe [17] itp.,
- pozyskiwanie informacji o topografii dna morskiego w celu tworzenia map w dużym zakresie skali oraz budowy zintegrowanych baz danych o ekosystemach morskich i ich komponentach, np. habitatach przydennych [18],
- archeologię morską [9] w zakresie poszukiwania, detekcji i badania obiektów podwodnych pochodzenia antropologicznego, w szczególności wraków i szczątków statków, w tym analizę ich obrazów i wizualizację w przestrzeni trójwymiarowej,
- rozwój metod i narzędzi opartych na wykorzystaniu danych opisujących trójwymiarową rzeźbę dna morskiego do numerycznego modelowania różnorodnych zjawisk zachodzących w toni wodnej, jak np. prądy morskie, pływy, rozprzestrzenianie się fal tsunami [19] itp.,
- poszukiwania złóż i badania geologiczne dna morskiego,

- badania dynamiki mórz i oceanów [17],
- modelowanie procesów hydrologicznych (takich jak prądy wodne) zachodzących w pobliżu wraków statków, w celu przewidywania rozprzestrzeniania się szkodliwych substancji pochodzących z wraków w ekosystemie morskim,
- inne badania, w tym w monitorowanie i wizualizacja zanieczyszczeń środowiska morskiego [20,21].

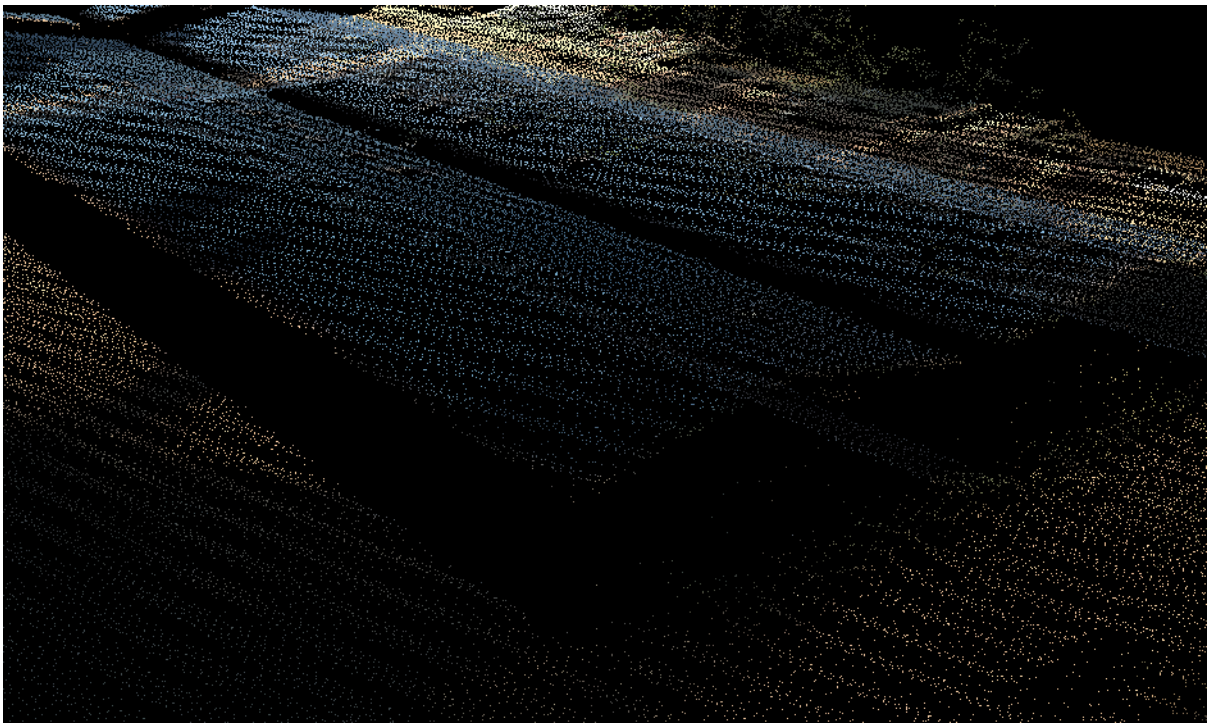
W przypadku przetwarzanych danych dotyczących terenów lądowych, przykładowe zastosowania są następujące:

- tworzenie szczegółowych trójwymiarowych map topograficznych,
- modelowanie różnorodnych procesów i zjawisk w odniesieniu do danego terenu (gdy potrzebne są dane o jego rzeźbie oraz topografii w formie brył budynków lub innych obiektów), takich jak zagrożenia (powódzie i rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń) w obszarach miejskich [22] czy przewidywanie dokładności działania systemów nawigacji satelitarnej z uwzględnieniem zasłaniania satelitów przez wysokie budynki i wielodrogowości propagacji sygnału [23],
- odtwarzanie szczegółowych cyfrowych modeli przedstawiających zabytki architektoniczne [24,25], z umożliwieniem ich późniejszej renowacji w przypadku uszkodzenia lub zniszczenia,
- zastosowanie w systemach informacji przestrzennej, np. w ochronie infrastruktury krytycznych [26], oraz w systemach trójwymiarowej wizualizacji terenu dla różnych celów, np. do wspomagania szkoleń służb ratowniczych poprzez symulację działań w danym rzeczywistym terenie [27], a także tworzenie interaktywnych trójwymiarowych map obszarów miejskich i udostępnianie ich turystom.

Dane przedstawiające rzeźbę badanej powierzchni, otrzymywane zarówno w przypadku sondowania dna morskiego sonarem wielowiązkowym czy skanowania terenu lądowego urządzeniem LiDAR, mają na ogół formę zbioru osobnych, nieregularnie rozmieszczonych w trójwymiarowej przestrzeni i nie związanych ze sobą punktów – tak zwanej chmury punktów (ang. *point cloud* [28]). Ten model danych ma znane wady z punktu widzenia wielu zastosowań oraz efektywności dalszego przetwarzania:

- niektóre elementy, takie jak niewielkie obiekty, mogą być trudno wyróżnialne w danych opisanych za pomocą chmur punktów, w przeciwieństwie do danych reprezentowanych przez inne struktury geometryczne, takie jak wielokąty,

- w przypadku zbiorów danych charakteryzujących się niską gęstością punktów ich czytelność może być zapewniona tylko w przypadku oglądania ich z konkretnych punktów widzenia,
- aby poszczególne elementy były rozróżnialne, muszą się one składać z odpowiednio dużej liczby punktów (Rys. 1), co jest nieoptymalnym rozwiązaniem w przypadku danych opisujących płaskie powierzchnie (takie jak dachy czy ściany typowych budynków), gdyż niepotrzebnie zwiększa ono wymagania dotyczące zasobów dyskowych i pamięciowych.



Rys. 1. Gęsta chmura punktów reprezentująca budynek o stosunkowo prostej strukturze geometrycznej

W kontekście powyższych zastosowań, odpowiedniejsze są modele przestrzenne obiektów w formie powierzchni składających się z płaskich fragmentów, np. z trójkątów (sieci TIN, ang. *triangulated irregular network* [29]), bądź innych figur geometrycznych. Co więcej, wiele badanych i obrazowanych obiektów (np. płaskie ściany dużych budynków, obszary płaskiego dna morskiego) ma kształt bardzo regularny i jego odtworzenie w postaci modeli trójwymiarowych brył skutkuje uproszczeniem ich reprezentacji, także pod względem zajętości pamięci i efektywności działania algorytmów przetwarzających na dalszym etapie czy wizualizujących tego rodzaju dane.

1.2. Cele i teza pracy

Głównym celem niniejszej pracy doktorskiej było opracowanie nowej metodyki przetwarzania nieregularnych danych przestrzennych pozwalającej na poprawę otrzymywanych wyników w zakresie trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu obiektów rozumianą jako zwiększenie otrzymywanej dokładności ich odwzorowania przy jednoczesnym lokalnym dostosowaniu poziomu złożoności uzyskanego modelu, co skutkować będzie zwiększeniem efektywności reprezentacji oraz dalszego przetwarzania danych wynikowych. Kolejnym celem było przeprowadzenie weryfikacji zaproponowanej metodyki z użyciem różnorodnych danych pochodzących z sondowania hydroakustycznego oraz ze skanowania laserowego.

Teza pracy doktorskiej została sformułowana następująco:

Poprzez zastosowanie odpowiedniej kombinacji metod i technik przetwarzania nieregularnych danych przestrzennych pochodzących z sondowania hydroakustycznego lub skaningu laserowego możliwe jest uzyskanie dokładniejszych, a jednocześnie mniej złożonych trójwymiarowych modeli badanych obiektów w porównaniu do wyników osiąganych z użyciem znanych algorytmów.

1.3. Przegląd zawartości pracy

Rozdział 2. niniejszej rozprawy zawiera szczegółowy przegląd istniejących metod odtwarzania trójwymiarowego kształtu rzeźby terenu i różnorodnych obiektów. Uwzględniony jest w nim podział powyższych rozwiązań ze względu na rodzaj wykorzystywanej technologii pozyskiwania danych, a także środowisko którego dotyczą wykonywane pomiary. Rozdział ten obejmuje również przegląd znanych algorytmów służących do rekonstrukcji modeli na podstawie chmur punktów, a także opisuje mocne i słabe strony każdego z nich. Rozdział zakończony jest przeglądem istniejących metod porównywania jakości wyników otrzymywanych za pomocą poszczególnych algorytmów rekonstrukcji modeli, które stanowią jednocześnie podstawę dla metryk porównawczych stosowanych w celu weryfikacji tezy postawionej w niniejszej pracy doktorskiej.

W rozdziale 3. opisane są wykorzystane w ramach badań dane przestrzenne, z uwzględnieniem struktury opisujących je plików oraz źródłami ich pochodzenia. Przedstawiony opis obejmuje również podstawowe podobieństwa i różnice zachodzące pomiędzy danymi pochodzącymi z różnych środowisk.

Rozdział 4. stanowi najważniejszy element pracy, gdyż zawiera on szczegółowy opis wszystkich rozwiązań zaproponowanych w ramach niniejszej rozprawy. Rozdział ten zaczyna się od uproszczonego schematu ilustrującego poszczególne etapy przetwarzania danych wejściowych. Następnie omówiony jest proces generowania dodatkowych danych testowych za pomocą stworzonego w tym celu Symulatora Skanera. Dalsza część rozdziału opisuje wstępne przetwarzanie danych, polegające na zwiększeniu poziomu regularności ich struktury przestrzennej za pomocą metod służących do usuwania zniekształceń, generowania nowych punktów, a także rasteryzacji. Następnie omówione są dalsze etapy przetwarzania danych, obejmujące m.in. takie operacje jak detekcję i klasyfikację obiektów. W kolejnej części rozdziału opisane są algorytmy służące do rekonstrukcji trójwymiarowych modeli na podstawie danych przetworzonych za pomocą ww. metod. Następnie omówione są przyjęte w niniejszej pracy metryki służące do określenia jakości modeli odtworzonych za pomocą proponowanych rozwiązań oraz porównania ich z istniejącymi metodami rekonstrukcji kształtu. Na końcu rozdziału poruszono zagadnienie upraszczania końcowego kształtu otrzymanych modeli w celu dostosowania do różnych możliwości sprzętowych.

W rozdziale 5. zawarte są rezultaty działania poszczególnych rozwiązań opisanych w rozdziale 4. na przykładowych, zróżnicowanych zbiorach danych. Otrzymane w ten sposób wynikowe modele są następnie porównane z bryłami uzyskanymi za pomocą istniejących algorytmów odtwarzania kształtu, a także wymienione są zalety i wady poszczególnych metod, uwzględniając przy tym wyniki zastosowania zaproponowanych metryk porównawczych. Oprócz tego w rozdziale tym przedstawiono także wyniki uproszczenia kształtu końcowych modeli w sposób pozwalający na zachowanie ich najważniejszych elementów. Na końcu rozdziału zamieszczono wyniki testów wydajności zaproponowanych metod przetwarzania danych.

W rozdziale 6. w sposób skrótowy wymieniono najważniejsze narzędzia wykorzystane podczas pracy, uwzględniając również te, które zostały stworzone specjalnie na potrzeby przeprowadzonych badań.

Rozdział 7. stanowi podsumowanie rozprawy i zawiera on weryfikację postawionej tezy, a także podkreślone są w nim najważniejsze osiągnięcia pracy. Oprócz tego wymienione są w nim przykłady praktycznego zastosowania opracowanych rozwiązań.

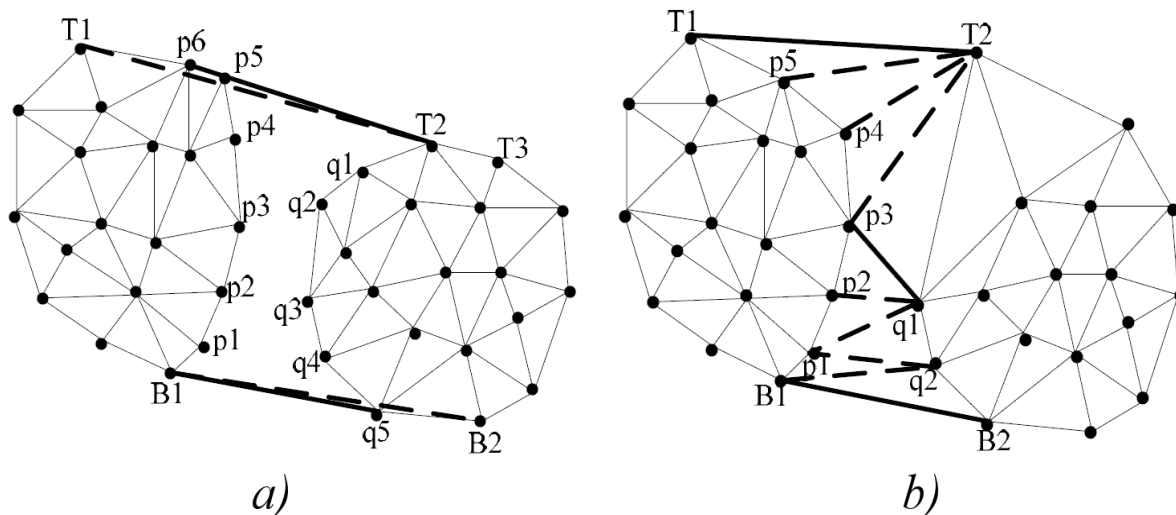
2. Przegląd wybranych rozwiązań w zakresie trójwymiarowej rekonstrukcji rzeźby terenu i kształtu obiektów

2.1. Przetwarzanie danych otrzymywanych z sondowania dna morskiego i obiektów podwodnych

Istnieje wiele rozwiązań pozwalających na odtwarzanie w trzech wymiarach kształtu dna morskiego i obiektów podwodnych, które mogą być wykorzystywane dla danych pozyskanych za pomocą echosond wielowiązkowych czy sonarów bocznych. Co więcej, komercyjne oprogramowanie takie jak Kongsberg Seafloor Information System (SIS) [30] czy QINSy Software [31] do pewnego stopnia również wspiera taką funkcjonalność dla danych podwodnych. Niestety, zastosowane w nich podejścia opierają się głównie na prostym generowaniu modeli TIN (bądź innych struktur geometrycznych) z bezpośrednim użyciem nieprzetworzonych chmur punktów, co często powoduje występowanie licznych artefaktów i w konsekwencji skutkuje powstawaniem rezultatów o stosunkowo niskiej jakości.

Próby odtwarzania wyższych struktur geometrycznych z danych pozyskanych za pomocą echosond wielowiązkowych nie są powszechnie opisywane w literaturze naukowej. Bikonis, Moszyński i Stepnowski [3] przedstawili metodę tworzenia modeli 3D na podstawie danych wielowiązkowych za pomocą następującej techniki. Stosując ustaloną wartość progową dla maksymalnej odległości pomiędzy poszczególnymi punktami w ich chmurze otrzymanej z pomiaru, wykrywano zgrupowania punktów mogących potencjalnie przynależć do tej samej powierzchni (krawędzi lub ściany). Następnie tworzono zbiór powierzchni złożonych z nieregularnych trójkątów stosując dedykowaną metodę triangulacji nie łącznie dla wszystkich punktów, tylko osobno dla zgrupowań wykrytych w powyższy sposób.

Lu, Li, Wei i Shen wykorzystali dane batymetryczne z echosondy wielowiązkowej aby uzyskać cyfrowy model dla dużego obszaru dna morskiego za pomocą triangulacji Delaunaya [32]. Istotą ich rozwiązania było podzielenie danych wejściowych na niezależne sektory, wygenerowanie odtworzonej bryły dla każdego z nich, a następnie połączenie otrzymanych modeli w zintegrowaną sieć trójkątów. Na Rys. 2a) przedstawiono dwie sąsiadujące ze sobą sieci trójkątów, natomiast na Rys. 2b) pokazano końcowy efekt połączenia ich w jedną bryłę.

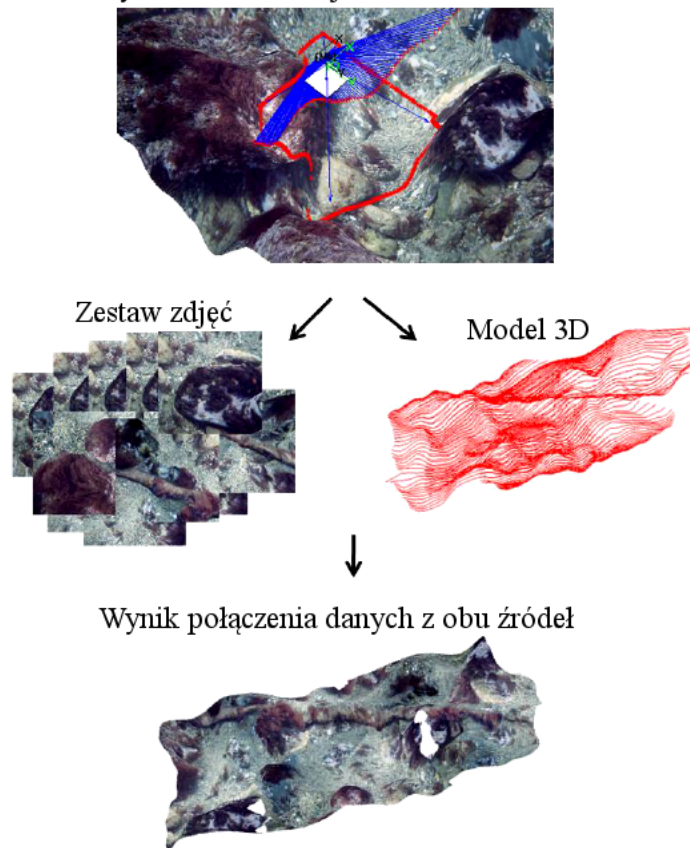


Rys. 2. Przykład scalenia dwóch sąsiadujących ze sobą sieci trójkątów [32]

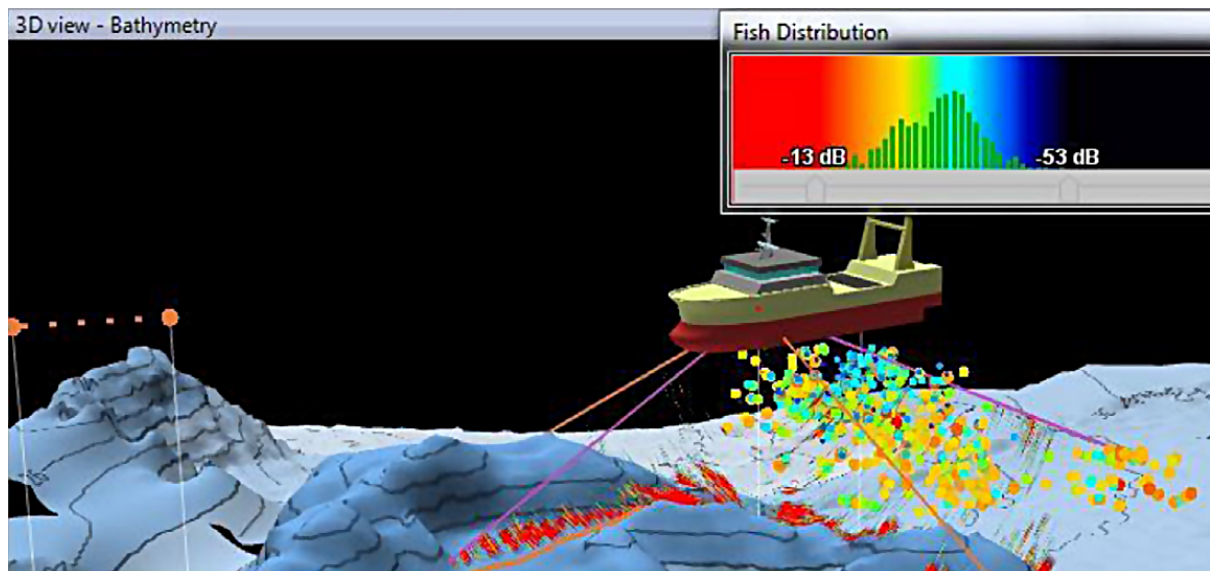
Hurtós, Cufi i Salvi zaproponowali system trójwymiarowej rekonstrukcji podwodnych scen oparty na integracji danych pozyskanych przez różne rodzaje sensorów. Stworzone przez nich rozwiązanie opiera się na równoległym zastosowaniu echosondy wielowiązkowej w celu pozyskania danych przestrzennych oraz aparatu fotograficznego wykonującego zdjęcia z podobnej perspektywy, pozwalając w ten sposób na uzyskanie oteksturowanych modeli dna. Ograniczeniem tego systemu jest konieczność każdorazowej kalibracji aparatu za pomocą odpowiedniego obrazka (np. szachownicy), który musi być umieszczony pod wodą w obrębie obszaru który ma zostać zbadany. Na Rys. 3 przedstawiono uproszczony schemat działania systemu, w oparciu o dane pozyskane podczas symulacji wykonanej przez autorów rozwiązania [33].

Mosca, Matte, Lerda, Naud, Charlot, Rioblanc i Corbières zbadali możliwości nowo opracowanego modelu echosondy SEAPIX. Omawiana echosonda pozwala na pozyskiwanie i wyświetlanie w czasie rzeczywistym takich informacji jak wykryte punkty pochodzące z poszczególnych sondowań, dane batymetryczne, a także kształt dna morskiego. Autorzy przetestowali możliwości echosondy m.in. pod kątem stworzenia kontekstowej, trójwymiarowej reprezentacji ławic ryb w celu dostarczenia zbiorczej informacji dotyczących obszarów połowowych [34]. Na Rys. 4 przedstawiono wizualizację fragmentu dna morskiego otrzymaną za pomocą echosondy SEAPIX, która łączy ze sobą powyższe informacje.

Pozyskanie informacji o obrazie i kształcie



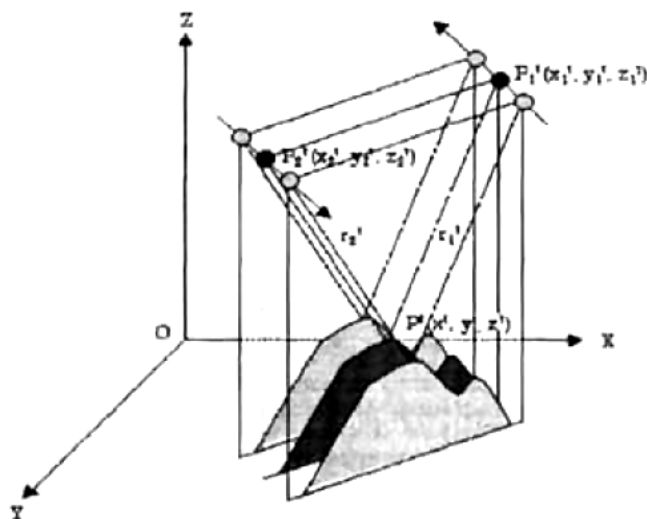
Rys. 3. Schemat tworzenia oteksturowanego modelu dna morskiego na podstawie danych pochodzących z kamery oraz echosondy wielowiązkowej [33]



Rys. 4. Wizualizacja fragmentu dna morskiego, obejmująca aktualne położenie statku, ukształtowanie terenu, a także miejsca występowania ławic ryb [34]

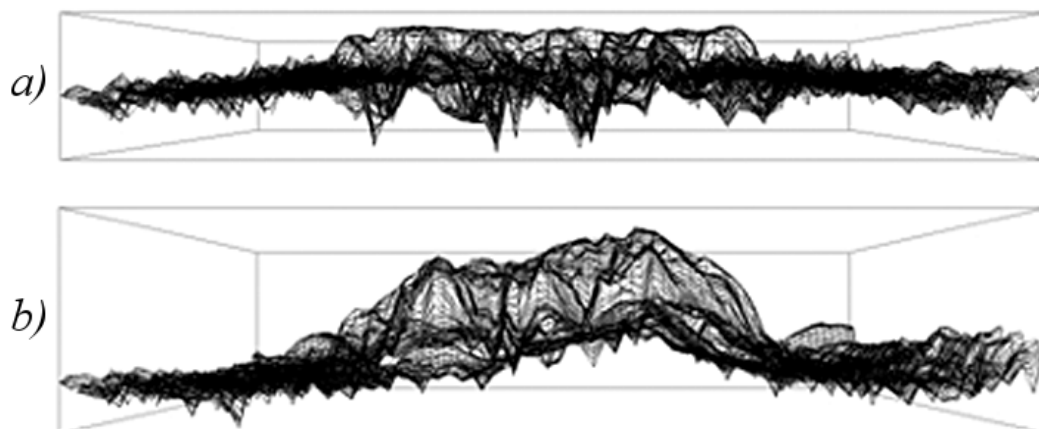
W przypadku odtwarzania kształtu obiektów podwodnych na podstawie danych

pozyskanych za pomocą sonarów bocznych, dostępna literatura naukowa jest zdecydowanie bardziej obszerna. Lu i Oshima zaproponowali metodę rekonstrukcji trójwymiarowego kształtu dna morskiego w oparciu o rejestrację zestawów zdjęć wykonanych pod różnym kątem, a następnie porównywanie ich zawartości i generowaniu modeli 3D z wykorzystaniem techniki stereoskopii [35]. Zaproponowana przez nich metoda opiera się na kilku etapach przetwarzania. Pierwszy etap polega na ustaleniu aktualnego położenia sonaru w przestrzeni trójwymiarowej za pomocą urządzenia wyposażonego w GPS. W kolejnym kroku następuje odpowiednie przycięcie obrazów otrzymanych za pomocą sonaru. Następnie przycięte obrazy są dobierane w pary w taki sposób, żeby każdy z nich przedstawiał ten sam obiekt ujęty z różnych perspektyw, umożliwiając w ten sposób wygenerowanie jego modelu. Stworzone rozwiązanie zakłada łączenie ze sobą obrazów pozyskanych z równoległych do siebie torów ruchu (Rys. 5).



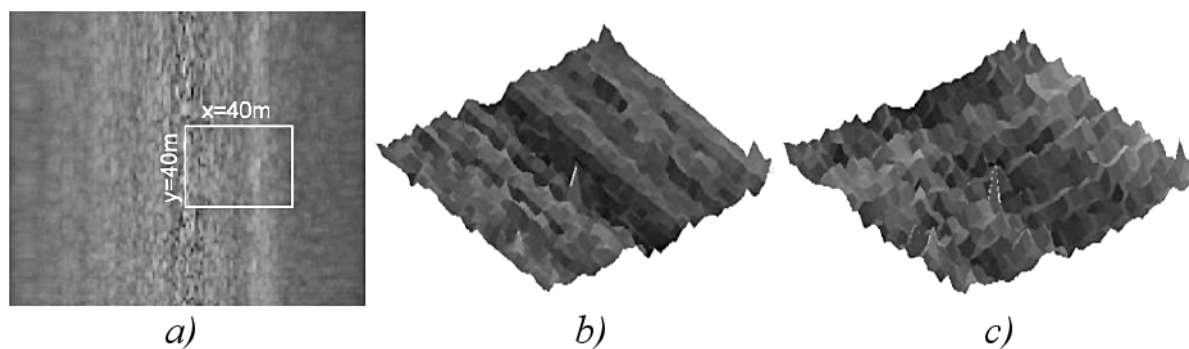
Rys. 5. Zestaw obrazów z sonaru bocznego pozyskanych z równoległych do siebie torów ruchu [35]

Coiras i Petillot przedstawili metodę dokładnej estymacji głębokości poszczególnych punktów dna morskiego, opierając swoje obliczenia na odbiciach lambertowskich oraz zastosowaniu schematu odwrotnego [36]. Oprócz zastosowania techniki *shape from shading* [37], autorzy wykorzystują dodatkowy zestaw operacji mający na celu dokładniejsze oszacowanie kształtu poszczególnych fragmentów dna, stosując przy tym metody wyznaczania ich kształtu na różnych poziomach dokładności oraz metody statystyczne mające na celu dobór najbardziej prawdopodobnych wartości poszczególnych parametrów. Stworzone przez nich rozwiązanie pozwala na zwiększenie dokładności odwzorowania kształtu dna morskiego przez wygenerowane modele (Rys. 6).



Rys. 6. Porównanie wyników odtworzenia kształtu dna morskiego metodą prostą (a) oraz z wykorzystaniem dodatkowych operacji zwiększających dokładność oszacowania głębokości poszczególnych punktów (b) na podstawie danych z sonaru bocznego [36]

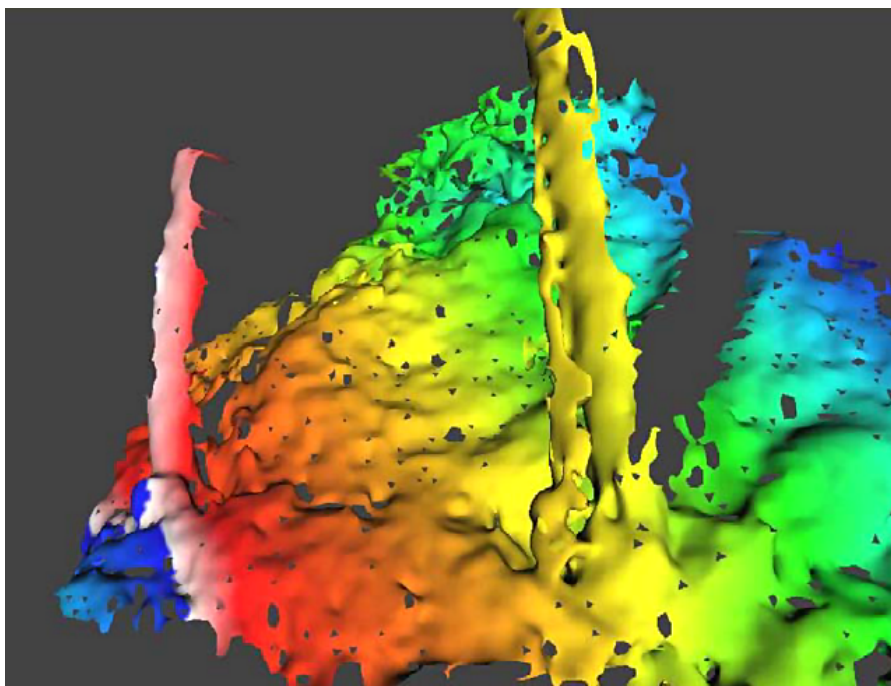
Podobne podejście zostało zastosowane przez Bikonisa, Moszyńskiego i Łubniewskiego z wykorzystaniem metody *shape from shading* w celu szacowania lokalnego gradientu wysokości dla dna morskiego, gdzie wiedzę nt. kątowych zależności własności rozpraszających dna uzyskuje się poprzez każdorazową analizę fragmentów obrazu sonarowego odpowiadającego płaskim elementom tego dna, a także z wykorzystaniem wielkości wykrytych obszarów cienia w bieżącej estymacji wysokości elementów obiektów [38]. Poprawność tego podejścia została zweryfikowana poprzez porównanie wynikowego modelu z modelem powstałym na podstawie danych pochodzących z echosondy wielowiązkowej (Rys. 7).



Rys. 7. Wizualizacja fragmentu dna morskiego: obraz uzyskany z echosondy wielowiązkowej (a), model uzyskany na podstawie obrazu z echosondy wielowiązkowej (b), model uzyskany za pomocą omawianej metody na podstawie danych z sonaru bocznego (c) [38]

Dawniej stosowano również inne rodzaje sprzętu akustycznego dla rekonstrukcji kształtu środowisk podwodnych. Przykładowo, Castellani, Fusiello, Murino, Papaleo, Puppo i Pittore opisali kompletny system trójwymiarowej rekonstrukcji podwodnych scen w czasie

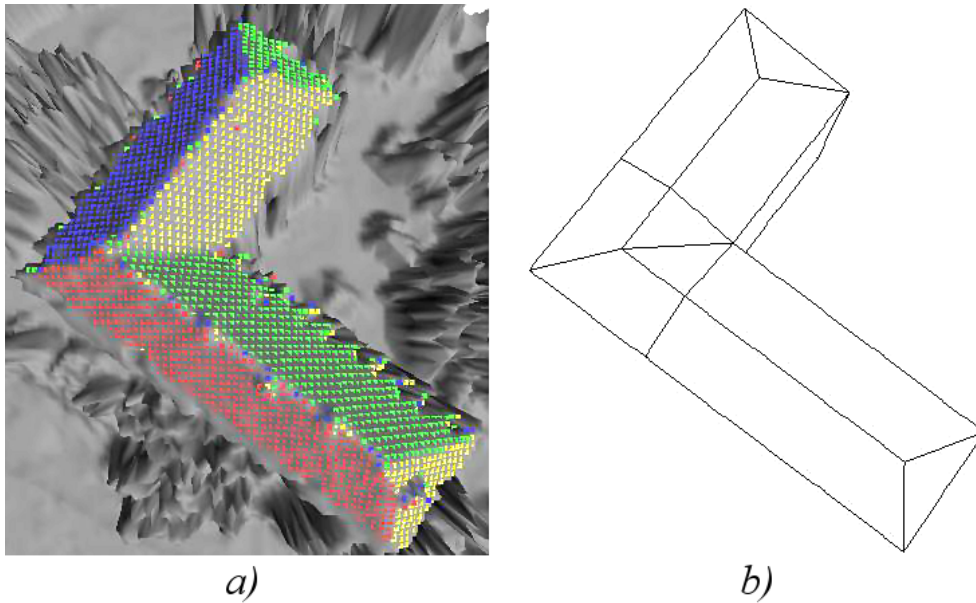
rzeczywistym opartej na wykonywaniu serii zdjęć za pomocą aparatu akustycznego [11]. Jak pokazano na Rys. 8, zaproponowany przez nich system pozwalał na odtwarzanie modeli o stosunkowo niskim poziomie złożoności w porównaniu do tych, jakie można uzyskać w dzisiejszych czasach.



Rys. 8. Model fragmentu okrętu, odtworzony na podstawie zdjęć z aparatu akustycznego [11]

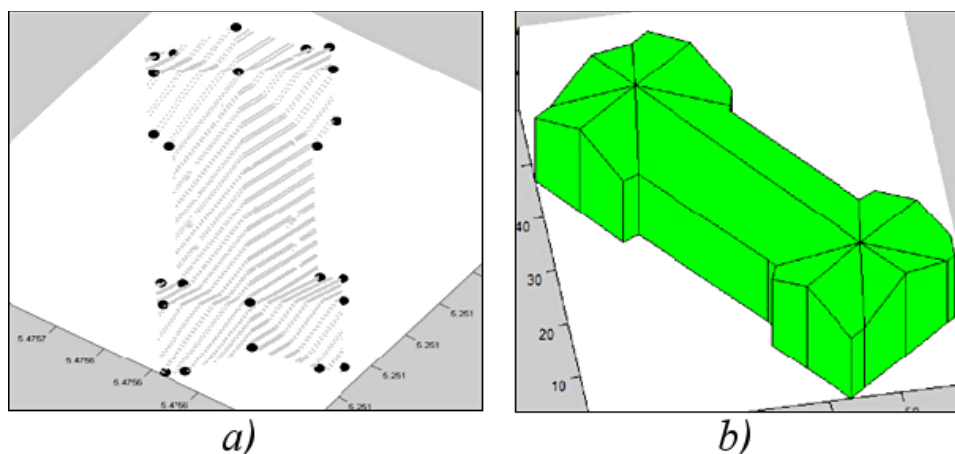
2.2. Przetwarzanie danych otrzymywanych ze skanowania terenu za pomocą systemów LiDAR

W przypadku obszarów naziemnych, stosowane rozwiązania służące trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu badanych obiektów zazwyczaj są oparte na danych pozyskanych za pomocą urządzeń LiDAR. Przykładowo, Kada i McKinley opracowali metodę odtwarzania kształtu budynków opartą na konstruowaniu uproszczonych modeli poprzez łączenie ze sobą brył pochodzących z odpowiednio przygotowanych zestawów standardowych kształtów [39]. Zaproponowane przez nich rozwiązanie wykorzystuje specjalny algorytm partycjonowania obiektów w dwuwymiarowej przestrzeni, który rozdziela obszar każdego wykrytego budynku na mniejsze, nienakładające się na siebie fragmenty. Następnie dobierane są odpowiednie bryły, które w możliwie największym stopniu wpasowują się w kształt danego fragmentu (Rys. 9). Oprócz chmur punktów pozyskanych za pomocą urządzeń LiDAR, omawiany system wykorzystuje także istniejące plany naziemne.



Rys. 9. Punkty LiDAR pokolorowane wg wykrytych płaszczyzn a)) oraz zestaw brył złożonych w uproszczony model (b) reprezentujący wykryty budynek [39]

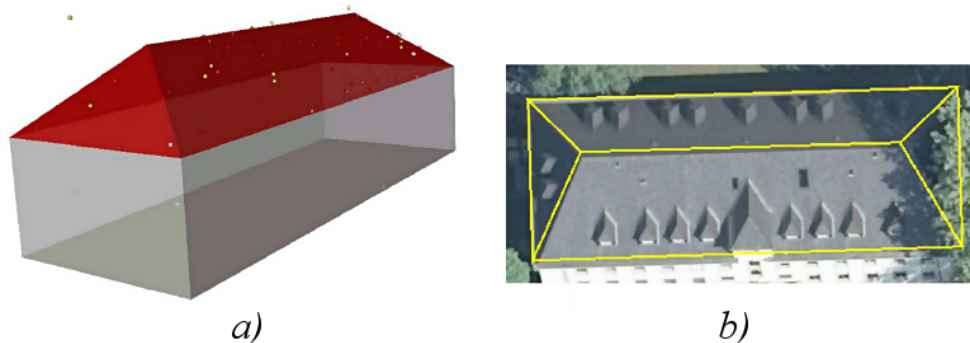
Kim i Shan zaproponowali podejście oparte na odtwarzaniu kształtu budynków, skupiając się głównie na kształcie ich dachów. W uproszczeniu, stworzone przez nich rozwiązanie obejmuje segmentację każdego dachu na zgrupowania punktów o zbliżonych do siebie normalnych. W następnym kroku na podstawie powyższych grup punktów stworzone zostają reprezentujące je płaszczyzny. Ostatni etap obejmuje wyznaczenie punktów przecięcia się ze sobą poszczególnych płaszczyzn, na podstawie których stworzone zostają wierzchołki wygenerowanego modelu [40]. Na Rys. 10 przedstawiono porównanie przykładowej chmury punktów z powstałym modelem 3D.



Rys. 10. Chmura punktów z zaznaczonymi miejscami przecięć poszczególnych płaszczyzn (a) oraz stworzony na jej podstawie model końcowy (b) [40]

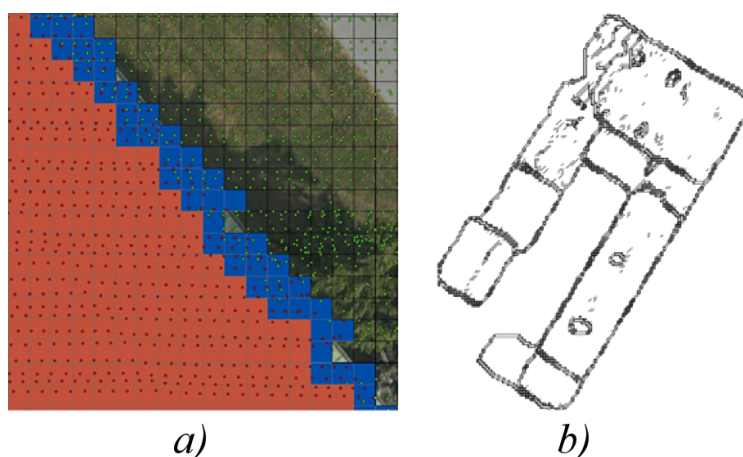
Henn, Gröger, Stroh i Plümer zaprezentowali rozwiązanie, które również opiera się w

dużej części na wykrywaniu kształtu dachów budynków. Opisane podejście obejmuje dekompozycję obiektu na mniejsze fragmenty, gdzie w celu dokładniejszego wyznaczenia oddzielających je linii, a także lepszego oszacowania ich płaszczyzn, wykorzystywana jest metoda RANSAC [41]. Na Rys. 11 przedstawiono przykład modelu stworzonego za pomocą powyższej metody, porównanego z kształtem oryginalnego obiektu.



Rys. 11. Prosty model budynku (a) oraz efekt jego nałożenia na obraz satelitarny (b) przedstawiający oryginalny obiekt [41]

Cheng, Tong, Chen, Zhang, Shan, Liu i Li opracowali metodę rekonstrukcji dachów w oparciu o integrację danych LiDAR ze zdjęciami wykonanymi pod różnym kątem [42]. Zaproponowana metoda oparta jest na wykrywaniu krawędzi poszczególnych, płaskich kształtów, występujących na powierzchni dachu danego budynku. Operacja ta wykonywana jest na dwóch rodzajach danych: obrazie rastrowym (Rys. 12a) oraz pomocniczym modelem 3D uzyskanym za pomocą triangulacji Delaunaya (Rys. 12b). Następnie wykryte krawędzie i charakterystyczne punkty zostają ze sobą odpowiednio zintegrowane w celu uzyskania końcowych modeli.



Rys. 12. Proces wykrywania krawędzi budynku na obrazie rastrowym (a) oraz pomocniczym modelem 3D uzyskanym za pomocą triangulacji Delaunaya (b) [42]

2.3. Analiza i podsumowanie przeglądu metod

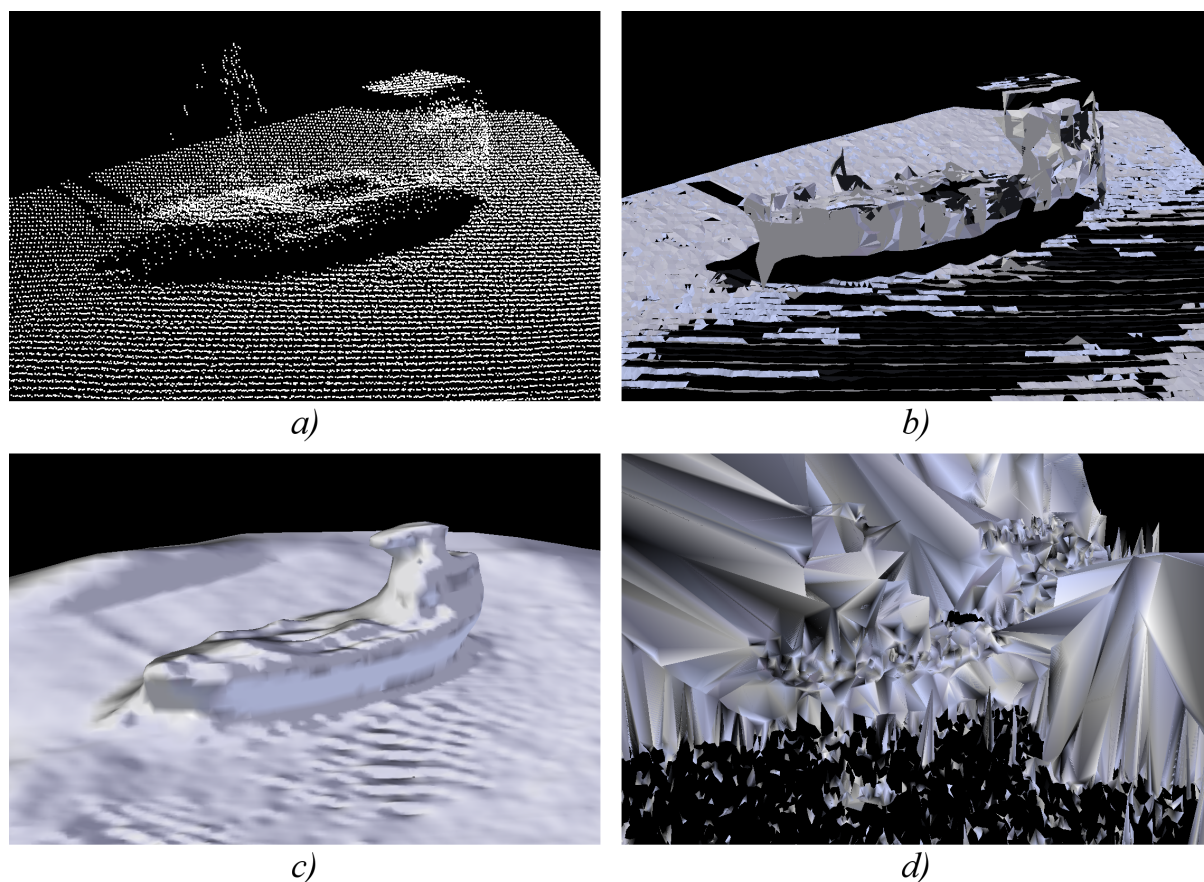
Bazując na przeglądzie literatury dotyczącej odtwarzania trójwymiarowego kształtu rzeczywistych obiektów na podstawie danych pochodzących z sondowań hydroakustycznych i skaningu laserowego, można dojść do wniosku, że istniejące rozwiązania w tej dziedzinie nie są wystarczająco satysfakcjonujące i wciąż wymagają szeroko zakrojonych badań. Istnieją i stosowane są w wielu przypadkach z powodzeniem algorytmy przeznaczone do otrzymywania modeli w rodzaju sieci TIN z chmur punktów. Jednym z najszerzej znanych rozwiązań jest metoda Poissona (ang. *Poisson Surface Reconstruction*) [43], które opiera się na rozwiązywaniu równania Poissona w celu podzielenia wejściowego zestawu punktów na punkty opisujące wewnętrzną oraz zewnętrzną część obiektu, a jego efektywność jest w dużej mierze zależna od wartości wyliczonych wektorów normalnych. W ciągu ostatnich kilku lat zaproponowane zostały różne usprawnienia powyższego rozwiązania, wliczając w to ekranowaną metodę Poissona (ang. *Screened Poisson Surface Reconstruction*) [44] opartą w dużej mierze na interpolacji niektórych wyników tego równania. Innym znanym rozwiązaniem jest algorytm Ball-Pivoting [45], który jest oparty na idei przemieszczającej się kuli, służącej do wyszukiwania potencjalnych trójelementowych zbiorów punktów, na których możliwe byłoby zbudowanie pojedynczego trójkąta wynikowego modelu. Do innych rozwiązań z tej dziedziny można zaliczyć metodę Power Crust [46], która w dużej mierze sprowadza się do wyznaczenia „szkieletu” wejściowego zestawu punktów za pomocą diagramu Voronoi, a także algorytm Mesh3D [47] wykorzystywany w skanerach optycznych.

Niestety, dane uzyskiwane za pomocą zarówno technologii sondowania falami akustycznymi jak i skaningu laserowego na ogół charakteryzują się cechami utrudniającymi uzyskiwanie w tym przypadku zadowalających wyników przy użyciu standardowych metod. Wymienić tu można duże zakłócenia (rozumiane jako obecność w chmurze punktów dużej ilości takich punktów, które powinny zostać pominięte w procedurze odtwarzającej kształt badanej powierzchni obiektu), częsty brak wielu danych (tj. punktów odpowiadających poszczególnym wiązkom użytym w sondowaniu) czy duże zróżnicowanie gęstości punktów i dokładności odzwierciedlenia kształtu powierzchni w badanym obszarze w obrębie jednego zbioru danych. Dane w powyższej postaci można w pewnym zakresie stosować w celu odtworzenia kształtu nieskomplikowanych powierzchni znanymi metodami [48] czy też w pewnych konkretnych rodzajach zadań, jak np. odtwarzanie wyłącznie brył budynków [49,50], jednak w przypadku bardziej złożonych i różnorodnych występujących w analizowanej scenie obiektów z reguły występują trudności z otrzymaniem zadowalających

wyników [51,52]. Zauważyć to można na przykładzie zbioru danych przedstawionego na Rys. 13a), mającego postać nieregularnej chmury punktów reprezentującej wyniki sondowania otrzymane za pomocą echosondy wielowiązkowej. Na pozostałych częściach Rys. 13 pokazano efekt zastosowania opisanych wcześniej metod odtwarzania kształtu na zbiorze z Rys. 13a), gdzie poszczególne wyniki przedstawiają najdokładniejsze modele jakie udało się uzyskać przy testowaniu różnych wartości parametrów dla poszczególnych algorytmów. Na Rys. 13b) przedstawiono model uzyskany za pomocą algorytmu Ball-Pivoting. Jak można zauważyć, zawiera on istotne niedobory informacji w zakresie reprezentacji niektórych powierzchni, takich jak dno morskie czy fragmenty wraku statku (w dalszym tekście tego rodzaju sytuacje nazywane są „dziurami”). Powyższy problem jest w znacznej części spowodowany tym, że algorytm wymaga dobrania różnych wartości parametrów wejściowych w zależności od odległości pomiędzy poszczególnymi punktami stanowiącymi podstawę do zbudowania płaskich powierzchni. Jako że dane pochodzące z sondowań hydroakustycznych czy ze skaningu laserowego często cechują się znacznymi nieregularnościami, uzyskanie na ich podstawie spójnego modelu za pomocą algorytmu Ball-Pivoting jest zwykle niemożliwe. Z kolei w przypadku metody Poissona (Rys. 13c) uzyskany model cechuje się dużą regularnością oraz zadowalającą reprezentacją większości powierzchni występujących w wejściowym zbiorze punktów, niemniej jednak można w nim dostrzec znaczne złagodzenie ostrych krawędzi, szczególnie w nadbudówce wraku, a także pominięcie szczegółów takich jak powierzchnie masztów. Oprócz tego powstały model zawiera nadmiarowe ściany wokół miejsc stanowiących granice oryginalnego zestawu punktów. Spośród sprawdzonych metod najgorsze wyniki uzyskano za pomocą metody Power Crust (Rys. 13d), co może być częściowo spowodowane próbą wyszukania przez algorytm zamkniętych powierzchni w wejściowych danych, podczas gdy wykorzystany zbiór punktów opisuje kształty widoczne jedynie z góry.

Jak można zauważyć, wspólną cechą istniejących rozwiązań w dziedzinie automatycznej rekonstrukcji powierzchni jest ich dostosowanie do konkretnych danych, reprezentujących takie obiekty jak dachy budynków czy fragmenty dna morskiego o względnie prostym kształcie. Zastosowanie powyższych metod w innych przypadkach niż przewidziane zwykle skutkuje uzyskaniem modeli niekompletnie opisujących kształt opisywanych obiektów, z występującą dużą liczbą braków w danych w określonych miejscach. Z powyższych względów, w ramach niniejszej pracy podjęto próbę stworzenia uniwersalnego podejścia, które pozwoli na automatyczne odtwarzanie powierzchni różnych

obiektów na podstawie danych pochodzących z wielu źródeł, z naciskiem na dane pozyskane za pomocą echosond wielowiązkowych oraz skanerów LiDAR.



Rys. 13. Wyniki zastosowania różnych algorytmów odtwarzania kształtu dla przykładowej chmury punktów (a) pochodzącej z sondowania dna morskiego: algorytmu Ball-Pivoting (b), metody Poissona (c) oraz metody Power Crust (d)

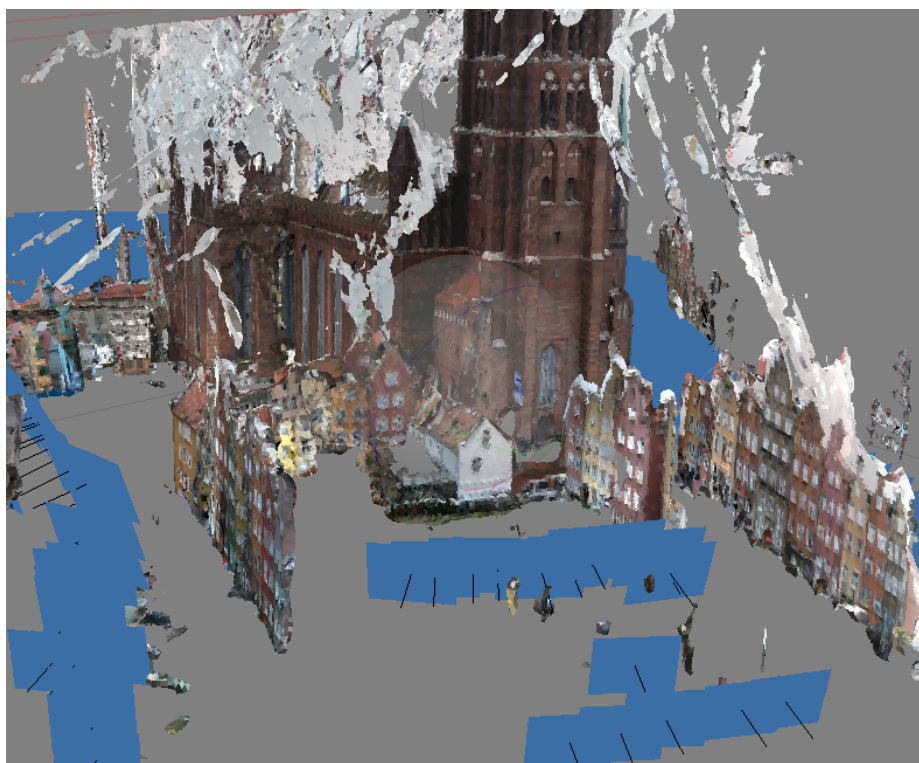
2.4. Kryteria oceny jakości zrekonstruowanych modeli

W kontekście rekonstrukcji kształtu trójwymiarowych obiektów ocena jakości zastosowanych algorytmów często jest dokonywana poprzez subiektywną, wizualną analizę odtworzonego modelu. Rozwiązanie to jest stosowane głównie w sytuacji, w której niemożliwe jest porównanie odtworzonego modelu z kształtem oryginalnego obiektu ze względu na brak możliwości jego wiarygodnego odwzorowania, co zazwyczaj jest spowodowane niewystarczającą ilością danych. Jest to typowy problem dla danych pozyskanych w środowisku podwodnym, w którym informacje przestrzenne zebrane za pomocą wybranego urządzenia, jak np. echosondy wielowiązkowej czy sonaru bocznego, są często jedynym źródłem informacji o powierzchni badanego obszaru, przez co niemożliwe jest jednoznaczne określenie ich wiarygodności.

Powyższa sytuacja prezentuje się nieco inaczej w przypadku środowiska lądowego, gdzie pozyskanie danych opisujących wzorcowy kształt badanego obiektu jest z reguły łatwiejsze. Jednym ze sposobów na odtworzenie szczegółowego modelu 3D danego obiektu jest skorzystanie z metod fotogrametrycznych opartych na wykonaniu serii zdjęć. Niestety, do ich zastosowania wymagany jest szereg sprzyjających czynników:

- badany obiekt musi być dokładnie sfotografowany ze wszystkich możliwych stron, często z zastosowaniem wielu różnych perspektyw, co może być trudne do uzyskania gdy obiekt zawiera elementy trudne do uchwycenia (jak np. takie położone wysoko nad ziemią),
- badany obiekt nie może być przysłonięty przez inne elementy krajobrazu,
- muszą zaistnieć odpowiednie warunki atmosferyczne, a w szczególności fotografowany obiekt musi być ze wszystkich stron oświetlony jednolitym światłem;

O ile warunki pogodowe stanowią czynnik zmienny i w dużej części losowy, to pozostałe dwa warunki są często trudniejsze lub wręcz niemożliwe do spełnienia. Jak wiadomo, fotografowany obiekt może być częściowo przysłonięty przez duże obiekty nieruchome, jak np. budynki, których istnienie może skutkować pewnymi brakami w odtworzonym modelu. Największe problemy sprawia jednak brak możliwości dokładnego sfotografowania obiektu z wystarczającej liczby perspektyw, co może powodować występowanie zniekształceń w obrębie niedostatecznie odwzorowanych fragmentów obiektu. Na Rys. 14 przedstawiono surowy model otrzymany bezpośrednio na podstawie serii zdjęć obejmujących obszar Bazyliki konkatedralnej Najświętszej Marii Panny w Gdańsku. Jak można zauważyć, odtworzony model obejmuje nie tylko kształt samej Bazyliki, ale również niektóre powierzchnie otaczających jej budynków. Oprócz tego otrzymany model zawiera liczne zniekształcenia w jej górnych partiach, a szczególnie w obrębie jej dachu, co wynika z faktu że wszystkie fotografie były wykonywane na wysokości ok. 170 cm nad ziemią. Widoczne na Rys. 14 niebieskie prostokąty reprezentują poszczególne miejsca z których pochodzą wykonane zdjęcia.



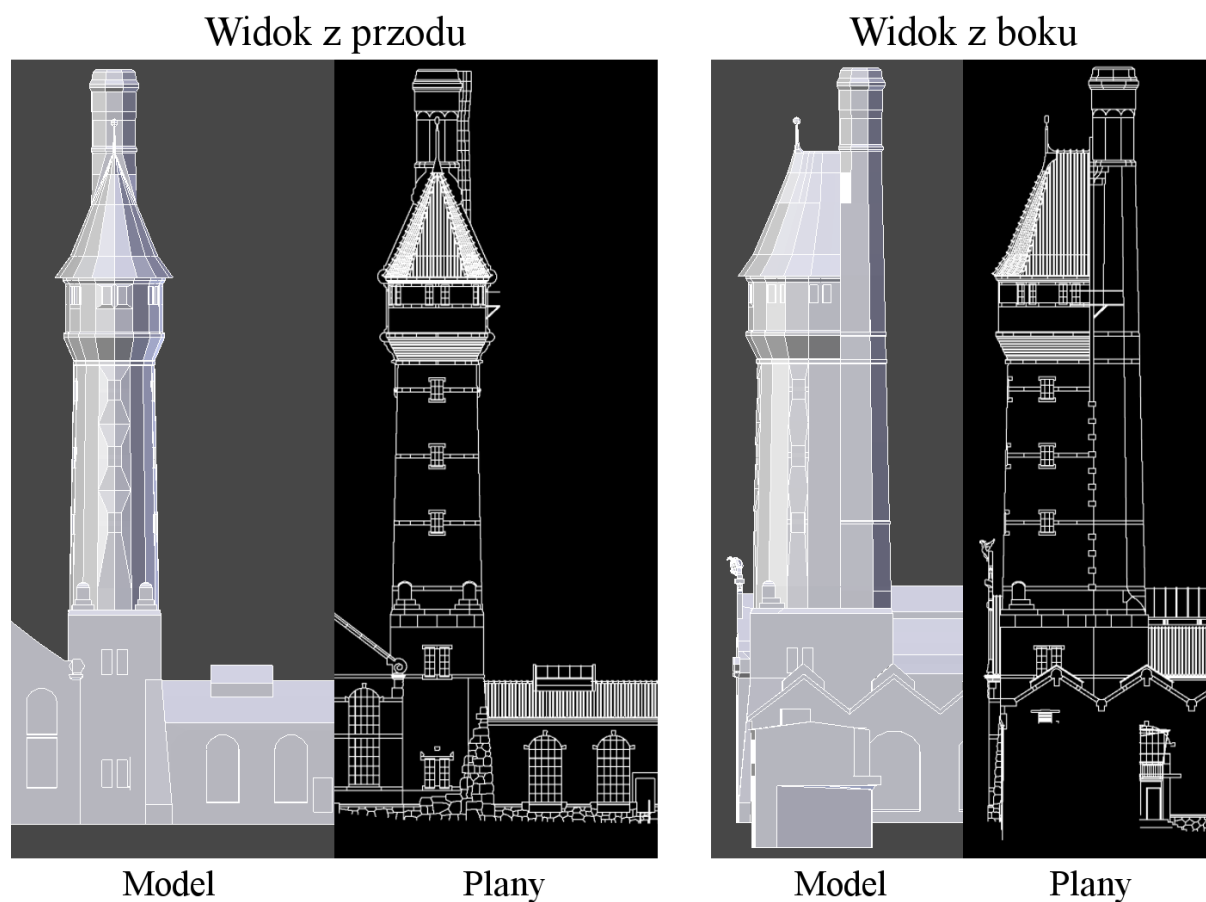
Rys. 14. Niekompletny model Bazyliki NMP w Gdańsku otrzymany za pomocą aplikacji Agisoft PhotoScan na podstawie serii zdjęć wykonanych z różnych perspektyw

Z powyższych względów, najpewniejszym sposobem na otrzymanie szczegółowego, wzorcowego modelu badanego obiektu jest jego ręczne odtworzenie w sposób cyfrowy za pomocą dedykowanego oprogramowania do wytwarzania grafiki 3D, do czego konieczna jest szczegółowa wiedza o dokładnych wymiarach wszelkich jego elementów. Proces ten jest stosunkowo prosty w przypadku gdy odtwarzany model reprezentuje kształt jakiegoś budynku, gdyż w takiej sytuacji jego rekonstrukcję można oprzeć na istniejących planach architektonicznych, o ile są one dostępne. W przeciwnym wypadku do wiernego odtworzenia cyfrowego modelu konieczne jest ponowne zmierzenie wszystkich jego elementów. Na Rys. 15 przedstawiono fragmenty planów budynku Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej oraz odpowiadające im elementy stworzonego na ich podstawie cyfrowego modelu 3D.

Posiadanie wzorcowego modelu reprezentującego badany obiekt pozwala na lepszą weryfikację jakości modelu odtworzonego za pomocą wybranej metody automatycznej rekonstrukcji kształtu na podstawie danych uproszczonych (np. takich, które zostały otrzymane za pomocą nalogów LiDAR). W celach poglądowych takiego porównania można dokonać poprzez manualną, wizualną analizę obu modeli, jednak bardziej obiektywnym i zarazem dokładniejszym rozwiązaniem jest dokonanie porównania na podstawie jasno

sprecyzowanych metryk jakościowych. Istniejące metryki służące do automatycznego lub półautomatycznego porównywania ze sobą par podobnych do siebie modeli często oparte są w pewnym stopniu na odnajdywaniu w obrębie analizowanego zbioru danych pewnych elementów, takich jak pojedyncze punkty lub ściany, a następnie obliczanie ich odległości od odpowiadających im elementów występującym w pewnym referencyjnym zbiorze danych. Seitz, Curless, Diebel, Scharstein i Szelinski zaproponowali sposób określania jakości modeli uzyskanych za pomocą metod fotogrametrycznych (opartych na wygenerowaniu cyfrowego modelu 3D na podstawie serii zdjęć przedstawiających rzeczywisty obiekt) poprzez porównanie ich z modelami opisującymi kształt tych samych obiektów odtworzonych za pomocą skanowania laserowego [53]. Zaproponowana przez nich metodyka oparta jest na ocenianiu dwóch aspektów zrekonstruowanego modelu R względem modelu wzorcowego W: dokładności, opisującej na ile dokładnie poszczególne elementy R odwzorowują odpowiadające im elementy W, oraz kompletności, określającej jak duża część W jest faktycznie zawarta w R. W pierwszym z powyższych przypadków dla każdego wierzchołka w R wyszukiwany jest najbliższy mu wierzchołek w W, a następnie wyliczana jest odległość pomiędzy nimi, do której przypisywany jest znak dodatni lub ujemny (w zależności od wartości iloczynu skalarnego normalnej wierzchołka modelu W i wektora, którego początek znajduje się w tym wierzchołku, a kończy w odpowiadającym mu wierzchołku modelu R), co pozwala ustalić w jakim stopniu odtworzony model R stanowi niedoszacowanie bądź przeszacowanie modelu wzorcowego W. Dla przypomnienia, normalna wierzchołka jest wektorem jednostkowym prostopadłym do powierzchni lub stycznej do powierzchni w danym miejscu, służącym m.in. do wyznaczenia jej poprawnego cieniowania. Ostatecznie dokładność danego modelu wyrażana jest jako liczba wierzchołków modelu R, których odległości od odpowiadających im wierzchołków W nie przekraczają pewnej zadanej wartości, podzielona przez liczbę wszystkich wierzchołków modelu R. Procedura wyznaczenia dokładności modelu R została zobrazowana na Rys. 16a), gdzie punkty oznaczone kolorem niebieskim przedstawiają wierzchołki modelu R, dla których znalezione zostały odpowiadające im wierzchołki modelu W, natomiast punkty oznaczone kolorem czerwonym reprezentują te wierzchołki R, dla których nie znaleziono odpowiednich wierzchołków W w zadanej odległości. Kompletność modelu wyznaczana jest w sposób analogiczny do wyliczania jego dokładności, jednak w tym przypadku obliczenia oparte są na tworzeniu wektorów mających swoje początki w wierzchołkach R i kończących się w wierzchołkach modelu W. Procedura wyznaczenia kompletności modelu R została przedstawiona na Rys. 16b), gdzie punkty oznaczone kolorem zielonym reprezentują

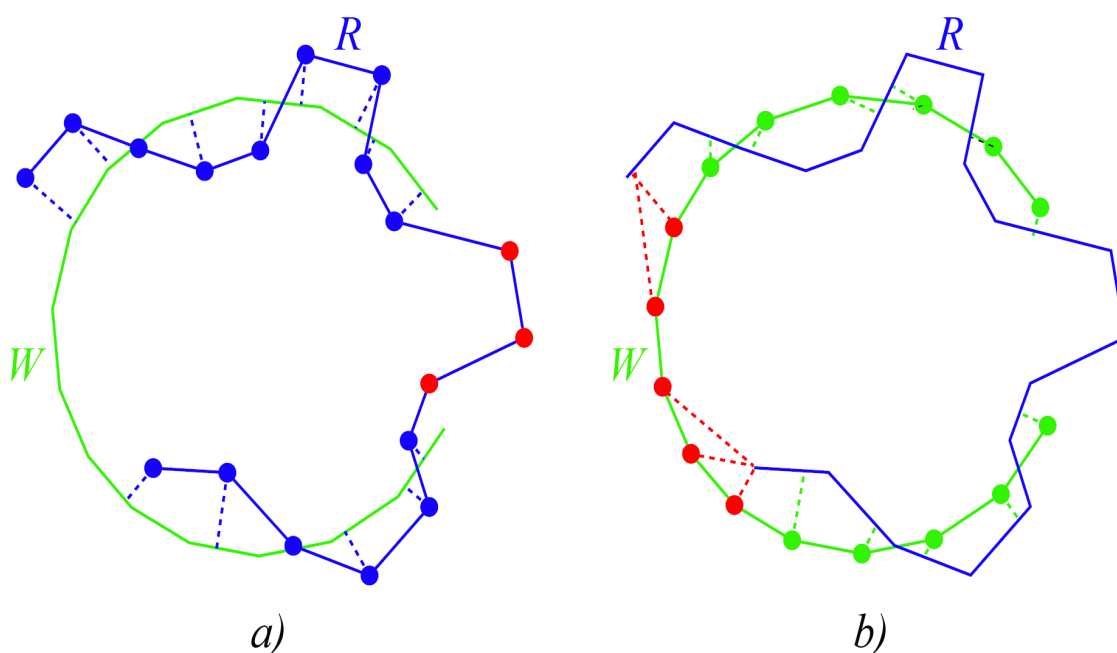
wierzchołki W, dla których wykryte zostały odpowiadające im wierzchołki modelu R, natomiast punkty oznaczone kolorem czerwonym przedstawiają pozostałe wierzchołki W, których odległości od najbliższej im położonych wierzchołków R przekraczają pewną zadaną wartość.



Rys. 15. Cyfrowy model Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej stworzony ręcznie na podstawie jego planów architektonicznych

Podobny sposób porównywania ze sobą kształtu cyfrowych modeli 3D jest wykorzystywany przez narzędzie Metro [54], które zostało stworzone w celu wyznaczania różnic geometrycznych pomiędzy parami zbliżonych do siebie modeli przedstawiających ten sam obiekt, gdzie jeden z nich z założenia stanowi uproszczenie drugiego modelu. Stosowana przez Metro metryka również jest oparta na wyznaczaniu odległości pomiędzy odpowiadającymi sobie elementami w dwóch różnych zbiorach, jednak nie ogranicza się ona do porównywania wyłącznie wierzchołków obu modeli, ale uwzględnia ona także losowo wybrane punkty leżące na powierzchni ścian tych modeli. W wyniku skorzystania z powyższego narzędzia użytkownik otrzymuje zestaw wyników informujących m.in. o rozmiarze błędów występujących w uproszczonym modelu (wyrażanych jako odległości

pomiędzy jego wybranymi elementami a odpowiadającymi im elementami modelu oryginalnego), wartości średniej i maksymalnej tych błędów. Warto jednak zaznaczyć, że ze względu na losowy dobór punktów testowych, wyniki otrzymane z użyciem Metro są niedeterministyczne. Powyższe narzędzie wylicza również takie wartości jak pole powierzchni i objętość badanych modeli.



Rys. 16. Zobrazowanie sposobu wyznaczania dwóch aspektów związanych z oceną jakości zrekonstruowanego modelu R względem modelu wzorcowego W : dokładności (a) oraz kompletności (b) [53]

Do przykładów stosowanych podejść do porównywania modeli warto dodać metrykę zaproponowaną przez Lavoué [55], która inspirowana jest metodami porównywania jakości dwuwymiarowych obrazów. Powyższa metryka opiera się w dużej części na generowaniu dla każdego modelu specjalnej tekstury opisującej siłę lokalnych zniekształceń występujących w pewnym promieniu h_i od każdego z jego wierzchołków. Ostateczny wynik jest uzyskiwany poprzez dobór różnych wartości h_i w celu wygenerowania par obrazów zniekształceń dla obu modeli, a następnie porównanie ze sobą siły zniekształceń występujących w obrębie odpowiadających sobie wierzchołków oraz uśrednieniu wyników w celu zwrócenia pojedynczej wartości określającej globalny poziom zniekształcenia.

3. Opis danych przestrzennych przetwarzanych w ramach badań

3.1. Wstęp

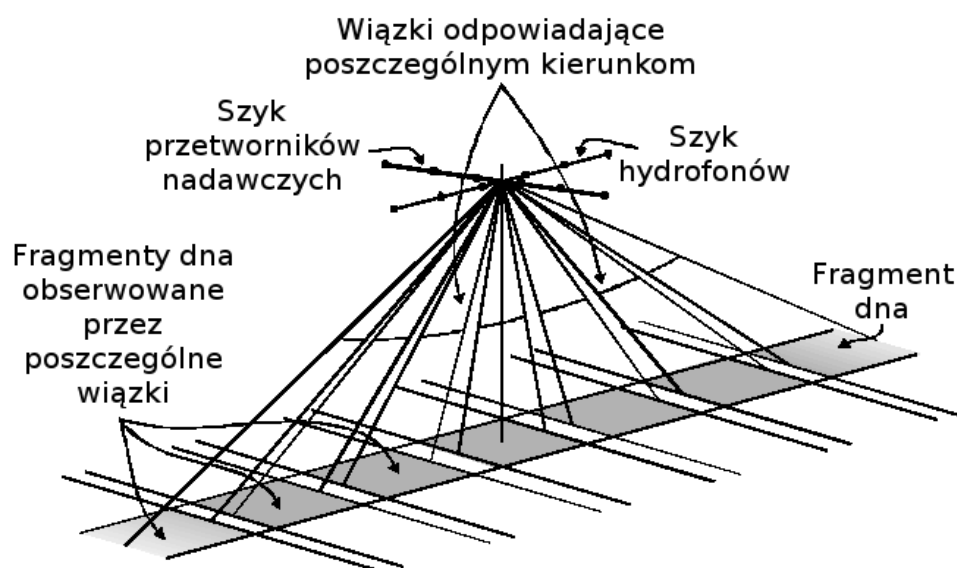
Wykorzystane dane pochodzą z wielu różnych źródeł, dotyczących zróżnicowanych środowisk, a także zostały one pozyskane z użyciem różnych technologii. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że generalnie mają one postać niezorganizowanych chmur punktów o zróżnicowanym poziomie zagęszczenia, a ich struktura przestrzenna jest dosyć zbliżona. Podobieństwa te wynikają głównie z tego, że metody pozyskiwania danych źródłowych opierają się na wykorzystaniu pojazdów zbierających dane (takich jak statki i samoloty), które podczas przeprowadzania pomiarów poruszają się na stałej wysokości ponad badanym obszarem i wysyłają, sekwencyjnie lub równoległe, wiązkę lub wiązki sondujące w dół w różnych kierunkach. Z powyższych względów, powierzchnie badanych obiektów położone pionowo i równoległe do toru ruchu tych pojazdów, tak jak podłoże czy dachy budynków, są w praktyce reprezentowane w danych w sposób bardziej szczegółowy i dokładniejszy od powierzchni do nich prostopadłych, takich jak ściany czy maszty wraków statków. Jednocześnie można zauważyć, że struktura przestrzenna tych danych jest zbliżona do struktury zbiorów danych opisywanych za pomocą map wysokościowych.

3.2. Dane podwodne

Wykorzystane w badaniach dane podwodne zostały pozyskane poprzez pomiar głębokości poszczególnych elementów powierzchni dna morskiego za pomocą echosond wielowiązkowych. Zasadnicza idea działania echosondy wielowiązkowej została przedstawiona na Rys. 17. Echosonda wyposażona jest w szereg przetworników nadawczych, usytuowany równoległe do kierunku przemieszczania się jednostki pływającej, oraz w prostopadły do niego szereg przetworników odbiorczych (hydrofonów). Hydrofony zapewniają odbiór ech docierających z różnych kierunków, w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu jednostki z zamontowanym sonarem wielowiązkowym. W pojedynczym sondowaniu rejestrowany jest więc zbiór ech od dna, odpowiadających poszczególnym, wąskim wiązkom. Sygnały ech dla poszczególnych wiązek pochodzą od fragmentów powierzchni dna przedstawionych jako szare pola na Rys. 17. W celu osiągnięcia wysokiej rozdzielczości kątowej, efektywna liczba wiązek zwiększana jest poprzez zastosowanie odpowiedniego przetwarzania odbieranych sygnałów. Jest to wykonywane poprzez filtrację przestrzenną



opartą na realizacji opóźnień czasowych wykorzystywanych w tzw. opóźnieniowo-sumacyjnych syntezach wiązek [5,56], co zostało krótko opisane poniżej.



Rys. 17. Geometria sondowania dna morskiego za pomocą echosondy wielowiązkowej

Zarówno nadawcza, jak i odbiorcza charakterystyka kierunkowa sonaru wielowiązkowego (tj. funkcja określająca z jaką stosunkowo amplitudą fali echosonda nadaje lub z jakim relatywnym wzmocnieniem odbiera sygnały akustyczne dla danego kierunku w przestrzeni) ma tę cechę, że w jednym wyróżnionym kierunku jest ona wąska. W szczególności, charakterystyka nadawcza jest wąska w kierunku zgodnym z przemieszczaniem się jednostki pływającej, zaś charakterystyka odbiorcza (a w zasadzie charakterystyki opisujące poszczególne wiązki) – w kierunku do niego prostopadłym. Jest to konsekwencją zastosowania szyku przetworników zamiast pojedynczego przetwornika. Rozpatrując przetworniki nadawcze, jeżeli założymy, że jest ich N rozmieszczonych równomiernie, z odstępem d w przestrzeni, wzdłuż linii poziomej równoległej do toru ruchu statku, i każdy z nich generuje i wysyła dookoła w toń wodną wąskopasmowy sygnał akustyczny wyrażony za pomocą wzoru (1).

$$S_i(t) = A_i(t) e^{2\pi j f_0 t} \quad (1)$$

gdzie:

f_0 – częstotliwość pracy sonaru,

$A_i(t)$ – obwiednia sygnału i -tego przetwornika, wolno zmienna w odniesieniu do f_0 ,

j – jednostka urojona.

Przy powyższym założeniu, sygnał nadawany przez przetwornik w kierunku zawartym w płaszczyźnie pionowej równoległej do toru ruchu statku i tworzącym kąt θ z kierunkiem pionowym można określić za pomocą wzoru (2) [56].

$$B(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} S_i e^{j \frac{2\pi i d \cos \theta}{\lambda}} \quad (2)$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \text{ oznacza długość generowanej fali hydroakustycznej,}$$

c oznacza prędkość dźwięku w ośrodku wodnym.

Można łatwo pokazać, że generalnie, im większe N tym węższa jest charakterystyka kierunkowa w kierunku, w którym usytuowany jest szereg przetworników. Przykładowo, jeśli założymy, że wszystkie przetworniki nadają jednakową ciągłą falę harmoniczną o stałej amplitudzie A (3), wówczas prawdziwy jest także wzór (4) [56].

$$S_i(t) = A e^{2\pi j f_0 t} \quad (3)$$

$$B(\theta) = A \frac{\sin \frac{N\pi d \cos \theta}{\lambda}}{\sin \frac{\pi d \cos \theta}{\lambda}} e^{j 2\pi f_0 t + \frac{(N-1)d \cos \theta}{2\lambda}} \quad (4)$$

Można zauważyć, że w wyrażeniu (4), wraz ze wzrostem, lub maleniem kąta θ przy jego oddalaniu się od 0° , argument funkcji sinus w liczniku będzie tym szybciej zbliżał się do π lub $-\pi$ ($B(\theta)$ będzie wówczas spadać do zera), im większe będzie N .

Analogicznie można rozpatrzyć tor odbiorczy echosondy wielowiązkowej, przy czym, dodatkowo, chcemy tu otrzymać nie jedną charakterystykę, tylko wiele charakterystyk odpowiadających poszczególnym, wąskim efektywnym wiązkom sonaru (Rys. 17). Osiąga się to poprzez odpowiednie przetwarzanie zarejestrowanych sygnałów ech. W szczególności, echa zarejestrowane przez poszczególne przetworniki, o postaci (z założeniem liniowego charakteru wszystkich zjawisk odpowiedzialnych za powstawanie echa od dna i propagację sygnałów akustycznych w toni wodnej) wyrażonej za pomocą wzoru (5).

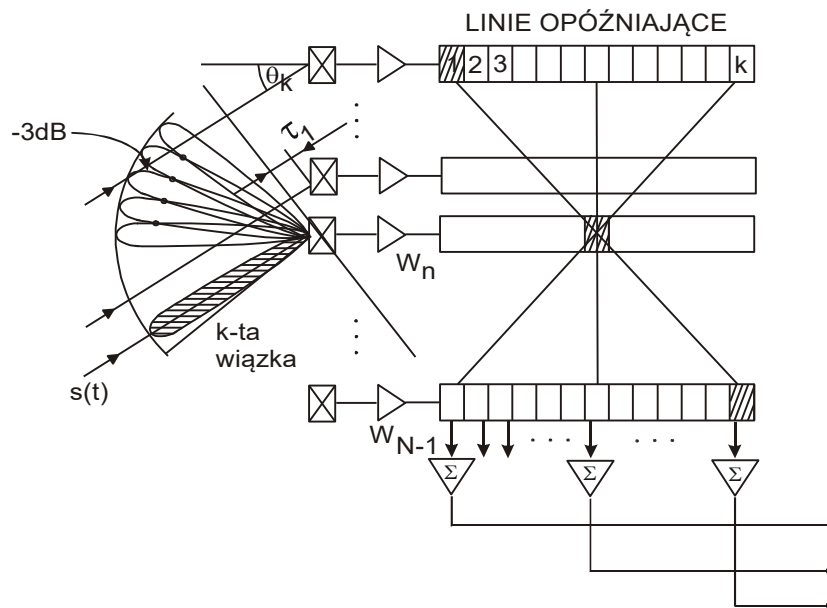
$$S_{i\text{odb}}(t) = A_{i\text{odb}}(t) e^{j(2\pi f_0 t + \Phi_{i\text{odb}}(t))}, \quad i = 0, \dots, N-1, \quad (5)$$

gdzie $\Phi_{i\text{odb}}(t)$ jest przebiegiem fazy, wolno zmiennym w odniesieniu do f_0 , podobnie jak przebieg amplitudy $A_{i\text{odb}}(t)$, sumowane są dla uzyskania sygnału echa dla konkretnej wiązki („patrzacej” w określonym kierunku) w sposób analogiczny jak w równaniu (2). Dokonuje się przy czym także odpowiedniego przesunięcia w fazie poszczególnych sygnałów $S_{i\text{odb}}$, innego dla każdej wiązki, tak aby skompensować propagacyjne opóźnienia geometryczne dla poszczególnych przetworników [57]. Można pokazać, że dla uzyskania echa odpowiadającego wiązce o maksimum wzmocnienia w kierunku określonym przez kąt θ_{odb} w płaszczyźnie prostopadłej do toru przemieszczania się jednostki pływającej, każdy z sygnałów $S_{i\text{odb}}$ należy opóźnić o liczbę radianów wyrażonych za pomocą wzoru (6) w stosunku do pełnego okresu 2π odpowiadającego częstotliwości f_0 (d_{odb} – odstęp w szyku przetworników odbiorczych). Ponadto, stosuje się także mnożenie sygnałów $S_{i\text{odb}}$ przez wagi w_i w celu poprawy jakości charakterystyk poszczególnych wiązek, tj. zmniejszenia ich listków bocznych [57]. Tak więc sumowanie odebranych sygnałów ech odbywa się w sonarze wielowiązkowym zgodnie z wyrażeniem (7) [57].

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} i d_{\text{odb}} \sin \theta_{\text{odb}} \quad (6)$$

$$B(\theta_{\text{odb}}) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i S_{i\text{odb}} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i d_{\text{odb}} \sin \theta_{\text{odb}}} \quad (7)$$

Oparte na powyższych podstawach techniki filtracji przestrzennej w realizacji syntezerów wiązek stanowią jądro współczesnych sonarów wielowiązkowych. Dzięki nim możliwe jest formowanie wachlarzowej konfiguracji charakterystyk kierunkowych sonarów, co schematycznie przedstawiono na Rys. 18.



Rys. 18. Schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezeru wiązek sonaru wielowiązkowego

Podczas pomiarów wykonywanych sonarem wielowiązkowym, obszar pokrycia przeszukiwanego fragmentu dna podzielony jest na odpowiadające kolejnym sondowaniom na ogół równoległe do siebie linie składające z dużej liczby punktów pomiarowych, występujących w miejscach odbicia fal dźwiękowych, odpowiadających poszczególnym wiązkom, od powierzchni danego obiektu. W wyniku powyższej operacji otrzymywany jest dyskretny obraz batymetryczny badanego dna, którego rozdzielczość jest zależna od liczby wiązek oraz głębokości dna w miejscu obserwacji.

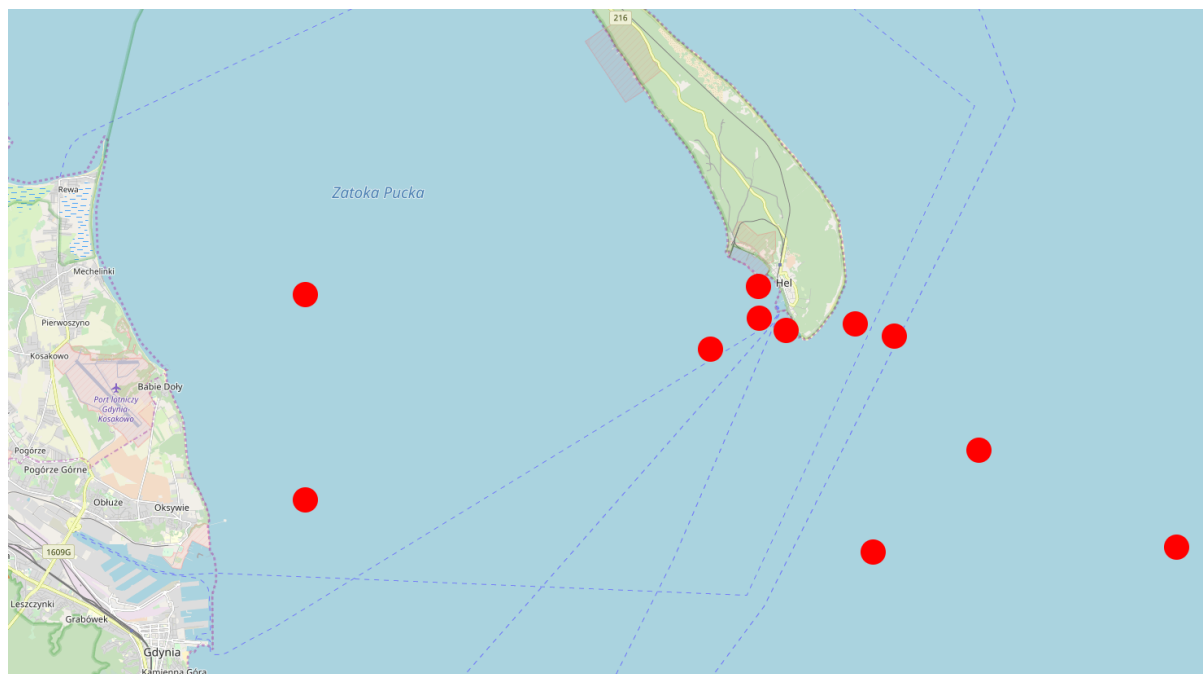
W omawianym przypadku, pozyskiwanie danych o powierzchni dna morskiego odbywało się za pomocą echosondy wielowiązkowej zamontowanej na statku poruszającym się przeważnie w jednym kierunku. Wykorzystane w badaniach dane wejściowe mają postać zgeoreferencjonowanych chmur punktów umieszczonych w przestrzeni trójwymiarowej, gdzie każdy z wykorzystanych zbiorów jest częściowo uporządkowany, a występujące w nim punkty odpowiadające poszczególnym wiązkom układają się w grupy zbliżone do linii, odpowiadające poszczególnym sondowaniom.

Wykorzystane w niniejszej pracy dane z obszarów morskich pochodzą z różnych źródeł, a w szczególności:

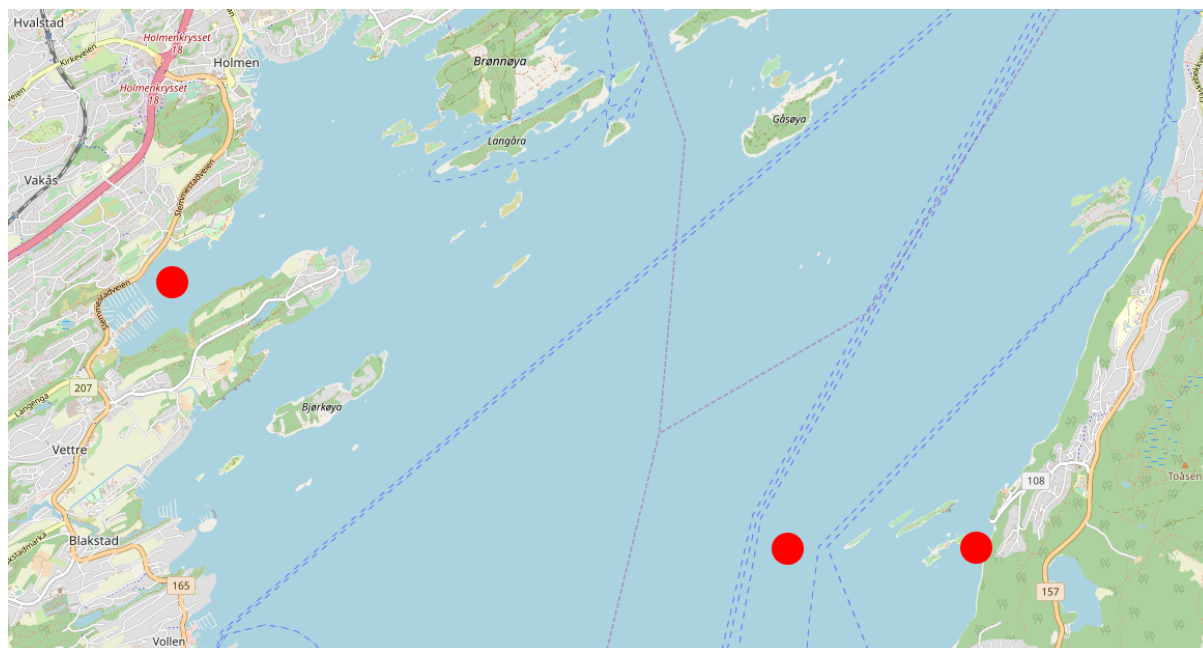
- większość powyższych danych reprezentuje fragmenty dna zachodniej części Zatoki Gdańskiej, które w większości zostały pozyskane bezpośrednio przez doktora Krzysztofa Bikonisa z Katedry Systemów Geoinformatycznych Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, natomiast pozostała część tych

danych została udostępniona przez Urząd Morski w Gdyni (Rys. 19),

- wybrane zbiory danych, reprezentujące fragmenty dna Zatoki Oslofjorden w Norwegii, zostały udostępnione przez firmę Kongsberg Maritime AS (Rys. 20).



Rys. 19. Lokalizacje miejsc pozyskania danych podwodnych (zaznaczone kolorem czerwonym) w rejonie Zatoki Gdańskiej



Rys. 20. Lokalizacje miejsc pozyskania danych podwodnych (zaznaczone kolorem czerwonym) w rejonie zatoki Oslofjorden w Norwegii

Pozyskane dane podwodne w większości mają formę plików binarnych opisujących znaczne obszary terenu. Przetwarzanie całej zawartości ww. zbiorów danych w ramach prowadzonych badań byłoby nieoptymalne, dlatego na potrzeby pracy stworzono dedykowany zestaw algorytmów umożliwiający parsowanie oraz wybór odpowiednich fragmentów plików wejściowych. W przypadku danych wielowiązkowych wykorzystano fragmenty plików [58] zawierających następujące informacje:

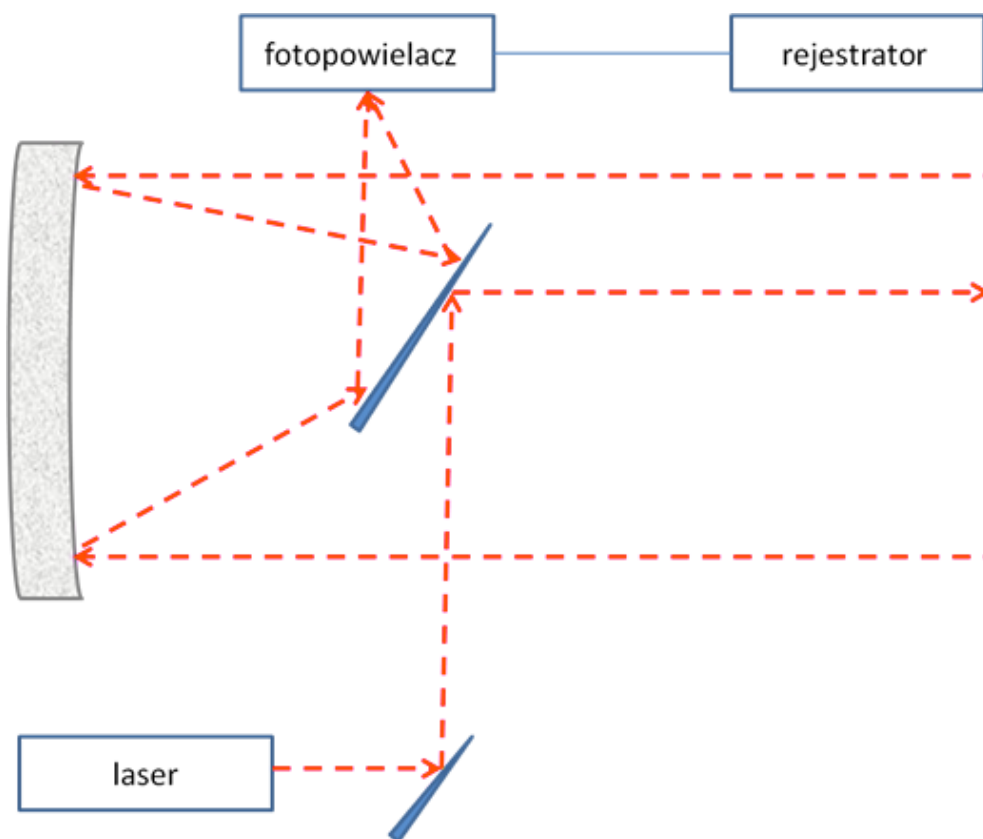
- wskazania czujnika wysokości oraz przechyleń wykorzystanej aparatury, używane w celu zredukowania zniekształceń danych spowodowanych przez wysokie fale i kołysanie się jednostki pływającej (datagram 041h),
- informacje o głębokościach punktów dna morskiego mierzonych za pomocą poszczególnych wiązek oraz o odległości o jaką przemieszczała się echosonda pomiędzy kolejnymi pomiarami (datagram 044h).

3.3. Dane naziemne

W przypadku środowiska lądowego, dane zostały pozyskane metodą skaningu laserowego, polegającą na emisji wiązek lasera w różnych kierunkach w celu zmierzenia odległości pomiędzy skanerem laserowym a poszczególnymi elementami powierzchni badanego terenu. Zastosowano tutaj urządzenia oparte na technologii LiDAR (skrót od *Light Detection And Ranging*), które emitują silne i wąskie wiązki światła wysyłane w konkretnym kierunku (Rys. 21). Światło to, przechodząc przez daną materię, ulega rozproszeniu we wszystkich kierunkach, po czym fala odbita jest rejestrowana przez teleskop znajdujący się w tym samym urządzeniu. Następnie energia tej fali jest zamieniana na postać energii elektrycznej za pomocą czułego detektora, wspomaganego przez fotodiody lub fotopowielacze. W wyniku powyższego procesu powstaje sygnał prądowy proporcjonalny do natężenia zaobserwowanego rozproszonego światła. W badaniach najczęściej wykorzystuje się laser impulsowy, w którym w celu obliczenia odległości pomiędzy urządzeniem LiDAR a badanym obiektem mierzony jest czas pomiędzy wysłaniem a odbiorem danego impulsu laserowego, a następny impuls jest wysyłany dopiero po odbiorze poprzedniego. [59,60]

W omawianym przypadku dane zostały zebrane przez pojazd latający poruszający się ponad badanymi obiektami w wielu różnych kierunkach. Dzięki powyższemu działaniu pozyskane dane są dokładniejsze, ale ponieważ wyniki poszczególnych pomiarów nakładają się na siebie, otrzymane w ten sposób zbiory punktów mają charakter nieuporządkowany. Z tego powodu dalsze ich przetwarzanie zakłada m.in. przekształcenie ich struktury

przestrzennej do postaci ułatwiającej zastosowanie kolejnych operacji.



Rys. 21. Schemat układu pomiarowego urządzenia LiDAR [59]

Większość danych dotyczących środowiska lądowego została udostępniona Wydziałowi Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK) [61]. Otrzymane dane pochodzą z obszarów zaznaczonych na Rys. 22 kolorem żółtym i są one podzielone na kilkadziesiąt tysięcy sektorów, z czego każdy reprezentuje teren o powierzchni około 29 hektarów. Niestety, taki sposób przechowywania danych ma pewną wadę, polegającą na tym że punkty reprezentujące kształt pojedynczego obiektu mogą znajdować się w kilku sąsiadujących ze sobą sektorach (jak można zauważyć na Rys. 23). W związku z powyższym, w celu wyodrębnienia tego rodzaju danych z plików źródłowych i przygotowania odpowiednio scalonych zbiorów punktów, konieczne było stworzenie dedykowanego oprogramowania, które zostało dokładniej opisane w rozdziale 6. Spośród wszystkich wykorzystanych w badaniach danych pochodzących z CODGiK, w ramach niniejszej pracy ograniczono się do zaprezentowania informacji pochodzących wyłącznie z trzech sektorów, zaznaczonych na Rys. 22 kolorem czerwonym.

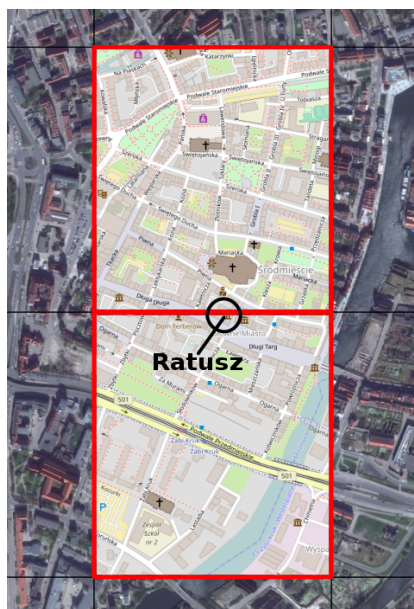


Rys. 22. Siatka danych CODGiK. Kolorem żółtym oznaczono obszar udostępniony przez CODGiK. Kolorem czerwonym oznaczono sektory, z których pochodzą poszczególne zestawy danych zaprezentowane w niniejszej pracy.

Dane pozyskane za pomocą urządzeń LiDAR mają postać plików zapisanych w formacie LAS w wersji 1.2 [62]. W kontekście wykonanych badań, podstawowe dane stanowiły rekordy zawierające informacje o współrzędnych XYZ poszczególnych punktów, zapisanych w układzie „PUWG 1992” (*Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 1992*), przeznaczonym do stosowania dla map w skalach nie większych niż 1:10 000. Jest to układ współrzędnych jednolity dla obszaru całej Polski, oparty na odwzorowaniu Gaussa-Krügera z użyciem elipsoidy WGS84, z południkiem osiowym wynoszącym 19° długości geograficznej wschodniej [63,64]. Jako że układ ten ma na celu kompromisowe rozłożenie liniowych zniekształceń odwzorowawczych (których wartości nie przekraczają 1 m/km w skrajnych obszarach Polski), uznano, że jego dokładność jest wystarczająca na potrzeby przeprowadzonych badań, a ewentualne zniekształcenia wynikające z przyjętego odwzorowania nie mają istotnego wpływu na jakość osiągniętych wyników.

W kontekście przeprowadzonych badań istotne były także rekordy zawierające dane o klasyfikacji poszczególnych punktów, które były już zawarte w wykorzystanych danych. W przypadku braku powyższych rekordów, informacje dotyczące klasyfikacji punktów można uzyskać na podstawie innych danych, takich jak intensywność rozproszonego światła i wysokość nad danym terenem [65], a także za pomocą operacji morfologicznych [66,67] w

przypadku przetwarzania danych rastrowych. Zestawienie najistotniejszych spośród klas przewidywanych przez dokumentację formatu LAS w wersji 1.2 zostało przedstawione w Tab. 1.



Rys. 23. Podział danych CODGiK na regularną siatkę i związany z nim problem rozdzielania informacji o niektórych obiektach na różne sektory (na przykładzie Ratusza Głównego Miasta w Gdańsku)

Tab. 1. Dostępne klasy w formacie LAS w wersji 1.2

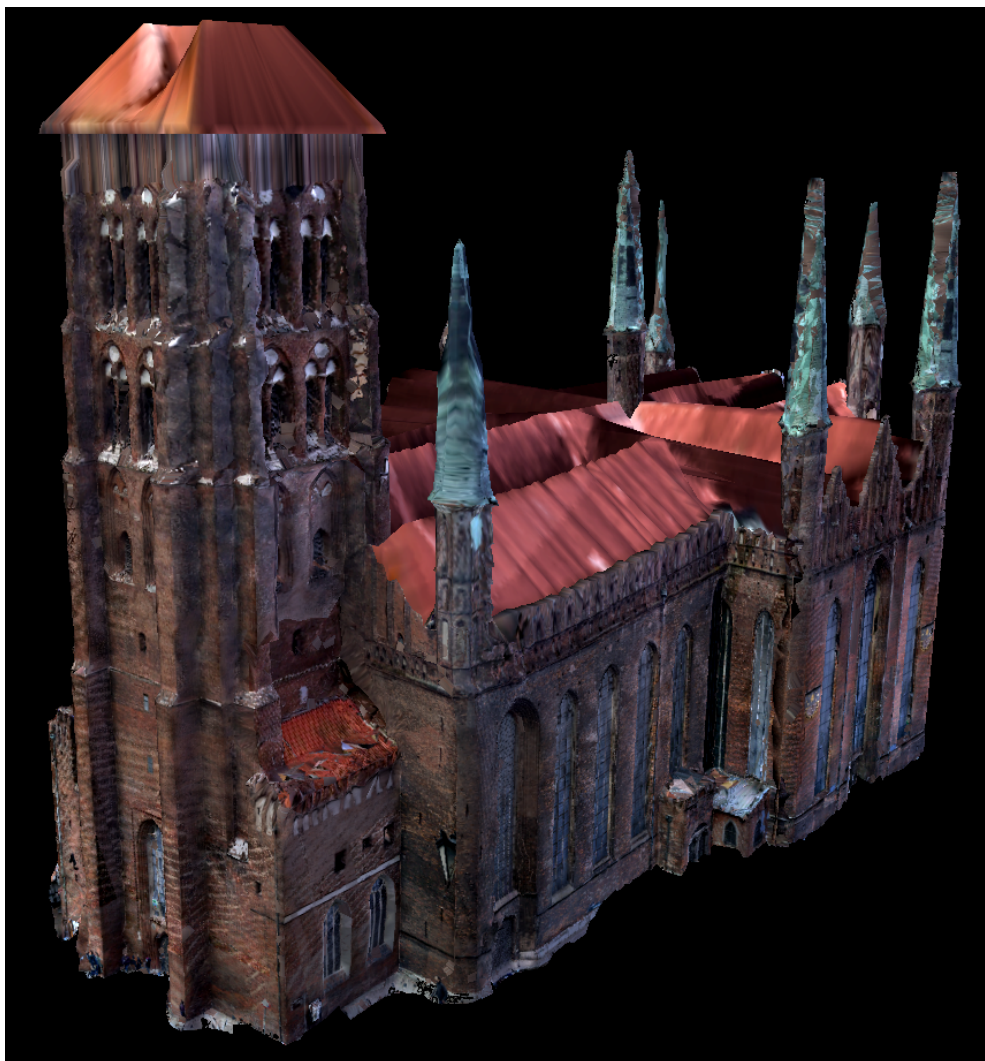
Wartość	Znaczenie
0	<i>punkty niesklasyfikowane</i>
1	<i>jak wyżej (wartość stosowana w celu zachowania kompatybilności z istniejącym oprogramowaniem)</i>
2	<i>ziemia (grunt)</i>
3	<i>niska roślinność</i>
4	<i>średnia roślinność</i>
5	<i>wysoka roślinność</i>
6	<i>budynki</i>
7	<i>zakłócenia</i>
8	<i>punkty charakterystyczne o dobrze określonej lokalizacji</i>
9	<i>woda</i>

3.4. Modele referencyjne

Do danych wykorzystywanych w przeprowadzonych badaniach należy zaliczyć także szczegółowe, trójwymiarowe modele wybranych obiektów używane w celu weryfikacji działania opracowanych metod. Modele te zostały otrzymane na podstawie dokładniejszych modeli i danych pomiarowych niż w przypadku brył generowanych za pomocą metod automatycznej rekonstrukcji kształtów na podstawie danych niekompletnych, pochodzących z echosond czy skanerów laserowych. Modele te wykorzystywane są jako wzorzec w celu weryfikacji jakości testowanych metod odtwarzania kształtu.

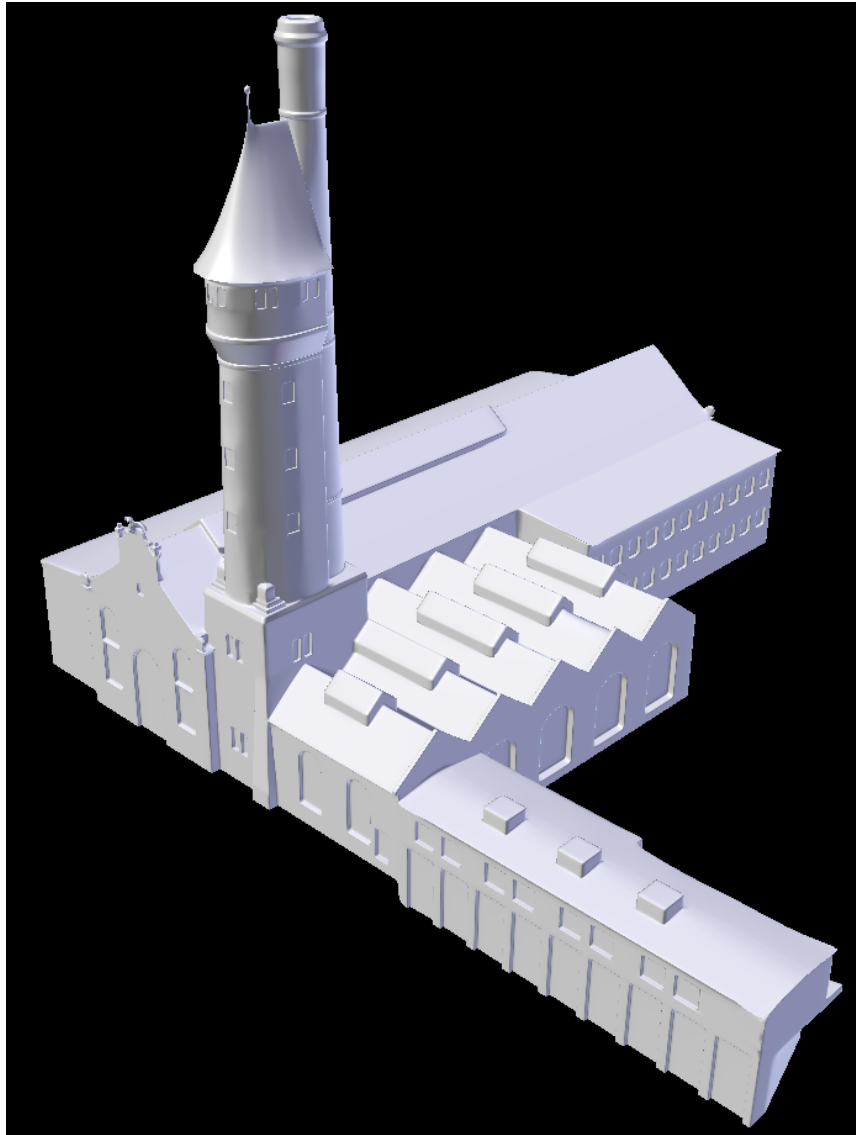
Pierwszy model referencyjny otrzymano za pomocą technologii fotogrametrii, na potrzeby której wykonana została seria 323 zdjęć przedstawiających Bazylikę konkatedralną Wniebowzięcia Najświętszej Maryi Panny w Gdańsku. Fotografie wykonane zostały w odstępach od trzech do czterech metrów w warunkach stosunkowo jednolitego oświetlenia. Następnie zdjęcia te zostały poddane prostym obróbkom graficznym polegającym głównie na ujednoczeniu ich poziomu jasności, kontrastu oraz ostrości, a także obróceniu niektórych z nich oraz usunięciu zdjęć nieudanych. Następnie przygotowany w ten sposób zestaw fotografii został przekazany na wejście programu Agisoft PhotoScan, który na jego podstawie wykonał trzy zadane przez użytkownika operacje: wygenerowanie uproszczonej chmury punktów, stworzenie złożonej chmury punktów oraz przekształcenie tej chmury do postaci otekstowanego modelu. Obliczenia składające się na tę operację zajęły w sumie trzy dni. Niestety, wszystkie podane na wejście programu zdjęcia wykonane zostały z usytuowaniem aparatu na niewielkiej wysokości, blisko poziomu gruntu, przez co niedokładnie reprezentują one wyższe partie Bazyliki, która ma ponad 80 metrów wysokości. Z powyższego względu algorytmy stosowane przez program PhotoScan otrzymały na wejściu zbyt mało informacji, przez co wygenerowany model 3D Bazyliki zawierał istotne niedobory informacji („dziury”) w zakresie reprezentacji dachu oraz liczne zniekształcenia na powierzchni wież. Oprócz tego wynikowy model zawierał także szereg błędów spowodowanych przysłonięciem rzeczywistego budynku przez przypadkowe obiekty, takie jak zaparkowane samochody. Aby otrzymany model mógł być pomyślnie wykorzystany do badań, konieczna była jego ręczna korekcja w programie Blender [68]. Korekcja ta obejmowała zarówno usuwanie wyżej opisanych zniekształceń, jak i uzupełnianie niektórych elementów modelu w oparciu o zdjęcia lotnicze Bazyliki. Proces obróbki modelu zajął w sumie ponad trzy tygodnie. Model

wynikowy został przedstawiony na Rys. 24.



Rys. 24. Model referencyjny Bazyliki NMP w Gdańsku otrzymany za pomocą technologii fotogrametrii

Drugi model wzorcowy przedstawia budynek Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Z początku planowano zastosować taką samą procedurę jego otrzymania jak w przypadku Bazyliki Wniebowzięcia NMP w Gdańsku, jednak po wstępnych oględzinach zrezygnowano z tego podejścia, ponieważ budynek ten był zasłonięty przez zbyt wiele elementów lokalnej topografii terenu, które niewątpliwie zaburzyłyby proces rekonstrukcji fotogrametrycznej. Zamiast tego model ten wykonany został ręcznie na podstawie jego planów architektonicznych budynku otrzymanych z Działu Inwestycji i Remontów Politechniki Gdańskiej. Proces ten zajął około trzech tygodni, zatem był on podobnie czasochłonny jak proces korekcji wygenerowanego modelu Bazyliki Mariackiej. Ostateczna wersja modelu została przedstawiona na Rys. 25.



Rys. 25. Model referencyjny budynku Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej odtworzony ręcznie na podstawie planów architektonicznych

W przypadku trzeciego oraz czwartego obiektu zastosowano inne podejście, ponieważ odwrotne niż powyżej: zamiast przygotowywania wzorcowych modeli dopasowanych do potrzeb dostępnych materiałów dotyczących wyników skanowania LiDAR, pozyskane zostały gotowe modele budynków, na podstawie których zasymulowano proces skanowania ich powierzchni za pomocą tej technologii. Proces symulacji pozwala na otrzymanie w stosunkowo prosty sposób odpowiednich danych na podstawie praktycznie dowolnych modeli trójwymiarowych o wymiarach rzeczywistych budynków, dlatego w ramach niniejszej pracy ograniczono się do opisu jedynie wybranych przypadków. Wykorzystane w ramach opisanych przypadków modele reprezentują odpowiednio miniaturkę Elizabeth Tower pobraną ze strony *MyMiniFactory* [69] oraz uproszczony model Zamku Świętego Anioła (wł. *Castel Sant'Angelo*) pobrany ze strony *3D Warehouse* [70]. Następnie modele te

zostały przeskalowane do wymiarów rzeczywistych budynków wyrażonych w systemie metrycznym. Następnie na podstawie modelu Elizabeth Tower wygenerowano dwa zestawy punktów, stanowiących symulacje wykonania skaningu laserowego na wysokościach odpowiednio 150 metrów n.p.t. oraz 300 metrów n.p.t. Jako że budynek ten jest stosunkowo wysoki (96 metrów wysokości), zasymulowanie procesu skanowania jego powierzchni z poziomu powyższych wysokości miało na celu uzyskanie chmur punktów cechujących się zauważalnie różną strukturą przestrzenną wynikającą z innego kąta padania poszczególnych wiązek skanera. W przypadku Zamku Świętego Anioła, mierzącego jedynie 48 metrów, taka różnica byłaby mniej zauważalna, dlatego w tym przypadku ograniczono się do symulacji skanowania jedynie na wysokości 150 metrów n.p.t. Proces symulacji został opisany szczegółowo w rozdziale 4.2, gdzie przedstawiono również omówione modele, a także zaprezentowano wyniki symulacji wykorzystane w dalszej części pracy.

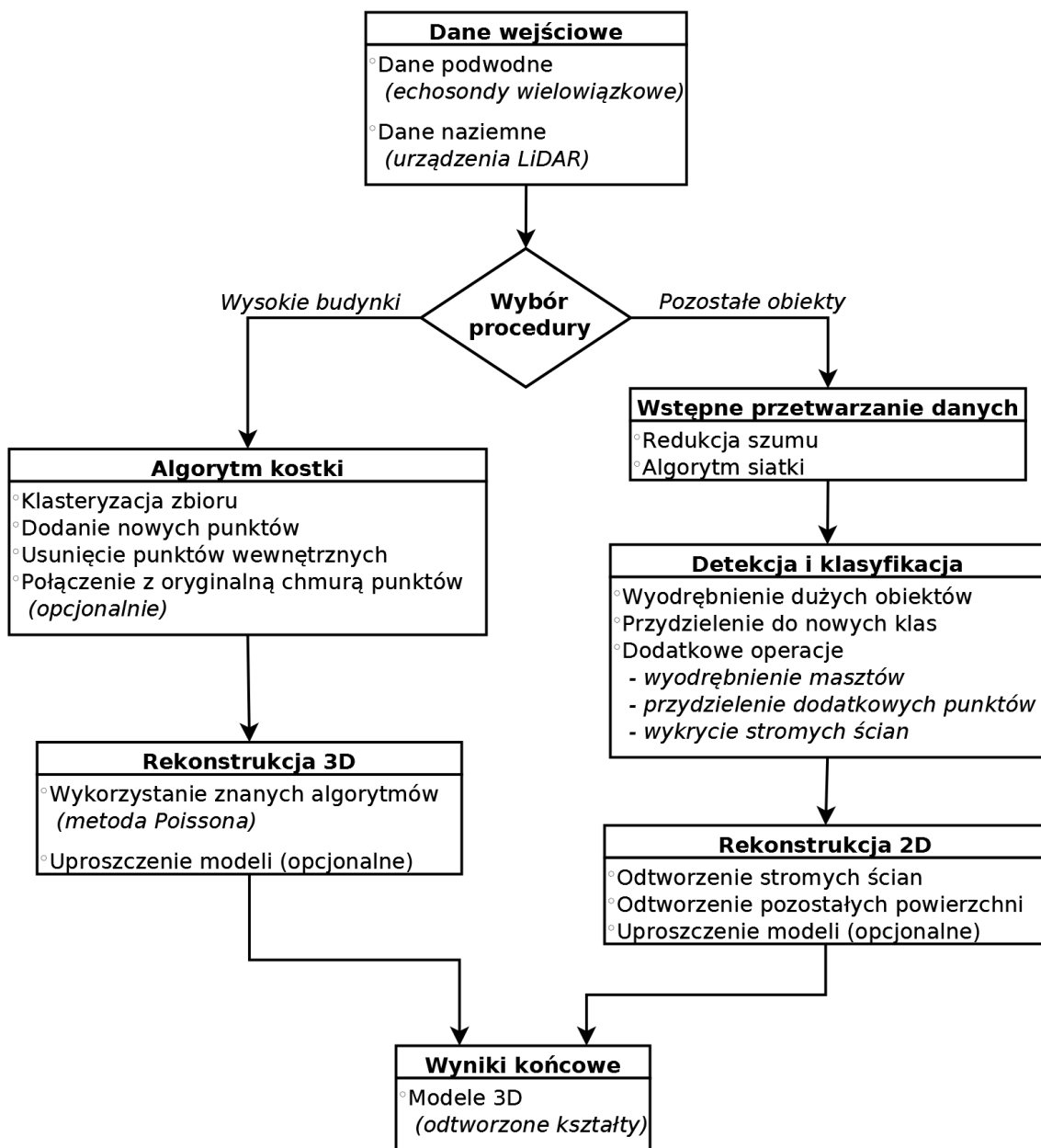
4. Opis zaproponowanych rozwiązań

4.1. Wprowadzenie. Koncepcja rozwiązania

Z praktyki wiadomo, że w celu dokonania automatycznej rekonstrukcji kształtu obiektów na podstawie pomiarowych danych przestrzennych, konieczne jest przeprowadzenie odpowiedniego wstępnego ich przetwarzania. Przetwarzanie to na ogół powinno mieć różny przebieg dla różnych przypadków zawartości sceny, a niekiedy różnić się co do przebiegu nawet w obrębie poszczególnych fragmentów tej samej sceny. Co więcej, z uwagi na nieregularność obiektów, ich zróżnicowanie, zmienny poziom złożoności i niejednorodną jakość danych w postaci chmur punktów, konieczne jest odmienne postępowanie dla różnych fragmentów sceny także na kolejnych etapach przetwarzania prowadzących do trójwymiarowej rekonstrukcji kształtów. Istotnym elementem wydaje się tu przeprowadzenie odpowiedniej klasyfikacji poszczególnych fragmentów zbioru danych.

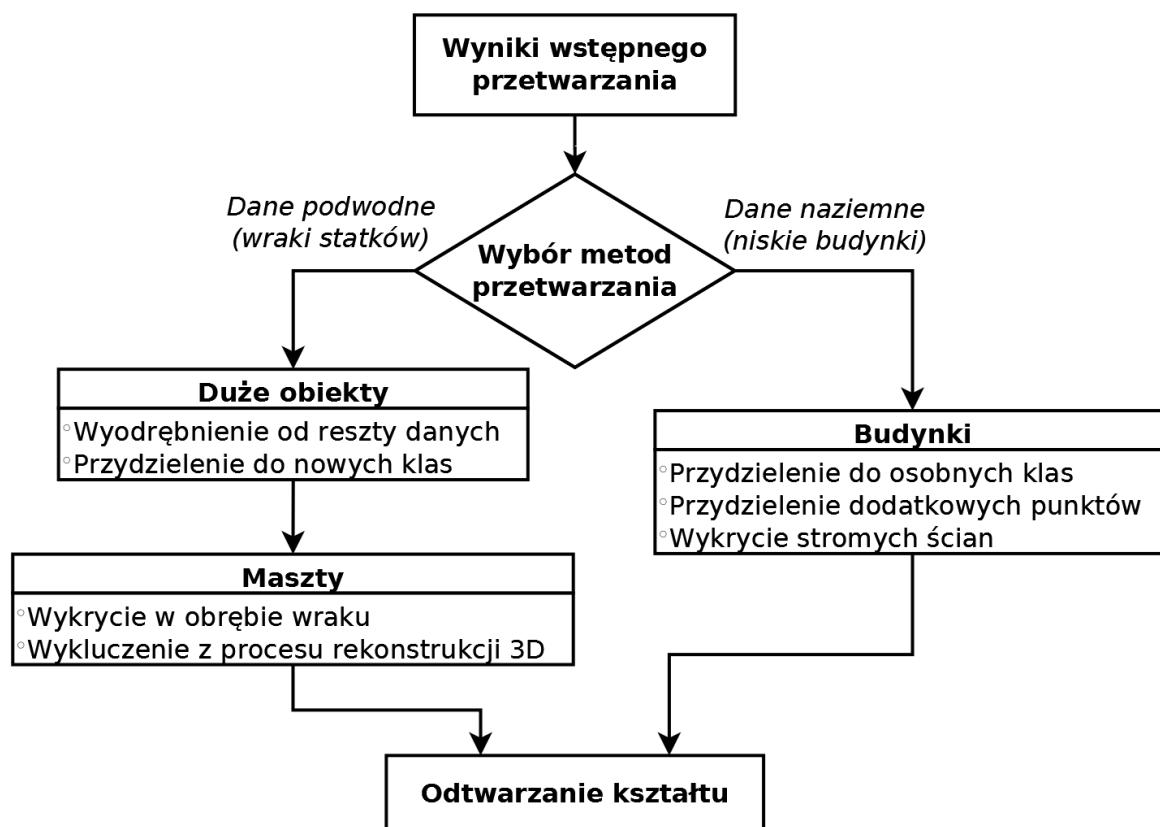
Biorąc powyższe pod uwagę, w ramach niniejszej pracy doktorskiej podjęto i przeprowadzono badania w celu opracowania nowej metodyki przetwarzania pomiarowych danych przestrzennych pochodzących z sondowania hydroakustycznego lub skanowania laserowego. Proponowana metodyka zakłada wieloetapowy proces przetwarzania danych zgodny ze schematem przedstawionym na Rys. 26. Dla większości rodzajów danych, proces ten obejmuje następujące elementy:

- I. Szeroko pojęte wstępne przetwarzanie danych wejściowych, obejmujące m. in. ich filtrację, uzupełnianie w pewnym zakresie danych brakujących, a także zwiększanie poziomu regularności tych danych (wliczając zastosowanie metod rasteryzacji).
- II. Detekcję i klasyfikację obiektów występujących we wstępnie przetworzonych danych, a także wykrywanie poszczególnych elementów tych obiektów (jak np. punktów opisujących ich zewnętrzny kształt).
- III. Odtwarzanie trójwymiarowych modeli na podstawie przetworzonych danych, z wykorzystaniem w tym celu nowo opracowanych metod rekonstrukcji modeli operujących w przestrzeni dwuwymiarowej.



Rys. 26. Schemat działania zaproponowanej metodyki przetwarzania danych przestrzennych

Opracowany schemat przetwarzania zakłada stosowanie zbliżonych procedur dla danych pochodzących zarówno z sondowania hydroakustycznego, jak i ze skanowania urządzeniem LiDAR, z wykorzystaniem dodatkowych kroków w zależności od charakterystycznych cech poszczególnych zbiorów danych. Największe różnice zachodzą na etapie detekcji i klasyfikacji obiektów występujących w przetwarzanych danych, co zostało szczegółowo zaznaczone na Rys. 27.



Rys. 27. Operacje wykonywane na etapie detekcji i klasyfikacji obiektów występujących we wstępnie przetworzonych danych, dla przypadku zastosowania algorytmu siatki

Dla wybranych rodzajów danych, reprezentujących wysokie obiekty o obfitującej w szczegóły powierzchni (jak np. wieże czy kościoły), zalecane jest stosowanie alternatywnego procesu przetwarzania, sprowadzającego się do wykonywania następujących operacji:

- I. Przetworzenia danych wejściowych do postaci chmur punktów cechujących się bardziej regularną strukturą przestrzenną od surowych danych, z wykorzystaniem opracowanego w tym celu *algorytmu kostki*.
- II. Rekonstrukcji trójwymiarowych modeli na podstawie przetworzonych danych, z zastosowaniem przy tym istniejących metod służących do rekonstrukcji modeli na podstawie danych w postaci trójwymiarowych chmur punktów.

Efektem końcowym zastosowania powyższej metodyki przetwarzania danych przestrzennych jest otrzymanie trójwymiarowych brył reprezentujących przybliżony kształt badanych obiektów.

4.2. Symulacja danych źródłowych

Ze względu na różnego rodzaju trudności i ograniczenia związane z pozyskaniem wartościowych danych testowych a także referencyjnych dla opisywanych algorytmów, część danych wejściowych reprezentujących kształt wybranych obiektów przestrzennych za pomocą nieregularnej chmury punktów została otrzymana poprzez wykonanie cyfrowej symulacji skaningu laserowego. Jak już wspomniano w poprzednich rozdziałach, w przypadku danych pochodzących z rzeczywistego skaningu czy sondowania, często istotny problem stanowi zebranie lub przygotowanie zestawu wzorcowych modeli reprezentowanych obiektów. Z tego powodu symulacja danych źródłowych niesie ze sobą dwie istotne zalety. Po pierwsze, symulacja procesu skanowania może być wykonana na podstawie niemal dowolnych modeli cyfrowych. Po drugie, wykorzystane w ramach symulacji modele wejściowe mogą być później użyte w celach porównawczych jako modele wzorcowe.

Proces symulacji polega na utworzeniu pustej sceny w trójwymiarowej przestrzeni oraz umieszczeniu w niej dwóch obiektów:

- I. wzorcowego modelu reprezentującego kształt danego obiektu (np. budynku) w możliwie najdokładniejszy sposób,
- II. tzw. Symulatora Skanera, składającego się z zestawu wektorów reprezentujących kierunek oraz kąt padania wiązek emitowanych przez laserowy skaner, taki jak np. urządzenie LiDAR.

Symulator Skanera z założenia ma reprezentować w uproszczony sposób działanie laserowego skanera dokonującego pomiarów ze stałą rozdzielczością przestrzenną, umieszczonego na pojeździe znajdującym się na stałej wysokości nad badanym obiektem, poruszającym się ruchem jednostajnym w jednym kierunku. Obiekt Symulatora posiada następujące parametry:

- Liczbę wiązek emitowanych przez skaner,
- Liczbę pomiarów (wykonywanych w równych interwałach czasowych),
- Odległość przebytą przez pojazd pomiędzy kolejnymi punktami w przestrzeni w których dokonywano pomiarów,
- Azymut,
- Maksymalny kąt padania wiązek względem prostopadłej do ziemi,
- Długość wektora reprezentującego kierunek oraz kąt padania pojedynczej wiązki,

- Położenie startowe Symulatora (względem środka układu współrzędnych).

Działanie Symulatora Skanera polega na wykrywaniu kolizji jego poszczególnych wiązek z modelem danego obiektu, a następnie generowaniu punktów w miejscach, w których nastąpiła intersekcja wiązki z daną płaszczyzną modelu. Wynikiem powyższego procesu jest powstanie nieregularnej chmury punktów opisującej przybliżony kształt badanego obiektu zeskanowanego przeważnie tylko z jednej strony (w zależności od położenia toru ruchu Symulatora). W celu lepszego zobrazowania procesu symulacji, na Rys. 28 zaprezentowano wizualizację skanowania bryły Elizabeth Tower w Londynie przy zastosowaniu następujących wartości parametrów:

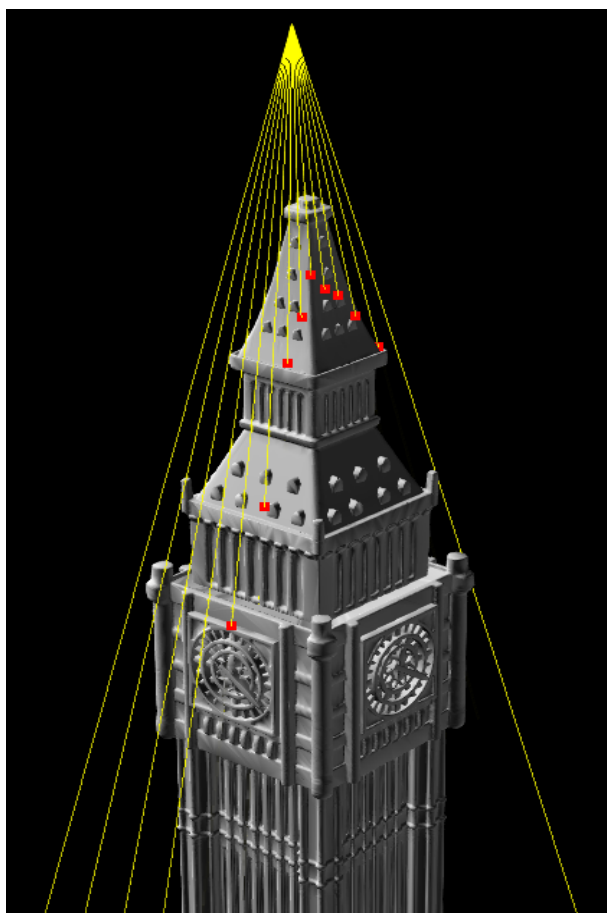
- Liczba emitowanych wiązek: 14
- Liczba pomiarów: 1
- Azymut: 110°
- Maksymalny kąt padania wiązek względem prostopadłej do ziemi: 35°
- Długość wektora reprezentującego pojedynczą wiązkę: 180 m
- Położenie startowe (XYZ): (1 m, 110 m, 3 m) względem środka układu współrzędnych

Widoczne na Rys. 28 żółte linie reprezentują poszczególne wiązki skanera, natomiast czerwone punkty symbolizują miejsca przecięcia promieni wiązek z powierzchnią budynku.

Jak już wspomniano w rozdziale 3.4, Symulator Skanera został wykorzystany w celu wygenerowania kilku zestawów punktów reprezentujących wyniki wykonania symulowanego skaningu laserowego powierzchni:

- Elizabeth Tower z założeniem znajdowania się urządzenia LiDAR na dwóch różnych wysokościach: 150 m n.p.t. oraz 300 m n.p.t.,
- Zamku Świętego Anioła z założeniem wysokości skanowania 150 m n.p.t..

W przypadku Elizabeth Tower, oba zbiory punktów zostały stworzone poprzez złożenie ze sobą wyników pochodzących z dwóch różnych torów ruchu Symulatora, gdzie jego parametry dla każdego przypadku zostały przedstawione w Tabeli 2. W przypadku Zamku Świętego Anioła zastosowano podobne podejście, a wartości dobranych dla niego parametrów zostały wymienione w Tab. 3. Modele budynków wykorzystywanych podczas symulacji były zawsze umieszczane w układzie współrzędnych w taki sposób, żeby środek ich podstawy znajdował się w środku układu współrzędnych sceny, czyli w punkcie (0, 0, 0).



Rys. 28. Symulacja procesu skanowania powierzchni Elizabeth Tower w celu uzyskania trójwymiarowej chmury punktów

Tab. 2. Parametry wykorzystane podczas symulacji laserowego skanowania powierzchni Elizabeth Tower

Nazwa parametru	Wartość (tor ruchu I)	Wartość (tor ruchu II)
Liczba emitowanych wiązek	160	160
Liczba pomiarów	30	30
Odległość przebyta pomiędzy kolejnymi pomiarami	0,75 m	0,75 m
Kierunek ruchu pojazdu	80°	170°
Maksymalny kąt padania wiązek względem prostopadłej do ziemi	50°	50°
Długość wektora reprezentującego pojedynczą wiązkę	180 m	350 m

Położenie startowe (XYZ) przy skanowaniu na wysokości 150 m n.p.t. [m]	$(-7, 150, 25)$	$(-20, 150, -8)$
Położenie startowe (XYZ) przy skanowaniu na wysokości 300 m n.p.t. [m]	$(6, 300, 94)$	$(-94, 150, 6)$

Tab. 3. Parametry wykorzystane podczas symulacji laserowego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła

Nazwa parametru	Wartość (tor ruchu I)	Wartość (tor ruchu II)
Liczba emitowanych wiązek	480	480
Liczba pomiarów	100	100
Odległość przebyta pomiędzy kolejnymi pomiarami	1,25 m	1,25 m
Kierunek ruchu pojazdu	300°	30°
Maksymalny kąt padania wiązek względem prostopadłej do ziemi	100	100
Długość wektora reprezentującego pojedynczą wiązkę	250	250
Położenie startowe (XYZ) [m]	$(-8, 150, 120)$	$(-130, 150, -13)$

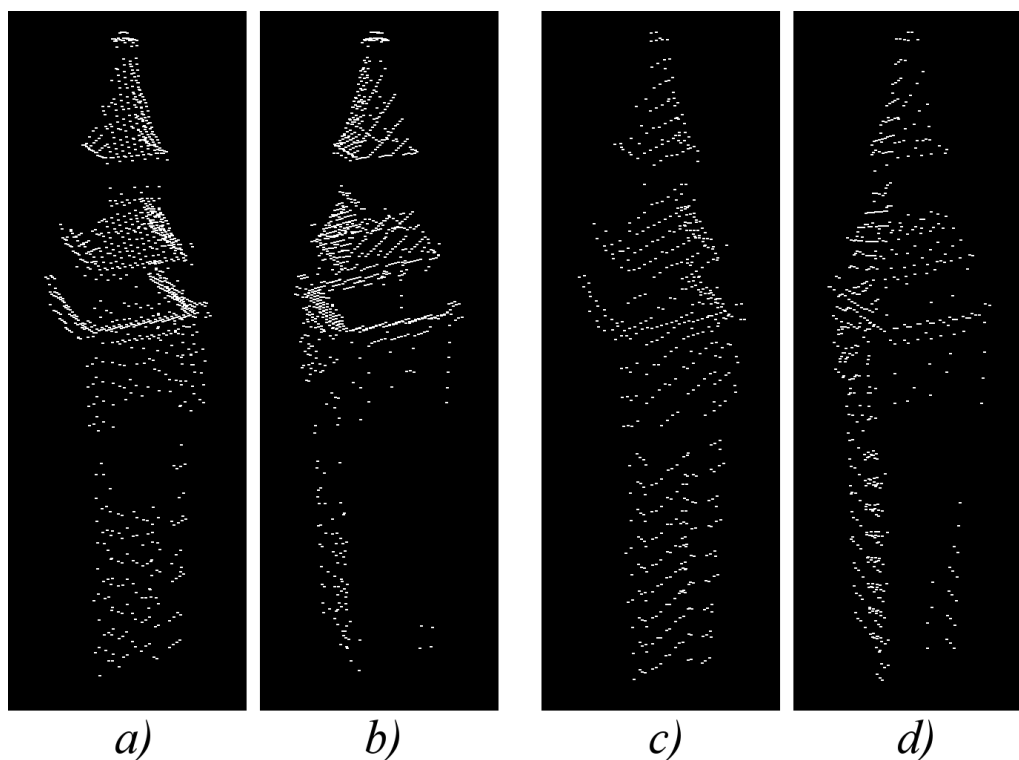
Chmury punktów otrzymane w wyniku wykonania poszczególnych symulacji na modelu Elizabeth Tower z użyciem parametrów wymienionych w Tab. 2 zostały przedstawione na Rys. 29. Do dalszych badań wykorzystane zostały dwa zbiory punktów złożone odpowiednio z par zestawów:

- a) i b), stanowiących zbiór punktów opisujący wyniki symulacji skanowania na wysokości 150 m nad ziemią,
- c) i d), przedstawiających wyniki symulacji skanowania 300 m nad ziemią.

Powyższe wyniki zostały przedstawione na Rys. 30, na którym porównano je z wejściowym modelem (Rys. 30a). Wynikowy zbiór danych otrzymany na podstawie symulowanego skanowania na wysokości 150 m n.p.t. (Rys. 30b) składa się w sumie z 2090 punktów. Można zauważyć, że górne elementy modelu są reprezentowane w znacznie



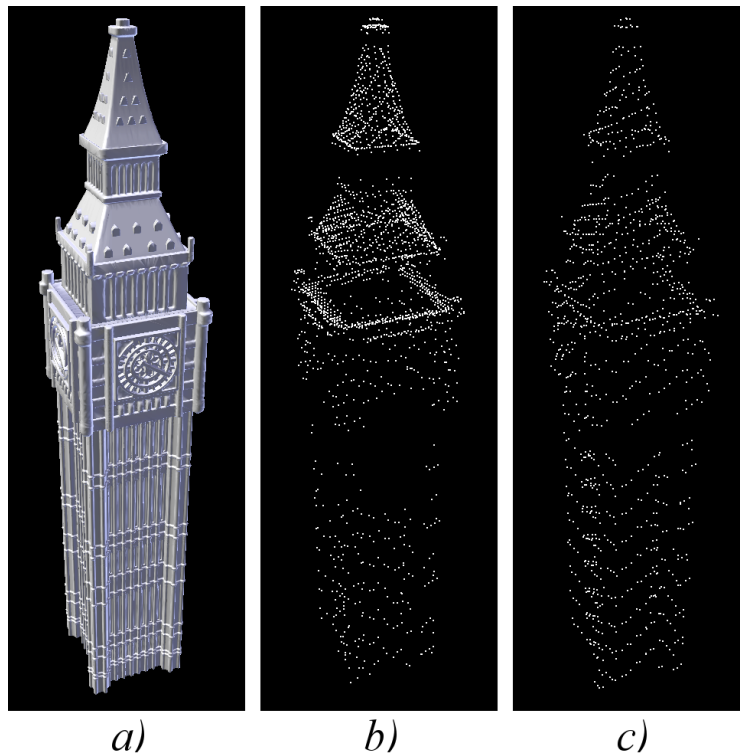
dokładniejszy sposób od jego dolnych elementów. Oprócz tego widać wyraźnie, że fragmenty danych znajdujące się bezpośrednio pod tarczą zegara charakteryzują się najmniejszym zagęszczeniem punktów. Drugi z wynikowych zbiorów, otrzymany na podstawie symulacji skanowania wykonanego na wysokości 300 m ponad poziomem gruntu (Rys. 30c), składa się w sumie z 1127 punktów. Łatwo dostrzec, że rozdzielczość tego zbioru jest niemal dwukrotnie niższa od rozdzielczości poprzedniego zbioru, jednak z drugiej strony jego punkty są bardziej równomiernie rozłożone po całej powierzchni obiektu, co czyni jego strukturę przestrzenną bardziej jednolitą. Z powyższego powodu luka występująca pod tarczą zegara jest mniej widoczna na tle pozostałych fragmentów danych, jednak z drugiej strony sylwetka całego obiektu jest trudniejsza do odróżnienia od tła.



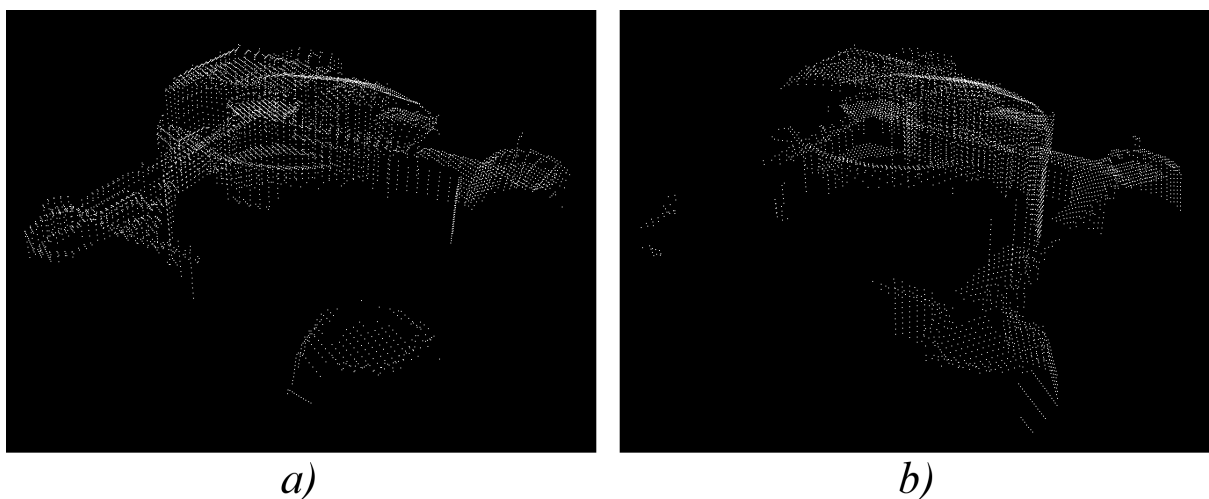
Rys. 29. Wyniki symulacji skanowania laserowego powierzchni Elizabeth Tower: a) tor I 150 m nad ziemią, b) tor II 150 m nad ziemią, c) tor I 300 m nad ziemią, d) tor II 300 m nad ziemią

Zestawy punktów otrzymane na podstawie modelu Zamku Świętego Anioła z wykorzystaniem parametrów z Tab. 3 zostały zaprezentowane na Rys. 31. Wynik końcowy symulacji, stanowiący scalenie obu zbiorów punktów, składa się w sumie z 11105 punktów i został on przedstawiony na Rys. 32b), a także porównany z oryginalnym modelem na Rys. 32a). Jak łatwo zauważyć, wynikowy zbiór punktów jest niekompletny i zawiera on

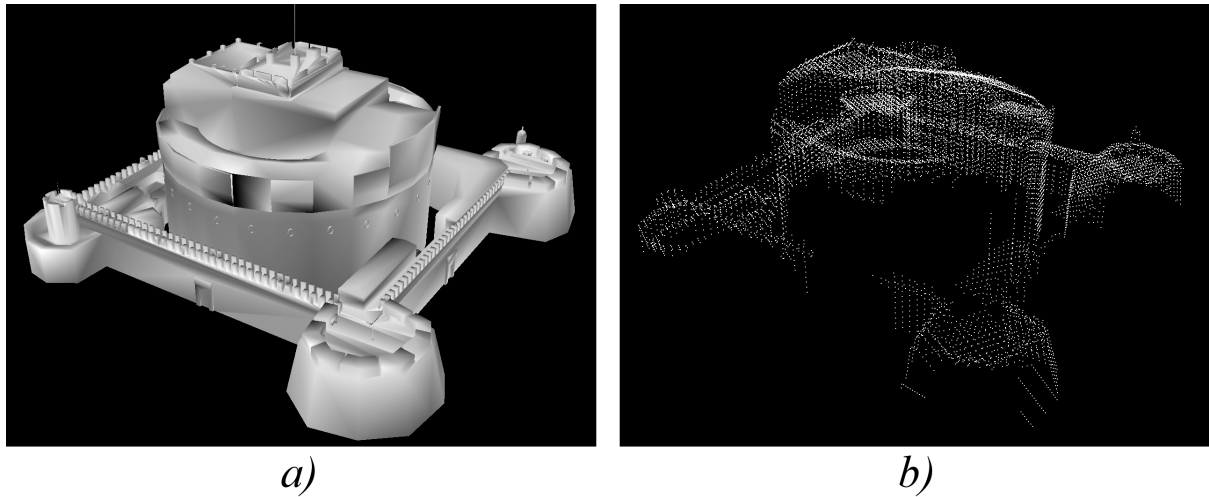
pewne braki odnoszące się do elementów docelowych. Jest to działanie zamierzone, mające na celu zaprezentowanie rezultatów przetworzenia tak niekompletnego zestawu danych przez różne algorytmy w dalszej części pracy.



Rys. 30. Wejściowy model Elizabeth Tower (a) porównany z wynikowymi chmurami punktów powstałymi na podstawie połączonych wyników symulacji skanowania na wysokości 150 m n.p.t. (b) oraz na wysokości 300 m n.p.t. (c)

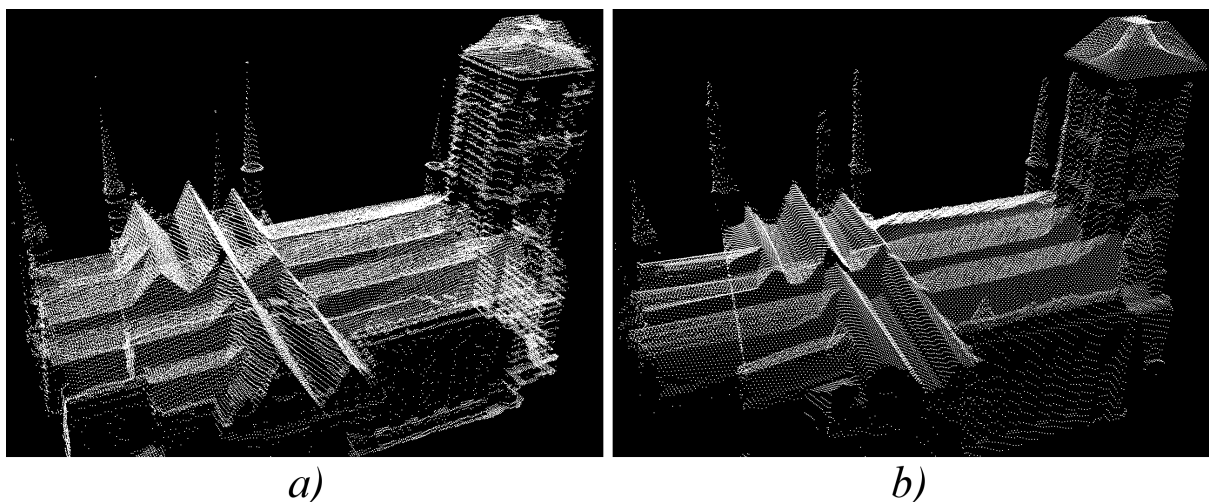


Rys. 31. Wyniki symulacji skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła: a) tor I, b) tor II



Rys. 32. Model wejściowy Zamku Świętego Anioła (a) porównany z końcowym wynikiem symulacji skanowania jego powierzchni (b)

Jako że w rzeczywistym skaningu laserowym zachodzi wiele zjawisk fizycznych które mogą mieć wpływ na jego wyniki, trudno jest jednoznacznie określić, czy zaproponowana metoda symulacji obejmuje wszystkie czynniki powodujące zniekształcenia w otrzymanych chmurach punktów. Sprawdzono natomiast, że struktura przestrzenna zasymulowanych zbiorów danych jest zbliżona do struktury przestrzennej wyników faktycznego skaningu wykonanego za pomocą urządzeń LiDAR. Można to zaobserwować na Rys. 33, na którym przedstawiono porównanie chmury punktów powstałej poprzez zeskanowanie powierzchni Bazyliki NMP w Gdańsku (Rys. 33 a) z danymi uzyskanymi za pomocą opisywanego Symulatora (Rys. 33 b) na podstawie modelu opisanego w rozdziale 3.4 (Rys. 24).



Rys. 33. Porównanie wyników skanowania LiDAR (a) ze zbiorem danych wygenerowanym za pomocą Symulatora Skanera (b)

4.3. Wstępne przetwarzanie danych

W zaproponowanej w niniejszej rozprawie metodologii przetwarzania danych przestrzennych, jednym z najważniejszych kroków wykonywanych na etapie wstępnego przetwarzania danych jest przekształcanie ich z postaci nieregularnych chmur punktów w strukturę opartą na modelu danych rastrowych. Rasteryzacja ta jest krokiem o tyle istotnym, że pozwala on na znaczne uproszczenie wszelkich obliczeń dokonywanych na późniejszych etapach przetwarzania, m.in. tych związanych z zastosowaniem algorytmów wykrywania obiektów, a ponadto umożliwia on korzystanie z metod triangulacji przeznaczonych dla zbiorów punktów umieszczonych w przestrzeni dwuwymiarowej.

Bardzo istotnym elementem procesu rasteryzacji jest dobór odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej tworzonego rastra. W omawianym przypadku stosowane są dwa podejścia do określania optymalnej rozdzielczości w celu stworzenia wynikowych rastrowych sieci punktów:

- I. Zdecydowana większość wykorzystanych w badaniach zbiorów danych dotyczących obszarów podwodnych została pozyskana z użyciem jednostki pływającej, która w czasie dokonywania pomiarów poruszała się przeważnie w jednym kierunku (maksymalne odchylenie od głównego kierunku rzadko przekraczało piętnaście stopni). W związku z tym, kolejne sondowania dostarczały kolejnych zbiorów punktów tworzących stosunkowo regularne linie zorientowane prostopadle do kierunku ruchu jednostki pływającej. Interpretacja tych danych została sprowadzona do traktowania ich jako dwuwymiarowej tablicy danych rastrowych, której wiersze reprezentują zestawy punktów wykrytych podczas pojedynczego sondowania, natomiast liczba kolumn w tej tablicy odpowiada liczbie wiązek echosondy wielowiązkowej.
- II. W pozostałych przypadkach, obejmujących m. in. zbiory danych reprezentujących obiekty naziemne, stosowany jest bardziej złożony proces rasteryzacji zwany *algorytmem siatki*, który został szczegółowo przedstawiony w dalszej części rozdziału.

W ramach procesu wstępnego przetwarzania danych wejściowych można wyróżnić trzy procedury [71], których stosowanie ma na celu zmniejszenie lub całkowite usunięcie zniekształceń spowodowanych przez różnego rodzaju czynniki towarzyszące zbieraniu danych, przy jednoczesnym zachowaniu w jak największym stopniu wszelkich informacji istotnych w dalszym przetwarzaniu danych:

1. Metoda zmodyfikowanego filtra maksymalnego, która jest wykonywana na niektórych fragmentach zbioru danych przed jego rasteryzacją,
2. Wspomniany wcześniej algorytm siatki, mający na celu zwiększanie regularności danych cechujących się silnym zróżnicowaniem lokalnego zagęszczenia punktów,
3. Generowanie nowych punktów w pustych fragmentach zbioru danych.

Ze względu na swoją złożoność, procedury te zostały szczegółowo opisane w osobnych podrozdziałach.

4.3.1. Zmodyfikowany filtr maksymalny

W niektórych zbiorach danych występują niekiedy lokalne zgrupowania punktów, w obrębie których różnice w wysokości pomiędzy sąsiadującymi punktami znacznie przekraczają średnią różnicę wysokości sąsiadujących punktów dla przetwarzanego obiektu. W badanych danych wejściowych takie przypadki zaobserwowano w obrębie punktów opisujących kształt nadbudówki wraków niektórych statków, co jest najprawdopodobniej spowodowane przez liczne „dziury” w ich powierzchni. Taka sytuacja jest niedopuszczalna z punktu widzenia odtwarzania kształtu danego obiektu, gdyż może ona istotnie zaburzyć pracę na kolejnych etapach algorytmów rekonstrukcji wynikowych modeli.

Proponowanym sposobem na zmniejszenie tego problemu jest zastosowanie metody nazwanej „zmodyfikowanym filtrem maksymalnym” [72], którego działanie składa się z dwóch etapów:

- I. Usunięcia niektórych punktów należących do zakłóconego podzbioru, a następnie pozostawienia wyłącznie tych punktów, które będą w najlepszy możliwy sposób reprezentowały kształt zewnętrznych powierzchni obiektu.
- II. Wprowadzenia nowych punktów w miejsce tych usuniętych w celu zachowania ciągłości i regularności danych.

Proces wykrywania zakłóconych elementów zbiorów danych działa w następujący sposób: dla każdego wiersza przetwarzanego zbioru (przy założeniu, że wiersze reprezentują zestawy punktów wykrytych podczas pojedynczego sondowania) sprawdzane są lokalne różnice głębokości pomiędzy jego kolejnymi punktami, a następnie wyliczana jest pomocnicza zmienna R_{sr} mająca wartość średniej arytmetycznej różnic głębokości (wysokości) w obrębie całej linii. W kolejnym kroku na podstawie R_{sr} wyznaczane są według wzoru (8) liczby *sup* oraz *inf*, odpowiadające odpowiednio dolnej oraz górnej granicy zakresu wartości

uznawanych za dopuszczalne w danym zbiorze. Jeżeli w aktualnie przetwarzanym wierszu wykryty zostanie odpowiednio duży podzbiór punktów, w którym różnice wysokości pomiędzy kolejnymi sąsiadami będą wychodzić poza zakres dopuszczalnych wartości wyznaczany przez inf i sup , a do tego podzbiór ten będzie wystarczająco liczny (o jego dokładnym rozmiarze decyduje jeden z parametrów algorytmu), wówczas zostanie on zaklasyfikowany jako zakłócenie przewidywane do skorygowania za pomocą „zmodyfikowanego filtra maksymalnego”.

$$\begin{aligned} sup &= P \cdot R_{sr} \\ inf &= - P \cdot R_{sr} \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

sup – górna granica dopuszczalnych różnic głębokości,

inf – dolna granica dopuszczalnych różnic głębokości,

R_{sr} – średnia arytmetyczna różnic głębokości,

P – stała stanowiąca jeden z parametrów algorytmu,

$R_{sr}, P \geq 0$

Na Rys. 34a) przedstawiono uproszczony zestaw punktów, których średnia głębokość wynosi 49,31 m (przedstawiona chmura punktów została specjalnie przygotowana wyłącznie na potrzeby lepszego zobrazowania działania algorytmu wykrywania zakłóceń – przypadek przetwarzania danych rzeczywistego obiektu można znaleźć w dalszej części rozdziału, dotyczącej stosowania zmodyfikowanego filtra maksymalnego). Następnie dla powyższego zestawu wyliczone zostały różnice głębokości kolejnych punktów, zobrazowane na Rys. 34b), których średnia arytmetyczna R_{sr} wynosi 0,56 m. W tym przypadku za stałą P przyjęto wartość równą 1,1, zatem granice dopuszczalnych wartości wynoszą odpowiednio -0,62 m oraz 0,62 m. Jak można zauważyć, część punktów na tym wykresie przekracza te granice, jednak nie zawsze układają się one w spójny ciąg. Dobrym przykładem takiej sytuacji jest punkt o indeksie 17, którego wyliczona wartość przekracza górną granicę, jednak jej bezpośredni sąsiedzi już nie, podobną sytuację można zauważyć także dla pary punktów o indeksach 44 i 45. W rozważanym przypadku założono, że spójny podzbiór punktów o wyliczonych różnicach przekraczających dopuszczalne granice zostanie uznany za zakłócenia tylko wtedy, gdy będzie on obejmował przynajmniej 15% wszystkich punktów całego zbioru (którym może być np. pojedynczy wiersz danych), zatem musi on zawierać przynajmniej 9 punktów. Tylko ciąg punktów o indeksach od 22 do 41 spełnia wszystkie z powyższych

wymagań, dlatego zostanie on uznany za zakłócony obszar danych. Na Rys. 34c) zaprezentowano ostateczny wynik działania algorytmu: punkty czerwone oznaczają podzbiór danych, dla którego w kolejnym etapie przetwarzania zostanie zastosowana metoda zmodyfikowanego filtra maksymalnego, natomiast punkty niebieskie przedstawiają pozostałe punkty, których pozycje pozostaną niezmienione. Oprócz tego na Rys. 34d) przedstawiono wynik działania wspomnianego wcześniej algorytmu zmodyfikowanego filtra maksymalnego, opisanego w dalszej części rozdziału.

Algorytm zmodyfikowanego filtra maksymalnego sprowadza się do podzielenia zakłóconych podzbiorów danych na grupy kolejnych punktów (o określonej, odpowiednio dobranej liczebności takiej grupy), a następnie zachowaniu tylko tych spośród nich, które mają największą wartość współrzędnej Z w grupie. Algorytm postępuje tu zgodnie z założeniem, że punkty te będą w najlepszy możliwy sposób reprezentowały kształt zewnętrznych powierzchni opisywanych przez tę grupę punktów. W celu zachowania ciągłości i regularności danych, w miejsce usuniętych punktów wprowadzane są nowe, dla których wysokość każdego nowego punktu P jest wyliczana z wykorzystaniem liniowej interpolacji za pomocą wzoru (9).

$$P_h = A_h((B_i - P_i) / (B_i - A_i)) + B_h((P_i - A_i) / (B_i - A_i)) \quad (9)$$

gdzie:

P_h – wysokość wygenerowanego punktu P ,

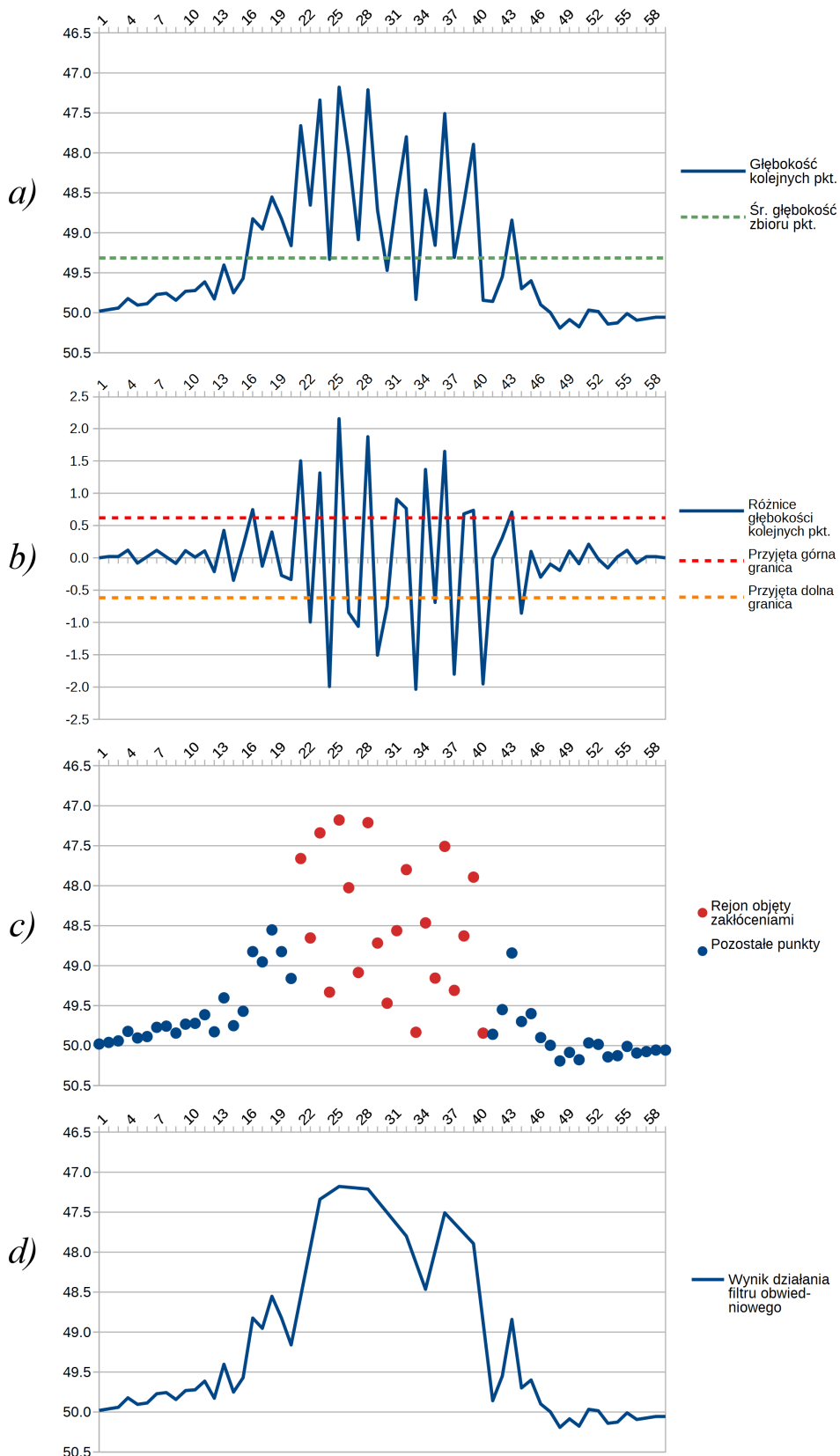
A_h, B_h – wysokości punktów A i B będących najbliższymi nieusuniętymi sąsiadami punktu P ,

A_i, B_i, P_i – indeksy tablicowe punktów A, B i P w tablicy,

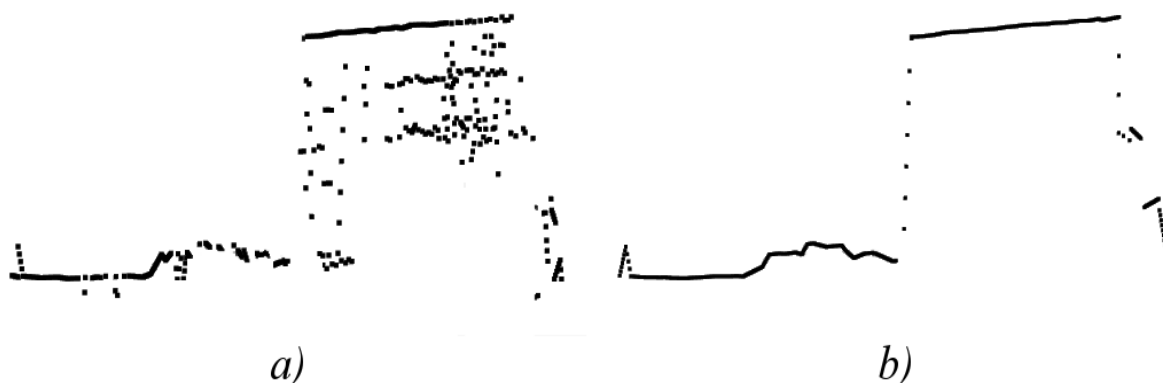
$A_i, B_i, P_i \geq 0$,

$A_i < P_i < B_i$

Zastosowanie powyższego podejścia zostało zaprezentowane na Rys. 35, gdzie Rys. 35a) przedstawia nieprzetworzoną listę punktów pochodzących z pojedynczego sondowania wraku statku i dna morskiego echosondą wielowiązkową, podczas gdy na Rys. 35b) przedstawiono rezultat przetworzenia tej listy metodą zmodyfikowanego filtra maksymalnego w obrębie wykrytego zakłócenia.



Rys. 34. Wizualizacja działania algorytmu wykrywania zakłóceń w przykładowym zbiorze danych (a), dla którego wyliczane są różnice pomiędzy poszczególnymi punktami (b) w celu oznaczenia podzbioru zakłóconych danych (c) oraz zastosowaniu na nim zmodyfikowanego filtru maksymalnego (d)



Rys. 35. Zestaw przykładowych punktów umieszczonych w dwuwymiarowej przestrzeni (a) oraz rezultat jego przetworzenia metodą zmodyfikowanego filtru maksymalnego (b)

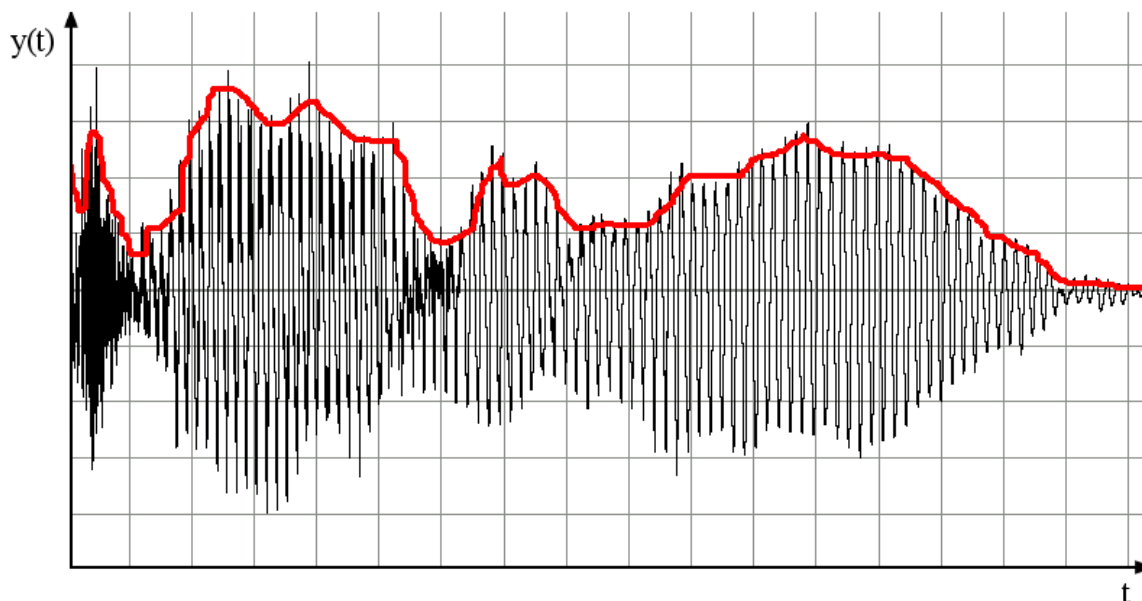
Działanie zmodyfikowanego filtru maksymalnego wzorowane jest metodami detekcji obwiedni stosowanych w dziedzinie sygnałów, która rozumiana jest tutaj jako chwilowa wartość amplitudy sygnału. Obwiednię można rozumieć również jako górne ograniczenie krzywej reprezentującej sygnał, co można zilustrować w sposób intuicyjny za pomocą przykładowego sygnału i jego obwiedni (Rys. 36). Należy jednak zaznaczyć, że przedstawiony na tym rysunku sygnał $y(t)$ (gdzie t oznacza czas) jest sygnałem wąskopasmowym o postaci opisanej za pomocą wzoru (10).

$$y(t) = y_e(t) \cdot \cos 2\pi f_0 t \quad (10)$$

gdzie:

$y_e(t)$ – sygnał obwiedni przedstawiony na Rys. 36 kolorem czerwonym, znacznie wolniej zmienny w stosunku do komponentu harmonicznego $2\pi f_0 t$ o częstotliwości f_0

W sygnale tym dla każdego okresu $T_0 = \frac{1}{f_0}$ występuje dokładnie jedno maksimum, a wszystkie one należą do sygnału $y_e(t)$, obwiednia jest więc w tym przypadku stosunkowo prosta do odtworzenia za pomocą klasycznych metod przetwarzania sygnałów operujących np. w dziedzinie widma sygnałów [73]. W przypadku analizowanych ciągów punktów, jako składowych sonarowych bądź lidarowych danych pomiarowych, z oczywistych względów nie występuje tego rodzaju regularność (porównaj Rys. 34) i do wygenerowania przebiegu obwiedni musi być zastosowane inne podejście.



Rys. 36. Obwiednia przykładowego sygnału, oznaczona kolorem czerwonym [74]

4.3.2. Algorytm siatki

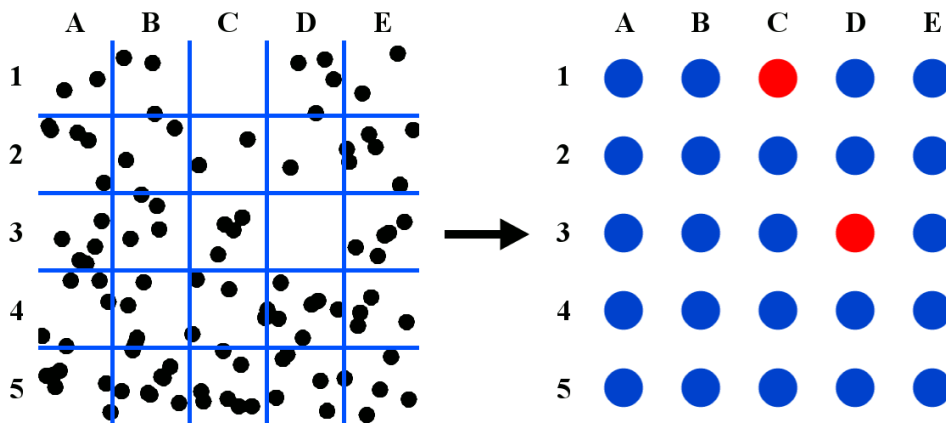
Algorytm siatki (opisywany w literaturze anglojęzycznej jako *2D grid conversion* [75]), polega na konwersji danych do postaci regularnej, dwuwymiarowej siatki punktów, z wyeliminowaniem w ten sposób różnych problemów związanych z dalszym przetwarzaniem danych, wynikających z potencjalnie dużego zróżnicowania lokalnego zagęszczenia punktów. Rozwiązanie to polega na podzieleniu obszaru, na którym znajdują się dane, na regularną siatkę dwuwymiarowych kwadratowych lub prostokątnych sektorów o równych wymiarach, gdzie do każdego sektora przydzielane są punkty znajdujące się w jego obrębie. Następnie zawartość każdego sektora zostaje przetworzona do postaci pojedynczego punktu w zasteryzowanej wersji przetwarzanego zbioru danych, gdzie wartość każdego pojedynczego piksela Z_{S_i} w wynikowym zbiorze danych będzie stanowiła średnią wysokość wszystkich punktów przypisanych do odpowiadającego mu sektora S_i (11). Proces ten został zobrazowany w uproszczony sposób na Rys. 37.

$$Z_{S_i} = \overline{z(P_j)}, P_j \in S_i \quad (11)$$

gdzie:

P_j – punkty należące do sektora S_i ,

$z(P_j)$ – wysokości punktów P_j



Rys. 37. Przykład podzielenia nieregularnego zbioru danych na regularną siatkę sektorów (zaznaczonych kolorem niebieskim) i konwersji ich do postaci dwuwymiarowej tablicy punktów. Punkty C1 i D3 (zaznaczone kolorem czerwonym) reprezentują elementy puste

Jeżeli zbiór danych dodatkowo zawiera informację o klasyfikacji poszczególnych punktów (sytuacja taka ma miejsce w przypadku przetworzonych naziemnych danych lidarowych), wówczas algorytm konwersji danego sektora do postaci piksela w wynikowym zbiorze danych uwzględnia także dodatkowo tę klasyfikację (12).

$$Z_{S_i} = \overline{z(P_j)}, P_j \in K_{Li} \quad (12)$$

gdzie:

P_j – punkty należące do sektora S_i , które zostały zaklasyfikowane do najliczniej występującej w tym sektorze klasy K_{Li}

$z(P_j)$ – wysokości punktów P_j

Działanie algorytmu polega na sprawdzeniu liczebności wszystkich klas, do których przypisane są wszelkie punkty znajdujące się w danym sektorze, a następnie na ograniczeniu się wyłącznie do zbioru punktów reprezentujących najliczniejszą klasę w tym sektorze. Jeżeli jest kilka klas równolicznych o największej liczbie reprezentantów, wówczas preferowany jest zbiór przypisany do klasy reprezentującej budynki (ze względu na ich istotę w przeprowadzonych badaniach dotyczących odtwarzania kształtu poszczególnych obiektów), a jeżeli taki zbiór nie istnieje w danym sektorze, wówczas wybierany jest zbiór przypisany do klasy o najniższym identyfikatorze.

Optymalne wymiary pojedynczego sektora, mające bezpośrednie przełożenie na rozdzielczość wynikowego zbioru danych rastrowych, ustalane są poprzez przetestowanie działania algorytmu dla różnych ich wartości drogą empiryczną. Jest to zadanie o tyle trudne, że nadmierne zwiększenie rozdzielczości danych skutkować będzie powstaniem zbiorów

zawierających dużą liczbę pustych elementów (wynikających z występowania sektorów, do których nie zostały przypisane żadne punkty). Z drugiej strony, zmniejszenie wynikowej rozdzielczości pozwala na całkowite zlikwidowanie elementów pustych, ale skutkiem ubocznym takiego rozwiązania jest jednocześnie zmniejszenie poziomu szczegółowości wynikowego zestawu danych, co może doprowadzić do całkowitego usunięcia istotnych elementów występujących w danych pierwotnych. Podczas omawianych prac badawczych przyjęto, że wybrane wymiary sektora są optymalne, jeżeli procentowa liczba pustych sektorów w wynikowym zbiorze była najmniejsza spośród wszystkich wymiarów przetestowanych i nie przekraczała ona 5% liczebności danego zbioru. Na Rys. 38 porównano dwa różne rezultaty konwersji pojedynczego zestawu danych zawierającego informację o klasyfikacji punktów z przyjęciem różnej rozdzielczości. Sposób przypisania kolorów na Rys. 38 do poszczególnych klas obiektów został przedstawiony w Tab. 4.

Tab. 4. Sposób przypisania kolorów poszczególnym klasom obiektów do celów wizualizacyjnych

Przypisany kolor	Klasa obiektów
Biały	<i>Budynki</i>
Odcienie zielonego	<i>Różne rodzaje roślinności</i>
Brązowy	<i>Grunt</i>
Czarny	<i>Brak danych</i>

W przedstawionym przykładzie, oryginalny zestaw danych składa się z 274 tys. punktów reprezentujących teren o powierzchni 14 tys. m². Na Rys. 38a) przedstawiono wynik konwersji omawianego zbioru danych do postaci rastra składającego się z 230 tys. pikseli, w którym każdy piksel odpowiada fragmentowi rzeczywistego terenu o wymiarach 0,25 m × 0,25 m, gdzie około 36% obrazu składa się z elementów pustych (brak danych). Rys. 38b) przedstawia zbiór po konwersji składający się z 58 tys. pikseli odpowiadających jednakowym obszarom terenu o wymiarach 0,5 m × 0,5 m. W tym przypadku 2%, a więc bardzo niewielką ilość wynikowego rastra stanowiły elementy puste. Ich wartości zostały wyliczone w prosty sposób na podstawie wartości z sąsiednich pikseli.

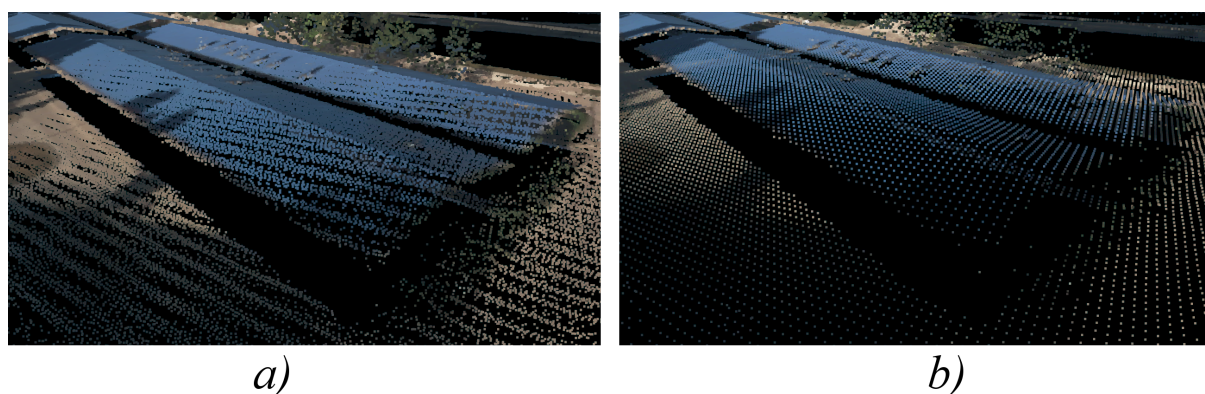
Przy dobraniu odpowiedniej rozdzielczości wynikowego zbioru danych możliwe jest uproszczenie jego struktury przy minimalnym zmniejszeniu ilości przechowywanych przez niego informacji, szczególnie gdy oryginalne dane zawierały nadmiar punktów w stosunku



do ilości informacji jaką chce się reprezentować w przetworzonej postaci danych. Taką sytuację dobrze przedstawia Rys. 39. Na Rys. 39a) pokazane jest zbliżenie na oryginalny zbiór danych w postaci nieuporządkowanej chmury punktów o średniej rozdzielczości wynoszącej 19 punktów na metr kwadratowy, podczas gdy Rys. 39b) przedstawia jego przetworzoną do rastra wersję o stałej rozdzielczości wynoszącej 4 punkty na metr kwadratowy. Jak widać na przykładzie zobrazowanych budynków, zawartość uproszczonego zbioru jest bardzo zbliżona do oryginalnych danych.



Rys. 38. Dwa różne rezultaty przetworzenia pojedynczego zbioru danych do postaci rastrów o rozdzielczościach $0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m}$ (a) oraz $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ (b)



Rys. 39. Rezultat konwersji nieregularnej chmury punktów o średniej rozdzielczości 19 punktów na metr kwadratowy (a) do postaci regularnego zbioru o stałej rozdzielczości 4 punktów na metr kwadratowy (b)

4.3.3. Generowanie nowych punktów w zbiorze danych

Generowanie i umieszczanie nowych punktów (nowych wartości) w pustych

fragmentach zbioru danych jest operacją mającą na celu zapobieganie powstawaniu „dziur” w odtwarzanych modelach. W zaproponowanej metodyce, nowe punkty generowane są na podstawie wartości istniejących punktów znajdujących się w pobliżu wypełnianego obszaru. Liczebność nowych punktów jest zależna od przyjętej rozdzielczości przetwarzanego zbioru danych, a ich współrzędne są wyliczane poprzez interpolację pomiędzy współrzędnymi istniejących punktów. Operacja ta jest wykonywana nie tylko na etapie wstępnego przetwarzania danych, ale w przypadku danych podwodnych wykorzystywana jest ona także po dokonaniu ich późniejszej klasyfikacji, mając na celu zlikwidowanie nowych „dziur” powstających podczas detekcji masztów statków i wyodrębnianiu ich do postaci osobnych obiektów. W większości przypadków, proces uzupełniania miejsc gdzie występuje brak danych jest stosunkowo prosty, a jego działanie jest dostosowane do struktury przetwarzanych danych. Zazwyczaj omawiany proces jest stosowany dla danych przechowywanych w postaci dwuwymiarowej tablicy, wówczas dla każdej pustej komórki następuje wyszukanie jej wszystkich bezpośrednich sąsiadów – w zależności od indeksu komórki, liczba jej sąsiadów wynosi od 3 do 8. Następnie komórce tej przypisywane są nowe wartości, wyliczone poprzez uśrednienie wartości jej sąsiadów. Jeżeli zbiór danych uwzględnia klasyfikację poszczególnych punktów, wówczas zbiór sąsiadujących komórek jest ograniczany wyłącznie do tych, które reprezentują najliczniejszą klasę w ich obszarze. Istnieją również takie sytuacje, gdy proces uzupełniania „dziur” rozpatrywany jest jedynie w przestrzeni jednowymiarowej, czyli np. dla listy punktów reprezentujących wyniki sondowania dna morskiego w obrębie pojedynczego wiersza danych, odpowiadającego jednemu sondowaniu. W takim przypadku uzupełnianie danych zwykle wiąże się ze stosowaniem liniowej interpolacji pomiędzy istniejącymi punktami i zachowaniem stałej liczby punktów w każdym wierszu.

4.4. Detekcja i klasyfikacja obiektów

Wykrywanie poszczególnych elementów w przetwarzanych danych wejściowych i przypisywanie ich do różnych klas jest podejściem posiadającym wiele zalet. Najważniejszą z nich jest niewątpliwie możliwość podzielenia danych na mniejsze fragmenty reprezentujące niezależne od siebie obiekty, pozwalając np. na oddzielenie wraków statków od obszaru reprezentującego dno morskie czy budynków od otaczającej ich zieleni, co umożliwia ograniczenie dalszego przetwarzania danych wyłącznie do obszaru konkretnych typów obiektów istotnych z punktu widzenia prowadzonych badań. Klasyfikacja danych

wejściowych ma również istotne znaczenie w kontekście odtwarzania trójwymiarowych kształtów, ponieważ zapobiega ona powstawaniu niektórych deformacji w rekonstruowanych modelach spowodowanych przez sklejanie ze sobą różnych niezależnych od siebie obiektów. Do innych zalet zastosowania klasyfikacji zaliczyć należy także umożliwienie zróżnicowania procedur przetwarzania danych dostosowanych do konkretnych klas obiektów, np. odtworzenie kształtu budynku wymagać będzie użycia bardziej złożonych metod niż rekonstrukcja modelu terenu cechującego się względnie niskim poziomem zróżnicowania. Niestety, automatyczne wykrywanie różnych klas obiektów w chmurach punktów nie jest zadaniem łatwym, a stworzone algorytmy muszą być dostosowane do konkretnych rodzajów środowisk, rodzaju terenu i obiektów opisywanych przez poszczególne zbiory danych. Z tego względu w niniejszej pracy wykorzystywane są różne procedury dostosowane do konkretnych rodzajów danych, które zostały szczegółowo opisane w dalszej części rozdziału.

4.4.1. Dane podwodne

W kontekście przeprowadzonych badań, najważniejszym etapem procesu automatycznej detekcji i klasyfikacji obiektów występujących w danych opisujących środowiska podwodne było wykrywanie zbiorów punktów opisujących kształt wraków statków i oddzielenie ich od punktów opisujących powierzchnię dna morskiego. W tym celu stworzony został wieloetapowy algorytm posiadający zestaw konfigurowalnych parametrów wejściowych, który pozwala na wykrycie i oddzielenie od siebie dużych obiektów leżących na tle obszarów o mało zróżnicowanej wysokości, takich jak typowe dno morskie na płytkich wodach. Poniżej przedstawiono opis poszczególnych kroków wykonywanych przez powyższy algorytm:

I. Tymczasowe usunięcie lokalnych zniekształceń: Utworzona zostaje kopia danych rastrowych opisujących wysokości poszczególnych punktów, a następnie redukowane są w niej niewielkie zniekształcenia o charakterze impulsowym poprzez zastosowanie filtru medianowego z wykorzystaniem macierzy o rozmiarach 3×3 . Zmodyfikowany w ten sposób zbiór wykorzystywany jest następnie jako odniesienie w kolejnych krokach algorytmu zamiast danych pierwotnych, ponieważ potencjalnie występujące w nich zniekształcenia mogłyby istotnie wpłynąć na jakość końcowych wyników klasyfikacji.

II. Klasyfikacja wstępna: Dane zostają podzielone na dwie klasy reprezentujące odpowiednio dno morskie oraz zestaw bliżej niekreślonych obiektów podwodnych. Przydział poszczególnych punktów do konkretnej klasy odbywa się na podstawie ich wysokości:

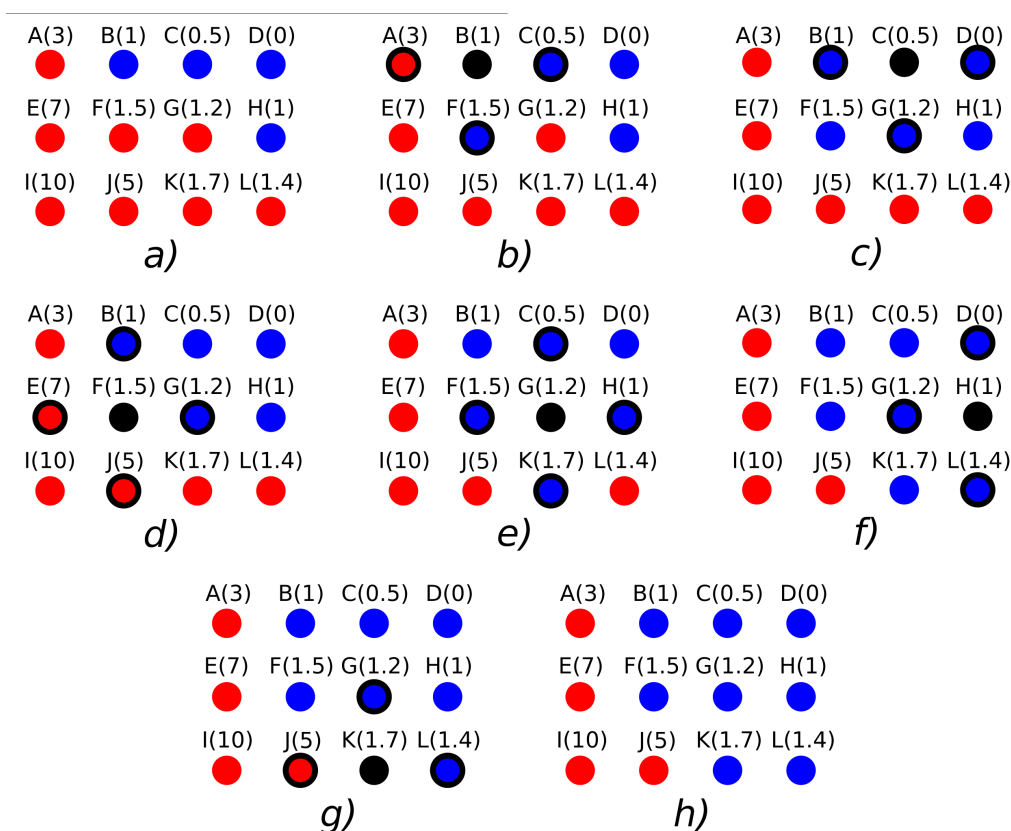
punkty znajdujące się na wysokości nie większej od zadanej wartości (będącej jednym z parametrów wejściowych algorytmu) zostają sklasyfikowane jako część dna morskiego, natomiast wszystkie pozostałe punkty zostają wstępnie przypisane do drugiej klasy – obiektów podwodnych. Domyślna wartość powyższego parametru wynosi 10% różnicy wysokości pomiędzy najniższym a najwyższym punktem w aktualnie przetwarzanym obszarze danych. Pozwala ona na uzyskanie zadowalających rezultatów dla danych reprezentujących duże obiekty podwodne, takie jak wraki statków.

III. Korekcja klasyfikacji: W kolejnym kroku realizowana jest iteracyjna procedura, której zadaniem jest korygowanie dotychczasowej klasyfikacji poprzez sekwencyjne dodatkowe weryfikowanie punktów przypisanych do klasy opisującej obiekty podwodne i przydzielenie części z punktów z powrotem do klasy reprezentującej dno morskie. Korekcja ta ma na celu wyznaczenie dokładnych granic pomiędzy dnem morskim a obiektami podwodnymi, co na ogół jest możliwe, a także poprawną klasyfikację tych elementów dna, które wstępnie zostały przypisane do klasy obiektów podwodnych. W każdej iteracji pętli następuje sprawdzenie wszystkich punktów leżących na granicy obu klas i porównanie ich wysokości – jeżeli bezwzględna różnica wysokości pomiędzy dwoma punktami jest nie większa od zadanej wartości (domyślnie wynoszącej 5% różnicy wysokości między najniższym a najwyższym punktem w aktualnie przetwarzanym zbiorze danych), wówczas punkt z klasy obiektów podwodnych zostaje przypisany do klasy dna morskiego. Pętla zostaje przerwana w momencie gdy jej ostatnia iteracja nie wprowadzi już żadnych zmian w istniejącej klasyfikacji. Na Rys. 40 przedstawiono szczegółowo przykład działania pojedynczej iteracji pętli korygującej istniejącą klasyfikację. W przykładzie tym najniższy punkt zbioru znajduje się na wysokości 0, najwyższy punkt ma wysokość 10, a za współczynnik określający maksymalną różnicę wysokości pomiędzy dwoma punktami zezwalającą na ich przydzielenie do wspólnej klasy przyjęto wartość 0,5. Rys. 40 a) obrazuje stan pewnego rastrowego zbioru danych po wstępnej klasyfikacji, gdzie punkty zaznaczone na niebiesko reprezentują klasę dna morskiego, a czerwone opisują obiekty podwodne. Na Rys. 40 b) algorytm sprawdza wysokości punktów A, C i F będących najbliższymi sąsiadami punktu B (zaznaczonego na czarno), po czym klasyfikuje punkt F jako część dna morskiego, ponieważ bezwzględna różnica wysokości punktów B i F nie przekracza wartości 0,5. Na Rys. 40 c) następuje sprawdzenie sąsiadów punktu C (B, D i G) i w jego rezultacie przydzielenie punktu G do klasy dna morskiego. Na Rys. 40d) następuje sprawdzenie sąsiadów punktu F, ale nie dochodzi tu do zmiany ich klas, ponieważ punkty B i G już należą

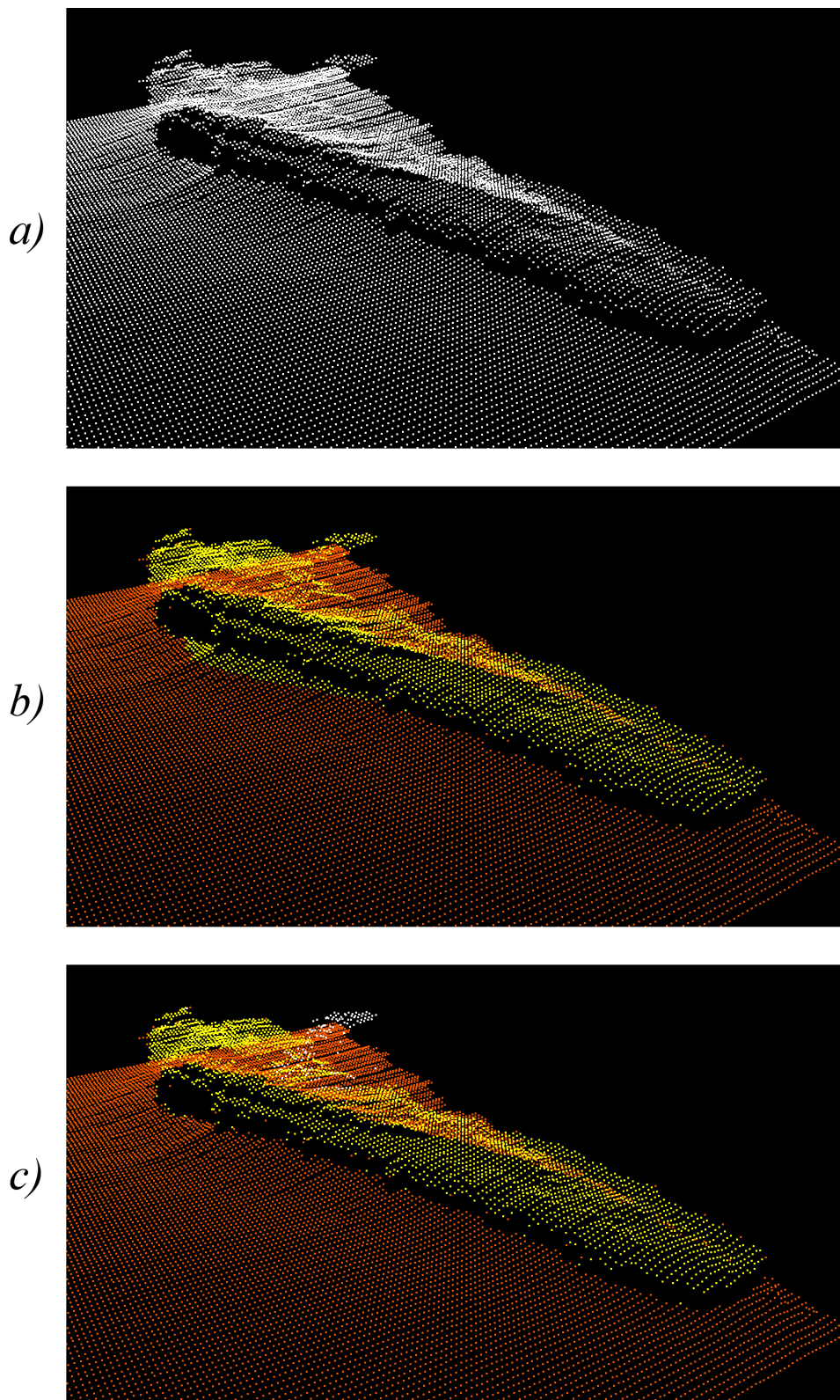
do klasy dna morskiego, natomiast różnice wysokości dla par punktów FE (5,5) i FJ (3,5) przekraczają maksymalną dozwoloną wartość równą 0,5. Na Rys. 40e) i Rys. 40f) dochodzi do przypisania punktów K i L do klasy dna morskiego. Na Rys. 40g) nie dochodzi do dalszej zmiany klasyfikacji punktów. Ostateczny wynik iteracji został przedstawiony na Rys. 40h).

Na Rys. 41 przedstawiono przykładową chmurę punktów opisującą fragment dna Zatoki Gdańskiej oraz pojedynczy wrak statku (Rys. 41a) leżący na głębokości ok. 43 metrów, a następnie zastosowano dla niej procedurę wstępnej klasyfikacji danych (Rys. 41b) oraz korekcję tej klasyfikacji (Rys. 41c) z wykorzystaniem domyślnych wartości wszystkich wejściowych parametrów algorytmu.

IV. Oddzielenie obiektów: W zbiorze danych wyszukiwane są wszelkie zgrupowania punktów przypisanych do klasy obiektów podwodnych, które są od siebie oddzielone punktami należącymi do klasy dna morskiego, a następnie dla każdej grupy zdefiniowana zostaje nowa, unikatowa dla niej klasa, do której zostają przydzielone wszystkie punkty danego zgrupowania. W wyniku tej operacji każda klasa będzie stanowiła reprezentację pojedynczego obiektu podwodnego w tym zbiorze danych, takiego jak np. wrak statku.



Rys. 40. Szczegółowy proces działania pojedynczej iteracji pętli odpowiadającej za korekcję istniejącej klasyfikacji przykładowego zbioru danych rastrowych

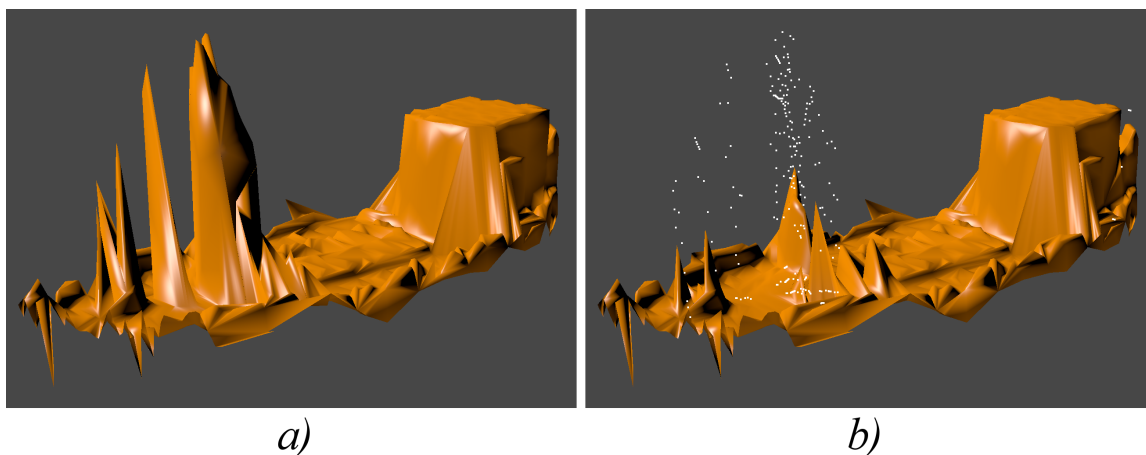


Rys. 41. Wynik zastosowania wstępnej klasyfikacji (b) oraz jej korekcji (c) dla przykładowego zbioru danych (a)

Niestety, w badanych zestawach danych znaleźć można również takie elementy, których kształt w postaci odtworzonej bryły był zdecydowanie mniej czytelny od formy

nieprzetworzonej chmury punktów, niezależnie od użytego algorytmu rekonstrukcji modelu. W przypadku środowiska podwodnego szczególnym przypadkiem takich elementów były maszty wraków statków, dla których odtworzenie ich powierzchni w sposób automatyczny było z reguły niemożliwe ze względu na ich zróżnicowane kształty oraz fakt, że w przetwarzanych danych są one opisywane przez stosunkowo niewielką liczbę punktów. W celu poprawy ogólnej jakości zrekonstruowanych modeli, powyższego rodzaju elementy są oddzielane od pozostałej części danych i nie są one brane pod uwagę w procesach związanych z odtwarzaniem zasadniczego kształtu obiektu, np. kadłuba statku.

Działanie algorytmu stworzonego w celu wykrywania masztów w obrębie zgrupowań punktów opisujących wraki statków jest następujące: w pierwszym kroku obiekt zostaje podzielony na regularną siatkę dwuwymiarowych sektorów o równych wymiarach, po czym do każdego sektora przypisywana jest pojedyncza wartość równa wysokości najwyższego punktu wewnątrz tego sektora. W przetwarzanych danych wymiary sektorów zostały wybrane w taki sposób, żeby na przeciętny sektor przypadało od kilkunastu do kilkudziesięciu punktów. Następnie wszystkie sektory zawierające punkty o wartości nie mniejszej niż 60% wysokości całego obiektu zostają wstępnie zaklasyfikowane jako obszary obejmujące maszty statku, z przyjęciem przy tym założenia, że maszty leżące na dnie morskim wraku skierowane są do góry. W kolejnym kroku analizowane są zgrupowania punktów w obrębie sektorów wstępnie oznaczonych jako maszty statku. Część z punktów ponownie zostaje przypisana do grupy należącej do podstawy statku, a nie do masztów. Są to takie zgrupowania punktów, których liczebność przekracza pewną wartość (eksperymentalnie przyjęto tę wartość jako 5% liczebności całego zbioru reprezentującego wrak). Dzięki temu wysokie elementy, takie jak nadbudówka czy komin, nie zostaną błędnie zaklasyfikowane jako część masztów. Oznaczone w powyższy sposób punkty reprezentujące maszty są następnie kopiowane do osobnego obiektu, po czym oryginalne punkty zostają usunięte z obiektu opisującego statek, a powstałe w ich miejscu „dziury” są uzupełniane poprzez interpolację pomiędzy istniejącymi punktami w ich sąsiedztwie, z pominięciem odtwarzania masztów. Na Rys. 42 przedstawiony jest wpływ zastosowania algorytmu wykrywania masztów na wynik odtwarzania kształtu przykładowego wraku statku Cleona: Rys. 42a) przedstawia model zrekonstruowany na podstawie wszystkich jego punktów bez specyficznego traktowania jego masztów, natomiast na Rys. 42b) pokazano ten sam wrak, na którym przed odtworzeniem jego kształtu dokonano detekcji i oddzielenia jego masztów, reprezentowanych przez zestaw białych punktów.



Rys. 42. Porównanie wyników rekonstrukcji kształtu wraku statku bez zastosowania algorytmu wykrywania masztów (a) oraz z jego użyciem (b)

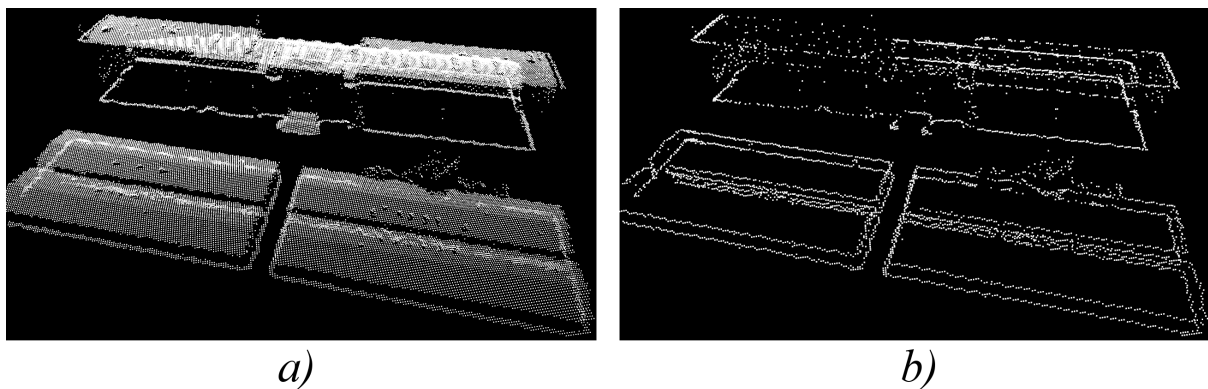
4.4.2. Dane naziemne

W przypadku środowiska naziemnego omawiany etap przetwarzania danych jest mniej złożony niż w przypadku obszarów podwodnych, ponieważ wykorzystywane w badaniach dane wejściowe zawierają już informację o klasyfikacji poszczególnych punktów zgodną ze specyfikacją formatu LAS (przedstawioną wcześniej w Tab. 1). Niemniej jednak w ramach niniejszej pracy konieczne było opracowanie zestawu metod dostosowanych do przetwarzania fragmentów danych reprezentujących klasę obiektów opisujących budynki, dla których stosowane są następujące procesy ich przetwarzania:

I. Zgrupowania punktów reprezentujących pojedyncze budynki lub kompleksy fizycznie ze sobą połączonych budynków zostają przydzielone do osobnych klas, umożliwiając późniejsze zastosowanie algorytmów rekonstrukcji modeli pojedynczych obiektów, z pominięciem pustych przestrzeni pomiędzy nimi.

II. Punkty naziemne sąsiadujące bezpośrednio ze skupiskami punktów reprezentujących budynki zostają przydzielone do tych budynków. Powyższe działanie jest o tyle istotne, że ze względu na charakterystykę danych wejściowych, informacje o powierzchniach bocznych ścian budynków często są dalece niekompletne i w praktyce zawierają małą liczbę punktów położonych blisko ziemi, przez co próby odtworzenia ich kształtu spowodowałyby powstanie trójwymiarowych modeli zawierających „dziury” w dolnych partiach zrekonstruowanych budynków. Dzięki uwzględnieniu wybranych punktów naziemnych w procesie rekonstrukcji kształtu budynków, ich odtworzone modele będą zawierały mniej „dziur”, gdyż ich boczne ściany będą częściej łączyć się z poziomem gruntu.

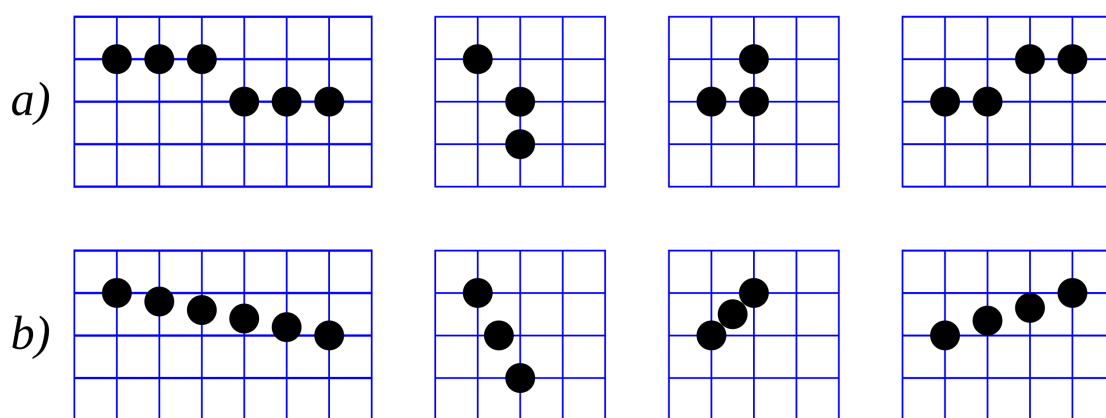
III. Dla każdego budynku następuje wykrywanie jego bocznych ścian za pomocą poniższego algorytmu: w pierwszej kolejności wyznaczane są maksymalna oraz minimalna wysokość aktualnie przetwarzanego obiektu, a następnie algorytm iteruje po kolei po każdym wierszu oraz po każdej kolumnie danych opisujących badany obiekt, szukając takich miejsc, w których różnica wysokości pomiędzy sąsiednimi punktami jest bardzo duża. Gdy bezwzględna różnica wysokości pomiędzy dwoma punktami wynosi przynajmniej 25% różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną wysokością w danym zbiorze, wówczas punkty te są uznawane za elementy ścian. Postępowanie to opiera się na fakcie, że powierzchnie położone równoległe lub w sposób zbliżony do równoległego do promienia lasera skanującego, czyli powierzchnie pionowych ścian, z reguły są reprezentowane w źródłowych danych w sposób mało dokładny. W praktyce oznacza to, że powyższa metoda wykrywania ścian w dużej części sprowadza się do wyszukiwania ich dolnych oraz górnych krawędzi, a także punktów znajdujących się pomiędzy nimi. Aby to lepiej zilustrować, na Rys. 43 przedstawiono przykład działania opisanego algorytmu na danych reprezentujących niektóre budynki Politechniki Gdańskiej. Opisany algorytm stworzony został na potrzeby przetwarzania danych reprezentujących budynki o regularnym kształcie, jednak możliwe jest zastosowanie również innych metod wykrywania krawędzi ([42,76]), dostosowanych do konkretnych rodzajów danych.



Rys. 43. Przykład zastosowania algorytmu wykrywającego ściany budynków (b) w obrębie regularnej chmury punktów (a) pochodzącej ze skaningu laserowego

IV. Dla wykrytych w poprzednim kroku ścian budynków stosowany jest dodatkowy algorytm derasteryzacji, mający na celu zredukowanie zniekształceń wynikających z rastrowej struktury przestrzennej wstępnie przetworzonych danych, której wadą jest niedokładny sposób reprezentacji płaskich powierzchni prostopadłych do płaszczyzny gruntu. Rozwiązanie tego problemu polega na niewielkiej zmianie położenia poszczególnych

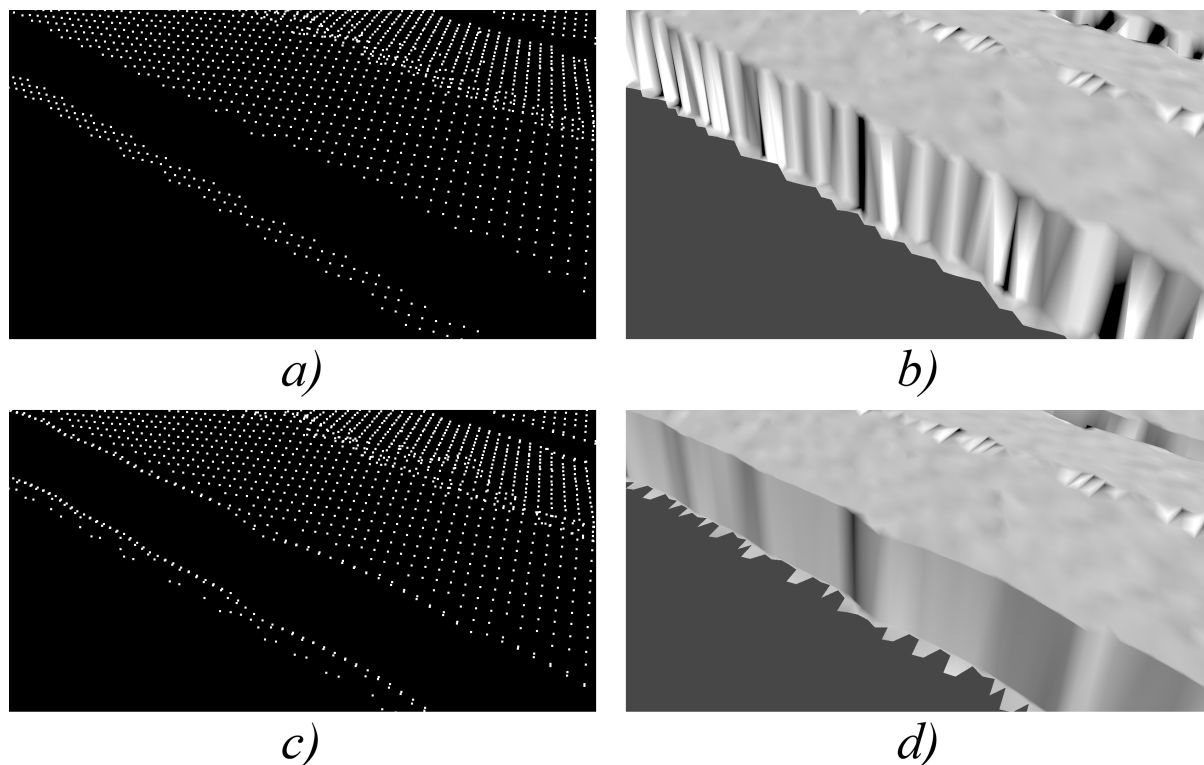
punktów należących do krawędzi wybranych powierzchni. W tym celu przygotowany został specjalny słownik wzorców opisujących zestaw możliwych sposobów reprezentacji prostych linii w grafice rastrowej wraz z metodami poprawnego ich odwzorowania za pomocą grafiki wektorowej. W celu lepszego zobrazowania tego podejścia, na Rys. 44a) przedstawiono zestaw przykładowych linii (krawędzi w oryginalnym obiekcie) w grafice rastrowej, natomiast na Rys. 44b) pokazane zostały odpowiadające im zestawy punktów współliniowych, w ogólności nie należących do siatki rastra, a tworzące fragmenty linii, które można by odpowiednio wyrazić w grafice wektorowej. Następnie w obrębie zgrupowań punktów oznaczonych jako ściany budynków wyszukiwane są zestawy punktów reprezentowanych w powyższym słowniku (taki jak na Rys. 44a), w kolejności od najdłuższych do najkrótszych odcinków. W przypadku wykrycia danego wzorca w obrębie aktualnie przetwarzanej krawędzi następuje przemieszczenie jego punktów w taki sposób, by tworzyły one układ taki jak na Rys. 44b). Algorytm wpływa także w niewielkim stopniu na położenie punktów sąsiadujących bezpośrednio ze zmodyfikowanymi obszarami danych, przybliżając je do tych obszarów w celu zmniejszenia efektu przejścia pomiędzy zmodyfikowanymi ścianami budynków a sąsiadującymi z nimi punktami dachów tych budynków, co na późniejszych etapach przetwarzania danych powoduje również poprawienie jakości cieniowania odtworzonych modeli 3D wynikające ze sposobu wyliczania wektorów normalnych poszczególnych wierzchołków.



Rys. 44. Fragment słownika wzorców wykorzystywanego w celu wykrywania rastrowych reprezentacji linii (a) oraz sposobu przekształcania ich do odpowiadających im postaci wektorowych (b)

Na Rys. 45. porównano rezultaty zastosowania stworzonego algorytmu derasteryzacji na zgrupowaniach punktów opisujących ściany budynków oraz ich wpływu na kształt zrekonstruowanych modeli 3D: Rys. 45a) przedstawia chmurę punktów przed zastosowaniem

procedur derasteryzacji oraz rekonstrukcji kształtu, na Rys. 45b) widoczny jest efekt odtworzenia trójwymiarowego modelu na podstawie powyższych danych, Rys. 45c) obrazuje chmurę punktów po zastosowaniu na niej algorytmu derasteryzacji, natomiast Rys. 45d) przedstawia zrekonstruowany model powstały na podstawie danych poddanych temu procesowi.



Rys. 45. Porównanie rezultatów odtworzenia modelu 3D (b) na podstawie danych bez zastosowania algorytmu derasteryzacji (a) oraz rekonstrukcji modelu (d) na bazie danych zderasteryzowanych (c)

4.5. Algorytm kostki

Algorytm kostki (opisywany w literaturze anglojęzycznej jako *3D grid conversion* [75]) jest metodą konwersji danych do postaci regularnej, trójwymiarowej siatki punktów. Metoda ta została stworzona w ramach niniejszej pracy naukowej z myślą o takich zbiorach danych, dla których odtworzenie ich powierzchni za pomocą metod dedykowanych dla algorytmu siatki byłoby nieoptymalne ze względu na występujące w nich wysokie obiekty (jak np. wieże czy kościoły), gdyż ich konwersja do postaci tablicy rastrowej spowodowałaby zauważalną utratę danych. Algorytm konwersji danych do postaci trójwymiarowej siatki w pewnym sensie stanowi rozszerzenie metod rasteryzacji stosowanych w ramach rekonstrukcji opartej na algorytmie siatki, ale w wyniku jego

działania dane wejściowe zostają przetworzone do postaci nie dwuwymiarowego, pojedynczego rastra, ale rastra trójwymiarowego, który może być traktowany jako zestaw wielu warstw rastrowych znajdujących się na różnych wysokościach (poziomach), jak zobrazowano na Rys. 46. Każdy raster odpowiada pewnemu przedziałowi wysokości, gdzie wartość piksela oznacza jego położenie na osi pionowej w obrębie tej warstwy: małe wartości (kolory ciemne) reprezentują dolne partie danego przedziału, a wartości duże (jasne odcienie) przedstawiają jego górne przedziały.

W uproszczeniu, działanie algorytmu sprowadza się do wykonania następujących czynności:

1. Klasteryzacji danych wejściowych poprzez przydzielenie każdego punktu do pojedynczego sektora regularnej, trójwymiarowej tablicy. Sektor taki odpowiada obszarowi o kształcie prostopadłościanu w przestrzeni.
2. Generowaniu nowych punktów wewnątrz pustych sektorów, jeżeli niedaleko nich istnieją już jakieś inne punkty.
3. Usuwaniu wewnętrznych punktów obiektu, z pozostawieniem wyłącznie tych, które reprezentują zewnętrzne powierzchnie obiektu.

Szczegółowy przebieg działania algorytmu jest silnie uzależniony od wartości odpowiednich parametrów wprowadzonych przez użytkownika. Najważniejszy parametrem algorytmu jest *Rozdzielczość przestrzenna* pojedynczego sektora na osiach X, Y i Z (odpowiadającym szerokości, długości i wysokości) wyrażana w metrach. Na podstawie zadanej rozdzielczości następuje podzielenie przestrzeni wejściowej chmury punktów na zestaw trójwymiarowych sektorów, których liczba wzdłuż poszczególnych osi wyliczana jest według wzorów przedstawionych w (14).

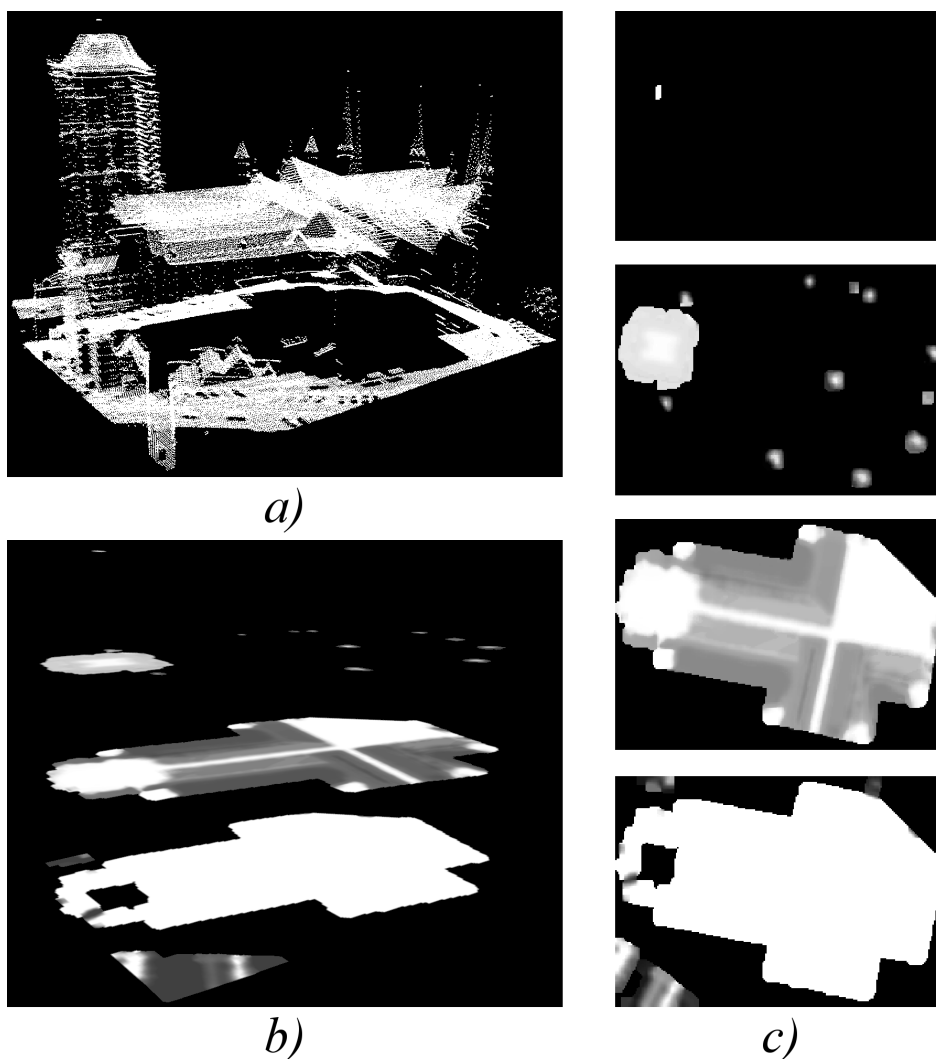
Oprócz tego algorytm udostępnia zestaw opcjonalnych parametrów, których odpowiednie użycie może pozytywnie wpłynąć na końcowy efekt przetwarzania. Dostępne są następujące parametry:

- *Opcja trybu hybrydowego*, który polega na scaleniu wygenerowanego zestawu punktów z oryginalną, wejściową chmurą punktów. Użycie tej opcji powoduje zmniejszenie poziomu regularności wynikowego zbioru danych, ale pozwala na dokładniejsze odwzorowanie charakterystycznych elementów występujących w oryginalnych danych.
- *Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki*.

Włączenie tej opcji powoduje wypełnianie pojedynczych pustych sektorów na podstawie danych pochodzących z jego najbliższych sąsiadów.

- *Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki.* Działanie to ma na celu redukcję liczby „dziur” znajdujących się w płaszczyznach prostopadłych do gruntu. Na każdym poziomie siatki, w kolejności od najniższego do najwyższego, wyszukiwane są wszystkie puste punkty, a następnie dla każdego z nich znajduje się najbliższy mu niepusty punkt znajdujący się bezpośrednio nad nim (na osi Z). Jeżeli odległość pomiędzy tymi punktami nie przekracza określonej wartości, wówczas wartości punktu pustego są zastępowane wartościami punktu znajdującego się bezpośrednio nad nim. Przekazanie tego parametru na wejście algorytmu kostki w wielu przypadkach pozwala na uzupełnienie znacznej części powierzchni pionowych ścian, ale w nielicznych sytuacjach może także powodować wygenerowanie nowych punktów w przestrzeniach, które powinny pozostać puste, np. gdy przetwarzany zbiór punktów reprezentuje obiekt zawierający poziome elementy wystające ponad powierzchnię gruntu.
- *Intensywność filtracji* stosowanej w celu złagodzenia dużych różnic wartości pomiędzy sąsiadującymi ze sobą sektorami znajdującymi się na różnych poziomach siatki. Wartość tego parametru jest wykorzystywana w celu stworzenia macierzy na potrzeby prostego filtra dolnoprzepustowego, której oba wymiary są wyliczane według wzoru (13). Dla każdego przetworzonego sektora jego nowa wysokość jest równa sumie wysokości jego oraz jego sąsiadów, podzielonej przez liczbę sektorów uwzględnionych w obliczeniach. Filtracja ta jest przydatna w sytuacji, gdy w przetworzonym zbiorze punktów można zaobserwować zgrupowania nieregularnie rozłożonych punktów reprezentujących powierzchnie skośne, jak np. dachy budynków.

$$\text{wymiar} = (2 \cdot \text{poziom_rozmycia}) + 1 \quad (13)$$



Rys. 46. Przetworzenie chmury punktów reprezentującej wynik zeskanowania powierzchni Bazyliki Mariackiej w Gdańsku (a) do postaci uproszczonej siatki 3D (b) składającej się z czterech warstw rastrowych (c), gdzie jasność piksela oznacza jego położenie na osi pionowej w obrębie danej warstwy

$$\begin{aligned}
 n_x &= \Delta x / r_x \\
 n_y &= \Delta y / r_y \\
 n_z &= \Delta z / r_z
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

gdzie:

n_x, n_y, n_z – liczby sektorów przypadających na osie X, Y i Z,

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – szerokości zakresów wartości, tj. różnica pomiędzy wartością największej oraz najmniejszej liczby na danej osi,

r_x, r_y, r_z – szerokość, długość i wysokość pojedynczego sektora wyrażana w metrach

Jako że wynikowy zbiór danych powinien się składać wyłącznie z punktów reprezentujących zewnętrzne przestrzenie danego obiektu, takie jak ściany czy dachy budynków, konieczne jest usunięcie wszelkich wewnętrznych punktów z przetwarzanego zbioru. Z tego powodu w ramach ostatniego etapu konwersji wykonywane są następujące czynności:

1. Najpierw tworzona jest pomocnicza klasyfikacja sektorów, dzieląca zbiór na dwie klasy, opisujące odpowiednio sektory wypełnione oraz sektory puste. Następnie wprowadzona zostaje nowa klasa, reprezentująca krawędzie zewnętrznych powierzchni, do której przypisane zostają sektory wypełnione sąsiadujące bezpośrednio z sektorami pustymi. W wyniku tej operacji, nowo utworzona klasa będzie reprezentowała punkty krawędziowe obiektu.
2. Z najwyższego poziomu w zbiorze usuwane są wszelkie punkty niezaklasyfikowane jako punkty krawędziowe. Oprócz tego, na pozostałych poziomach usuwane są te punkty, które nie zostały wcześniej zaklasyfikowane jako punkty krawędziowe, jeżeli bezpośrednio nad nimi (na sąsiednim poziomie) istnieją już jakieś inne punkty.

4.6. Rekonstrukcja trójwymiarowych modeli

4.6.1. Wstęp

Jak już wspomniano w rozdziale 3., wykorzystane dane, ze względu na metodę ich pozyskiwania, cechują się specyficzną strukturą przestrzenną, gdzie powierzchnie przedstawiające podłoże czy dachy budynków są zwykle reprezentowane w sposób bardziej szczegółowy od powierzchni do nich prostopadłych, takich jak ściany czy maszty wraków statków. W większości przypadków zgrupowania punktów reprezentujących powierzchnie prostopadłe do gruntu są znacznie mniej liczne, przez co dane wejściowe można pomyślnie przetwarzać w sposób zbliżony do dwuwymiarowych obrazów rastrowych, nie powodując przy tym utraty istotnych informacji. Badania wykazały, że w takich sytuacjach optymalnym rozwiązaniem problemu rekonstrukcji modeli dla tych danych jest stosowanie metod triangulacji operujących głównie w przestrzeni dwuwymiarowej, co zostało opisane w rozdziale 4.6.2. Istnieją jednak takie przypadki, w których liczba punktów reprezentujących przestrzenie prostopadłe do gruntu jest na tyle duża, że możliwe jest odtworzenie dokładniejszych modeli za pomocą algorytmów rekonstrukcji dostosowanych do danych trójwymiarowych, o których wspomniano w rozdziale 4.1. Niestety, uzyskane w ten sposób wyniki często zawierają znaczne deformacje, gdyż algorytmy te są dostosowane do zbiorów

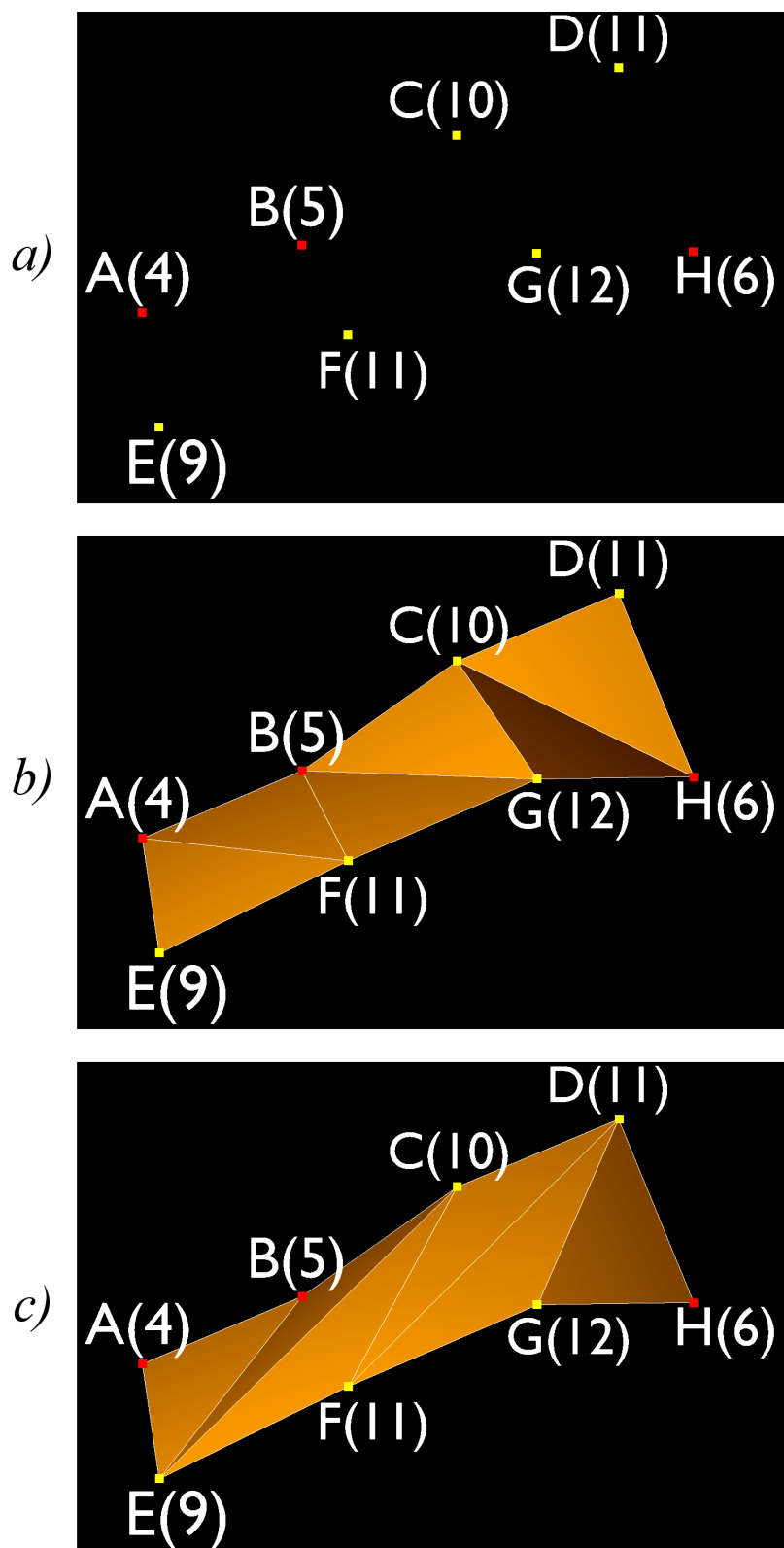
danych cechujących się w miarę równomiernym rozłożeniem punktów w przestrzeni. W związku z tym w celu otrzymania wynikowych modeli o możliwie najlepszej jakości, przed zastosowaniem powyższych algorytmów należy wcześniej przetworzyć dane wejściowe w sposób nieco inny od dotychczas opisanych, stosując odpowiednie operacje opisane w rozdziale 4.6.3.

4.6.2. Rekonstrukcja w przestrzeni dwuwymiarowej

Podejście to jest przeznaczone dla danych mających postać regularnej siatki rastrowej, przy założeniu, że zastosowano dla nich opisane wcześniej metody wstępnego przetwarzania mające na celu zwiększenie poziomu regularności ich struktury przestrzennej, wliczając w to również wykrywanie bocznych ścian ewentualnych budynków. W zależności od wyników zwróconych przez metody wstępnego przetwarzania, proponowany algorytm rekonstrukcji siatki zakłada dwa tryby działania.

Pierwszy tryb działania algorytmu jest przeznaczony dla danych, w których nie wykryto zgrupowań punktów reprezentujących ściany. Jego działanie opiera się na analizowaniu wysokości poszczególnych punktów znajdujących się w zadanym rastrze i tworzeniu na ich podstawie ścian składających się z trójkątów, w taki sposób, żeby ich krawędzie układały się wzdłuż punktów o zbliżonej wysokości. Zaproponowane podejście, w przeciwieństwie do metod triangulacji operujących wyłącznie w przestrzeni dwuwymiarowej (takich jak np. triangulacja Delaunaya), zmniejsza szanse powstania niepotrzebnych zniekształceń w odtworzonych modelach, spowodowanych przez niewłaściwe rozmieszczenie trójkątów, jak pokazano na Rys. 47. Rys. 47a) przedstawia przykładowy zbiór punktów mających postać regularnej siatki rastrowej, gdzie punkty C, D, E, F i G (oznaczone kolorem żółtym) są położone zauważalnie wyżej od punktów A, B i H (oznaczonych kolorem czerwonym), natomiast wysokości poszczególnych punktów zostały podane w nawiasach. W przypadku rekonstrukcji kształtu na podstawie powyższego zbioru punktów za pomocą triangulacji Delaunaya, odtworzony w ten sposób model (Rys. 47b) z oczywistych powodów nie uwzględnia różnic w wysokości pomiędzy wierzchołkami oznaczonymi kolorem żółtym a wierzchołkami oznaczonymi kolorem czerwonym. W przypadku modelu uzyskanego za pomocą proponowanego algorytmu rekonstrukcji (Rys. 47 c), poszczególne trójkąty zostały dobrane w taki sposób, żeby ich krawędzie układały się wzdłuż punktów o zbliżonej wysokości, dzięki czemu model ten jest bardziej regularny od modelu uzyskanego za pomocą triangulacji Delaunaya, a kształt oparty na wierzchołkach C, D, E, F i G w zauważalny

sposób wyróżnia się na tle reszty obiektu.



Rys. 47. Porównanie rezultatu działania triangulacji Delaunaya (b) z wynikiem działania proponowanego algorytmu triangulacji (c), zastosowanych dla przykładowej chmury punktów mającej postać regularnej siatki rastrowej (a)

Dane są analizowane przez algorytm poprzez iterowanie po kolejnych punktach znajdujących się w danym wierszu i szukaniu potencjalnych kandydatów do zbudowania trójkąta w następnym (sąsiadującym) wierszu. W najprostszym ujęciu, proces ten sprowadza się do wykonania następujących kroków:

dla każdego wiersza Z_i :

dla każdego punktu X_i w Z_i :

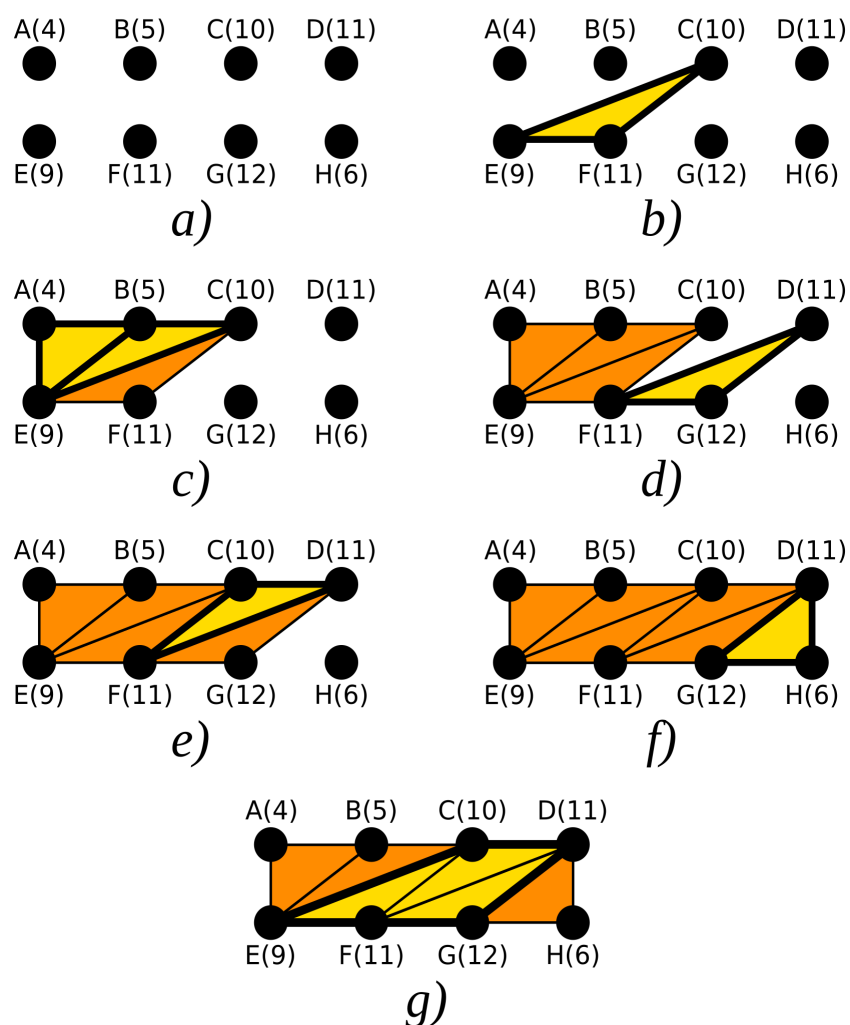
w Z_{i+1} znajdź punkt Y o wysokości zbliżonej do $(X_i + X_{i+1}) / 2$;

zbuduj trójkąt z X_i , Y oraz X_{i+1} ;

wypełnij „dziury” pomiędzy dotychczas stworzonymi trójkątami;

Ujmując sprawę dokładniej, podczas każdej iteracji, bieżący punkt X_i oraz jego bezpośredni sąsiad X_{i+1} w aktualnym wierszu Z_i są automatycznie wybierane jako podstawa do utworzenia następnego trójkąta. Trzeci wymagany punkt Y jest wybierany spośród kandydatów należących do podzbioru punktów z następnego (sąsiedniego) wiersza Z_{i+1} , które znajdują się w bliskiej odległości wybranej wcześniej pary punktów X_i oraz X_{i+1} , przy czym najlepszym kandydatem będzie ten, którego wysokość będzie możliwie najbliższa sumie wysokości X_i i X_{i+1} podzielonej przez 2. Po wybraniu odpowiednich trzech punktów (X_i , X_{i+1} , Y) następuje zbudowanie na ich podstawie pojedynczego trójkąta. W następnym kroku algorytm dokonuje wypełnienia wszelkich „dziur” jakie mogły powstać pomiędzy ostatnio badanymi punktami z obu wierszy, gdzie tym razem każdy nowy trójkąt będzie oparty na X_i oraz dwóch punktach z kolejnego wiersza. Następnie powyższe kroki powtarzane są aż do momentu przejścia i dokonania triangulacji wszystkich punktów w aktualnej parze wierszy, po czym cały proces jest powtarzany dla kolejnej pary wierszy. Zakładając że dane zostały wcześniej prawidłowo przetworzone, powyższy sposób triangulacji zapewnia odtworzenie spójnego modelu, nie pomijając przy tym żadnych istotnych elementów danych. Oprócz tego, dzięki ograniczeniu obliczeń do obszaru pojedynczych par wierszy, algorytm ten stwarza także możliwość zrównoleglenia obliczeń mających na celu przyspieszenie jego wykonania. Na Rys. 48 przedstawiony został cały proces triangulacji przykładowej siatki punktów krok po kroku. Rys. 48a) pokazuje zawartość wejściowego zbioru danych (przedstawionego wcześniej na Rys. 47a), gdzie wysokości poszczególnych punktów zostały podane w nawiasach. Rys. 48b) obrazuje działanie pierwszego kroku algorytmu, w wyniku którego stworzony został trójkąt CFE, jako że punkty E i F stanowią pierwszą parę punktów z aktualnie przetwarzanego wiersza, podczas gdy wysokość punktu C jest najbardziej zbliżona do średniej wysokości

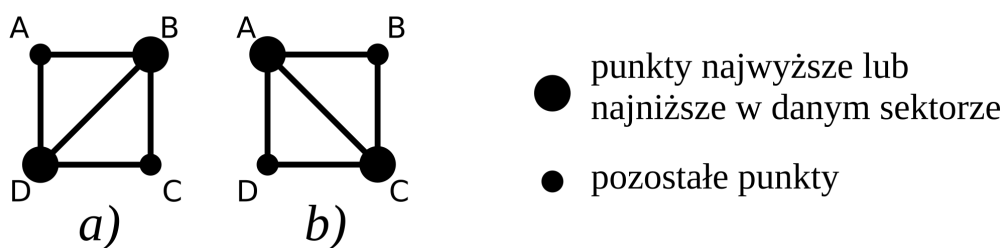
pary punktów E i F spośród wszystkich punktów w drugim wierszu danych. Na Rys. 48c) przedstawiono wynik działania drugiego kroku algorytmu, który skutkuje wypełnieniem „dziur” pomiędzy punktami C, E oraz A poprzez utworzenie tam dwóch nowych trójkątów: ABE i BCE. Rys. 48d) obrazuje efekt działania kolejnej iteracji algorytmu, stosującej te same reguły co w przypadku Rys. 48b). Na Rys. 48e) i Rys. 48f) przedstawiono kolejne kroki algorytmu polegające na wypełnieniu pozostałych „dziur” poprzez utworzenie trójkątów CDF oraz DHG. Rys. 48g) obrazuje końcowy wynik zastosowania opisanego algorytmu rekonstrukcji siatki punktów, gdzie figura CDGFE została wyróżniona w celu zaznaczenia faktu, że algorytm jest w stanie tworzyć wynikowe powierzchnie w taki sposób, żeby kształty zawarte w modelu, np. wznoszące się ponad średni poziom, były dokładnie reprezentowane przez krawędzie odpowiednio stworzonych trójkątów, dzięki czemu powstały model wygląda bardziej zgodnie z rzeczywistością.



Rys. 48. Rezultat działania poszczególnych kroków algorytmu triangulacji zastosowanego dla niewielkiego zestawu danych, przedstawionego wcześniej na Rys. 47

Drugi z trybów algorytmu jest dedykowany dla danych, w obrębie których wykryte zostały zgrupowania punktów oznaczone jako ściany budynków (lub powierzchnie o zbliżonym kształcie). Jego działanie jest oparte na podzieleniu każdego wyodrębnionego obiektu na niewielkie, prostokątne sektory zawierające nie więcej niż 4 punkty każdy, oraz rekonstrukcji powierzchni każdego sektora za pomocą prostych metod triangulacji dostosowanych do wszelkich możliwych kombinacji ułożenia punktów jakie mogą się pojawić w obrębie pojedynczego sektora. Sektory nie zawierające żadnych punktów oznaczonych jako fragmenty ścian zostają zgrupowane w większe podzbiory danych i ich kształt zostaje odtworzony za pomocą wcześniej opisanego pierwszego trybu działania algorytmu rekonstrukcji siatki.

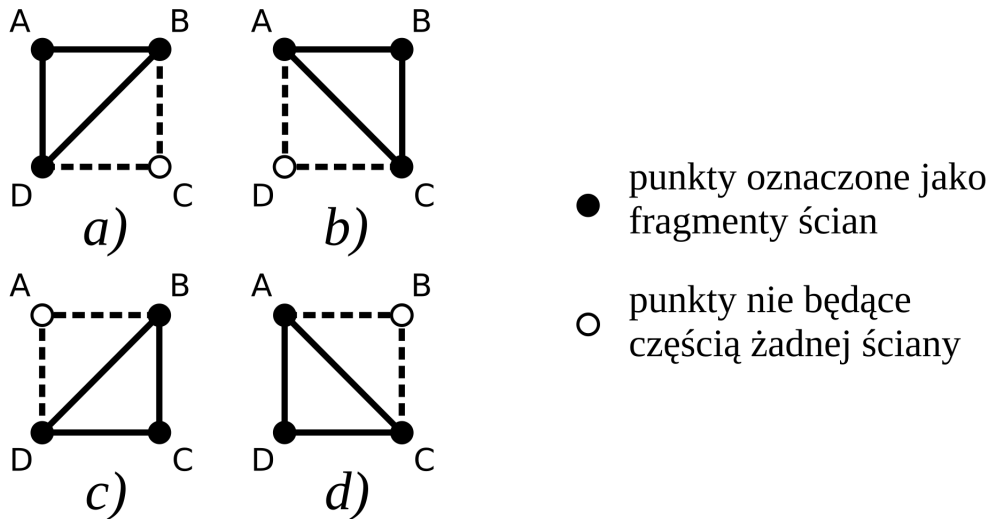
Powierzchnie reprezentowane przez pozostałe sektory zostają odtworzone za pomocą algorytmu który wykonuje odpowiednie operacje w zależności od liczby punktów występujących w danym sektorze oznaczonych jako fragmenty ścian. Jeżeli wewnątrz sektora znajdują się dokładnie cztery punkty „ścienne”, wówczas istnieją tylko dwa możliwe sposoby jego rekonstrukcji, które zostały przedstawione na Rys. 49. Oba sposoby oferują prawidłowe metody dokonania triangulacji punktów danego sektora, jednak rezultat odtworzenia jego kształtu będzie lepszy w przypadku dobrania odpowiedniego sposobu na podstawie następującego kryterium: wybór właściwego sposobu triangulacji pomiędzy metodą zobrazowaną na Rys. 49a) a sposobem przedstawionym na Rys. 49b) jest dokonywany poprzez porównanie ze sobą par punktów BD i AC oraz ustaleniem która z nich jest lepszym kandydatem do zbudowania na jej podstawie krawędzi trójkąta. Jeżeli punkty B i D stanowią parę najwyższych lub najniższych punktów w przetwarzanym sektorze, wówczas wybierana jest opcja z Rys. 49a), natomiast w pozostałych przypadkach wykorzystywana jest metoda przedstawiona na Rys. 49b).



Rys. 49. Dwa różne sposoby triangulacji zestawu czterech punktów

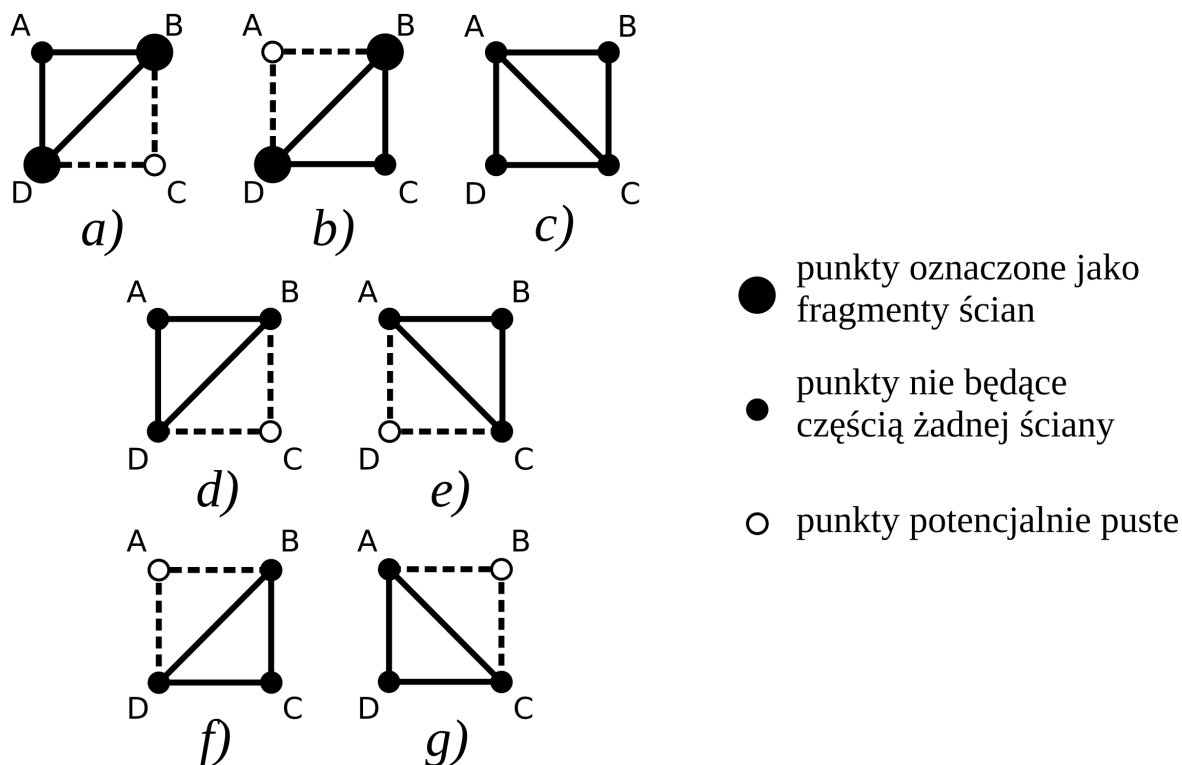
W przypadku, gdy w danym sektorze występują dokładnie trzy punkty oznaczone jako fragmenty ścian, wówczas wykonywane są dwa kroki: najpierw utworzony zostaje trójkąt na

bazie powyższych trzech punktów, a następnie, jeżeli w przetwarzanym sektorze występuje jeszcze czwarty punkt nie będący częścią żadnej ściany, wówczas dodany zostaje drugi trójkąt w celu wypełnienia luki w tym sektorze. W ramach powyższego przypadku rozważane są w sumie cztery scenariusze, które zostały zobrazowane na Rys. 50, gdzie punktami „ściennymi” są odpowiednio podzbiory: ADB (Rys. 50a), ACB (Rys. 50b), BDC (Rys. 50c) oraz ADC (Rys. 50d).



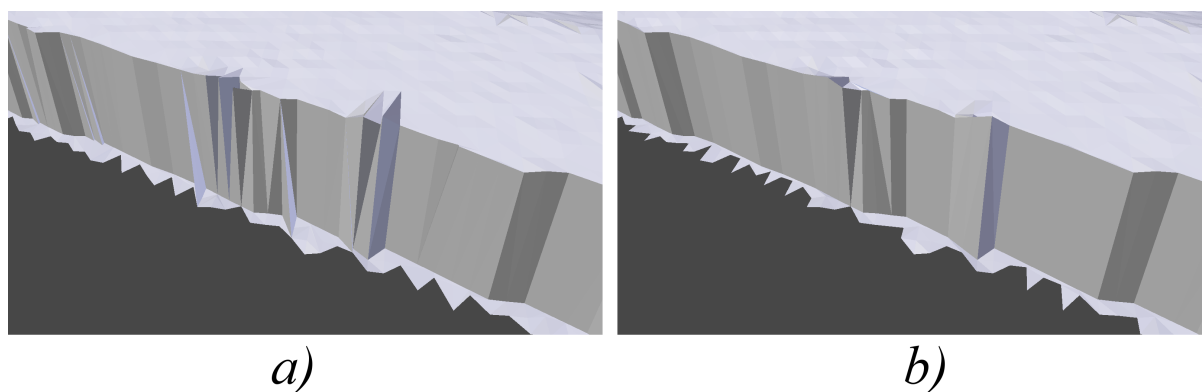
Rys. 50. Wszystkie możliwe sposoby dokonania triangulacji pojedynczego sektora gdy występują w nim dokładnie trzy punkty oznaczone jako elementy ścian oraz potencjalny czwarty punkt

Pozostałe rozważane przez algorytm scenariusze zostały przedstawione na Rys. 51. Jeżeli w danym sektorze występują dokładnie dwa punkty zaklasyfikowane jako część ścian i tworzą one przekątną BD, wówczas pierwszy trójkąt zostanie utworzony na podstawie punktów ADB (Rys. 51a) lub punktów BDC (Rys. 51b), natomiast potencjalny drugi trójkąt zostanie stworzony na podstawie pary punktów BD oraz czwartego punktu w danym sektorze: C (Rys. 51a) lub A (Rys. 51b), o ile nie jest on pusty. Jeżeli punkty B i D nie są oznaczone jako fragmenty ścian oraz w sektorze występują w sumie cztery punkty, wówczas powierzchnia sektora zostaje odtworzona w sposób pokazany na Rys. 51c). W przeciwnym wypadku, gdy w danym sektorze występują dokładnie trzy punkty (a miejsce czwartego jest puste), wówczas na ich podstawie stworzony zostaje tylko jeden trójkąt, na podstawie jednego z czterech możliwych sposobów zobrazowanych na Rys. 51d), Rys. 51e). Rys. 51f) i Rys. 51g).



Rys. 51. Pozostałe metody dokonania triangulacji punktów w pojedynczym sektorze, gdy występują w nim nie więcej niż dwa punkty sklasyfikowane jako fragmenty ścian

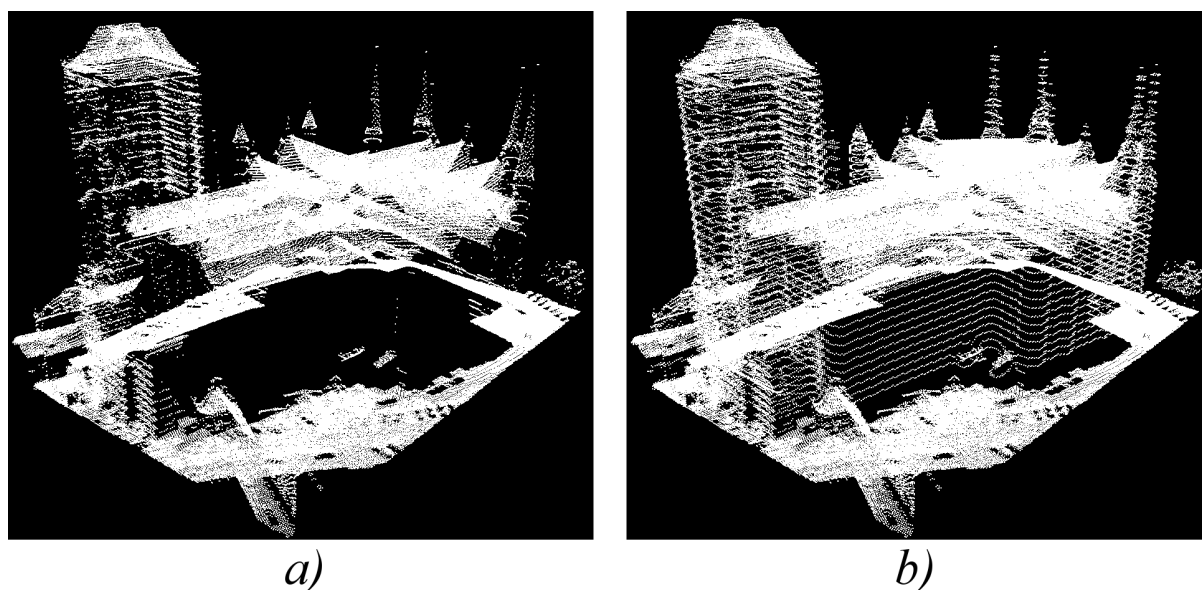
Różnice pomiędzy efektami zastosowania obydwu trybów działania algorytmu rekonstrukcji siatki są zwykle niewielkie, niemniej jednak są one łatwo zauważalne w tych obszarach zrekonstruowanych danych, które reprezentują powierzchnie regularnych, płaskich ścian, jak w przypadku fragmentu budynku przedstawionego na Rys. 52.



Rys. 52. Rezultat zastosowania trybu działania bez wykrywania ścian pionowych (a) oraz trybu działania z wykrywaniem ścian (b) algorytmu rekonstrukcji siatki na przykładzie fragmentu danych reprezentujących niewielki budynek

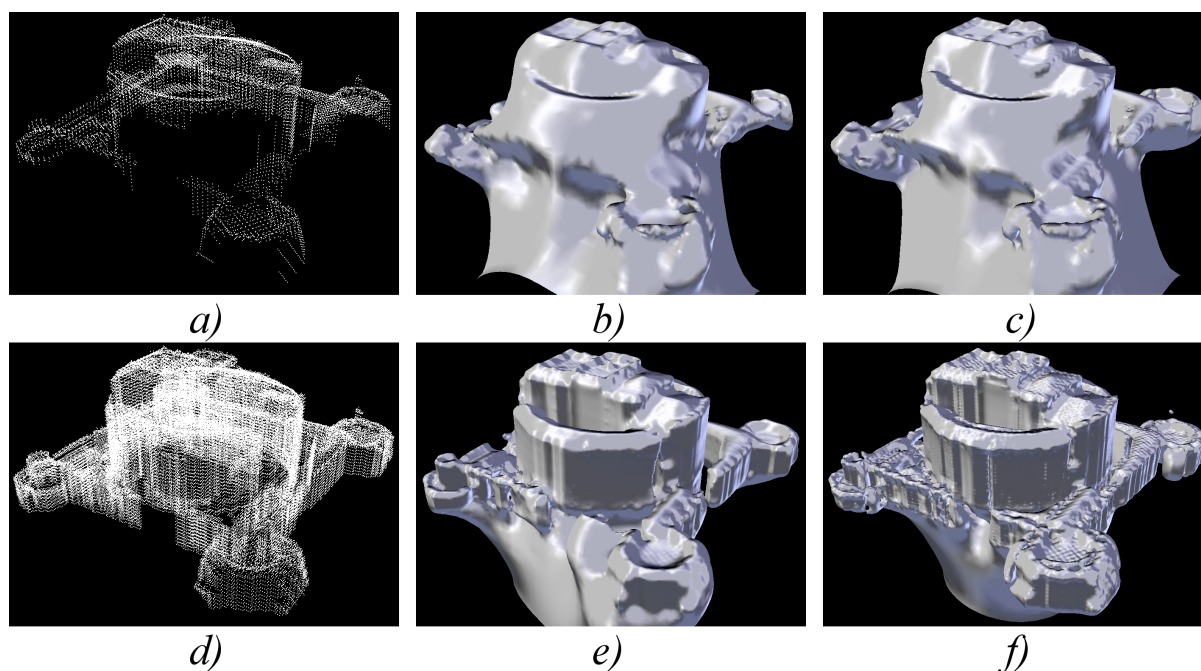
4.6.3. Rekonstrukcja w przestrzeni trójwymiarowej

Podjęcie to jest przeznaczone dla danych przetworzonych za pomocą algorytmu kostki. W przeciwieństwie do danych przechowywanych w strukturze dwuwymiarowej (przetworzonych metodą siatki), konwersja trójwymiarowa nie wymaga zastosowania dedykowanych metod triangulacji. Zamiast tego, przetworzone w powyższy sposób chmury punktów mogą być pomyślnie wykorzystane jako dane wejściowe dla standardowych algorytmów do rekonstrukcji trójwymiarowych modeli, opisywanych w rozdziale 2.3. Badania wykonane w ramach niniejszej pracy wykazały, że zastosowanie powyższych metod dla zbiorów danych reprezentujących wysokie budynki pozwalają na znaczne zwiększenie ogólnego poziomu regularności ich przestrzennej struktury (m.in. poprzez wypełnienie niektórych „dziur” nowymi punktami), przekładając się jednocześnie na zwiększenie jakości odtworzonych modeli w porównaniu do brył zrekonstruowanych bezpośrednio na podstawie danych nieprzetworzonych. Powstałe w powyższy sposób zbiory danych oparte na strukturze trójwymiarowej tablicy w wielu przypadkach pozwalają na wygenerowanie bardziej spójnych modeli niż w przypadku skorzystania z nieprzetworzonych chmur punktów. Na Rys. 53. przedstawiono porównanie oryginalnej chmury punktów z jej zregularyzowaną wersją uzyskaną za pomocą algorytmu kostki. Jak łatwo zauważyć, przetworzona wersja zbioru danych (Rys. 53b) charakteryzuje się znacznie mniejszą ilością „dziur” od jego oryginalnej wersji (Rys. 53a). Więcej wyników zamieszczono w rozdziale 5.2.



Rys. 53. Porównanie oryginalnej chmury punktów pochodzącej z wyników skanowania powierzchni Bazyliki NMP w Gdańsku (a) z jej wersją przetworzoną przez algorytm kostki (b)

Wprawdzie metoda kostki może być stosowana w parze z dowolnym algorytmem rekonstrukcji kształtów, na chwilę obecną najlepsze rezultaty można otrzymać za pomocą standardowej metody Poissona. Teoretycznie stosowanie jej ekranowanego wariantu powinno skutkować osiągnięciem lepszych wyników, jednak w praktyce powoduje ona nadmierne wyostrzenie szczegółów nawet przy zastosowaniu minimalnej wartości wagi interpolacji. Można to zaobserwować na Rys. 54, gdzie wynik zastosowania metody ekranowanej (Rys. 54c) dla nieprzetworzonej chmury danych (Rys. 54a) daje niewiele lepsze rezultaty od klasycznej metody Poissona (Rys. 54b). W przypadku zbioru danych przetworzonego przez algorytm kostki (Rys. 54d) model uzyskany za pomocą metody ekranowanej (Rys. 54f) cechuje się zbliżonym poziomem złożoności do modelu otrzymanego za pomocą klasycznej metody Poissona (Rys. 54e), jednak można na nim dostrzec dużą ilość lokalnych zniekształceń na powierzchniach, które powinny być gładkie.



Rys. 54. Wyniki działania ekranowanej metody Poissona (c, f) w porównaniu z klasyczną metodą Poissona (b, e) dla chmury punktów oryginalnej (a) oraz przetworzonej przez algorytm kostki (d) dla danych reprezentujących Zamek Świętego Aniola

4.7. Określanie jakości odtworzonych modeli

Jak wspomniano w rozdziale 2.4, w wybranych przypadkach istnieje możliwość zweryfikowania jakości zrekonstruowanych modeli 3D poprzez dokonanie ich porównania z wzorcowymi modelami przedstawiającymi odtwarzane obiekty na podstawie jasno sprecyzowanych metryk jakościowych. Jednym z najtrudniejszych elementów tego procesu

jest uzyskanie wiarygodnych modeli wzorcowych, które reprezentowałyby badane obszary w możliwie najdokładniejszy sposób, co w ramach niniejszej pracy udało się wykonać dla wybranych obiektów przedstawiających wysokie budynki. Wybór użytych metryk inspirowany był przede wszystkim opisanym wcześniej rozwiązaniem [53] opartym na porównywaniu par modeli poprzez wyliczanie odległości pomiędzy ich poszczególnymi wierzchołkami. Procedura oceniania jakości danej metody rekonstrukcji jest następująca: dla każdego wierzchołka wzorcowego modelu W wyszukiwany jest odpowiadający mu najbliższy wierzchołek w zrekonstruowanym modelu R (przy założeniu że oba modele umieszczone są w tym samym miejscu w przestrzeni trójwymiarowej), po czym wyliczana jest bezpośrednia odległość pomiędzy tymi wierzchołkami, a także wartość iloczynu skalarnego pomiędzy ich wektorami normalnymi. Następnie wyznaczane są następujące wartości:

- **Odległość najmniejsza, średnia i największa** pomiędzy wierzchołkami W a najbliższymi im wierzchołkami R . Wydaje się oczywiste, że dokładnie odtworzony model R powinien cechować się możliwie najmniejszymi wartościami tych odległości.
- **Dokładność pozycji wierzchołków** (wyrażana w procentach), rozumiana tutaj jako liczba wierzchołków W , dla których odległości do odpowiadających im wierzchołków w R nie przekraczają pewnej wartości (eksperymentalnie przyjęto tę wartość jako jeden metr), podzielona przez liczbę wszystkich wierzchołków W . Gdy model R zawiera liczne zniekształcenia bądź „dziury”, należy się spodziewać że otrzymana wartość tego kryterium będzie dla niego niska.
- **Wartość najmniejsza, średnia i największa iloczynu skalarnego** pomiędzy normalnymi wierzchołków W a normalnymi odpowiadających im wierzchołków w R . Warto pamiętać, że iloczyn skalarny zwraca wartości z zakresu $\langle -1, 1 \rangle$, gdzie wynik -1 oznacza że oba wektory są do siebie równoległe ale mają przeciwne zwroty, 0 oznacza że wektory te są względem siebie prostopadłe, natomiast 1 oznacza że oba wektory mają ten sam kierunek. Jako że normalna danego wierzchołka z definicji jest wektorem jednostkowym, wartość iloczynu skalarnego równa 1 dla normalnych dwóch odpowiadających ze sobą wierzchołków oznaczałaby ich idealną zgodność ze sobą.
- **Dokładność normalnych wierzchołków** (wyrażana w procentach), rozumiana tutaj jako liczba wierzchołków W , dla których wynik iloczynu skalarnego pomiędzy

normalną danego wierzchołka W a normalną odpowiadającego mu wierzchołka R jest nie mniejszy niż 0.75. Otrzymany wynik jest dzielony przez liczbę wszystkich wierzchołków W aby uzyskać wartość procentową.

- **Liczba wynikowych brył**, czyli z ilu niezależnych modeli składa się odtworzony kształt. W testowanych przypadkach założono, że idealny model badanego obiektu powinien się składać z pojedynczej bryły.

Oprócz tego, wyliczone odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami są dzielone na przedziały, które następnie są wizualizowane za pomocą histogramów w celu lepszego zobrazowania częstotliwości występowania błędów konkretnego zakresu. Założenie tego działania jest takie, że modele wygenerowane przez dokładniejsze metody rekonstrukcji kształtu powinny się cechować dużą liczbą niewielkich błędów (odległości bliskich zeru) oraz małą liczbą błędów dużych (odległości rzędu kilku metrów). Takie samo podejście zastosowano również dla wartości wyznaczonych iloczynów skalarnych pomiędzy normalnymi wierzchołków w obu modelach.

Rozważano także zastosowanie metryki zakładającej wyliczanie stosunku pola powierzchni R do pola powierzchni W . Zrezygnowano jednak z tego, gdy badania wykazały, iż daje ona często nieprawidłowe wyniki dla tych algorytmów rekonstrukcji kształtu, które miały tendencję do generowania modeli zawierających zniekształcenia w postaci znacznych deformacji skierowanych na zewnątrz obiektu, powodując w ten sposób zwiększenie ich pola powierzchni. Należy zaznaczyć, że modele wzorcowe z reguły zawierają większą liczbę szczegółów niż modele uproszczone, przez co ich pole powierzchni będzie zazwyczaj większe niż w przypadku modeli odtworzonych na podstawie niepełnych danych. Z podobnych względów zrezygnowano także z metody opartej na wyliczaniu stosunku objętości obu modeli, w której konieczne byłoby również generowanie dodatkowych ścian zamykających każdą bryłę w celu wyznaczenia jej objętości [77].

4.8. Optymalizacja złożoności modeli

Przedstawione dotychczas sposoby przetwarzania danych zakładały jak najdokładniejsze odtworzenie kształtu pierwotnych obiektów, nie zważając przy tym na poziom złożoności wygenerowanych modeli, który z reguły jest bardzo wysoki (wynikowy model często składa się z kilkuset tysięcy wierzchołków i ścian). O ile modele te stanowią na ogół dokładną reprezentację kształtu obiektów pierwotnych, z praktycznego punktu widzenia przechowywanie i wyświetlanie takich brył wymaga użycia niekiedy niepotrzebnie zbyt

dużej ilości zasobów komputerowych. Ma to znaczenie szczególnie w sytuacjach, gdy:

- rozmiar sceny będącej przedmiotem modelowania jest generalnie duży, a zasoby są relatywnie niewielkie,
- bardzo dokładna reprezentacja trójwymiarowych modeli, np. budynków, w danym zastosowaniu nie jest konieczna, albo jest wręcz wskazane by była ona uproszczona, np. w złożonym modelowaniu rozchodzenia się fali uderzeniowej, wybuchu, rozprzestrzeniania się toksycznych gazów, itp. na terenie objętym zabudową miejską.

W takich przypadkach należy rozpatrzyć odpowiednie uproszczenie otrzymanych modeli do zadowalającego poziomu przy jednoczesnym zachowaniu najważniejszych cech i elementów reprezentowanych powierzchni.

Zagadnienie upraszczania poziomu złożoności trójwymiarowych brył jest szeroko znaną tematyką. W chwili obecnej istnieje wiele różnych, powszechnie dostępnych rozwiązań bazujących na podstawowych operacjach redukcji liczby wierzchołków, ścian czy krawędzi zadanych modeli, oferujących często zbliżone wyniki końcowe. Z tego powodu dobór odpowiedniej metody sprowadza się w dużej części do uwzględnienia jej wydajności oraz wygody wykorzystania. W ramach niniejszej pracy skorzystano z darmowego i wydajnego programu Fast-Quadric-Mesh-Simplification [78], skompilowanego do postaci aplikacji konsolowej. Wyniki jego zastosowania przedstawiono w rozdziale 5.3.

5. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów

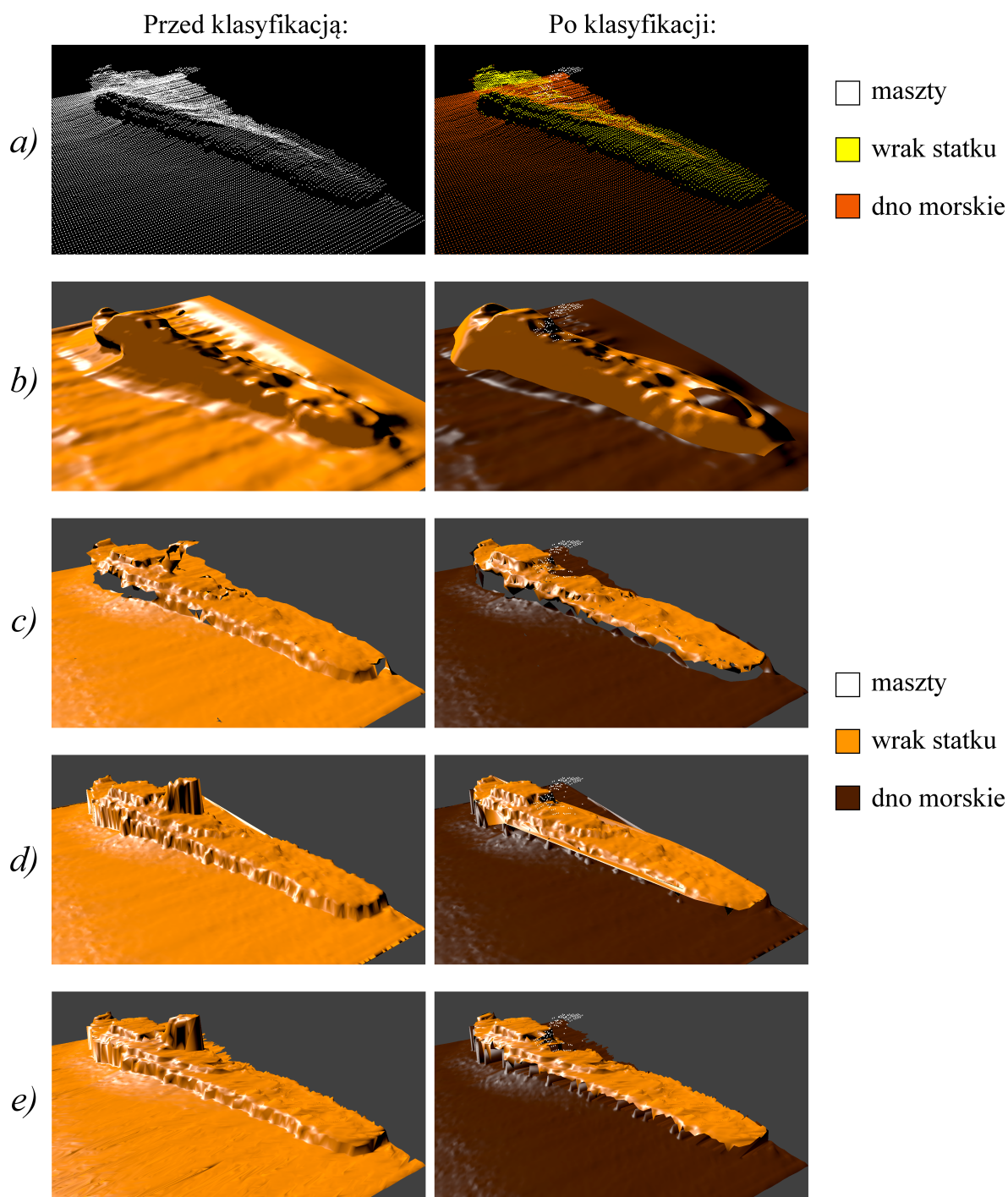
W poniższym rozdziale zaprezentowano wyniki otrzymane dla dwóch różnych procedur przetwarzania danych wejściowych, obejmujących zarówno zastosowanie algorytmu siatki, jak i algorytmu kostki. Oprócz tego, pod koniec rozdziału zamieszczono również efekty uproszczenia wybranych modeli do postaci brył o stosunkowo niskim poziomie złożoności.

5.1. Modele odtworzone metodą siatki

W tej sekcji przedstawiono wyniki zastosowania wstępnego przetwarzania danych za pomocą metod opisanych w rozdziałach 4.3 i 4.4. Następnie dla przetworzonych danych zastosowano powszechnie znane algorytmy rekonstrukcji trójwymiarowych kształtów wymienione wcześniej w rozdziale 4.1 oraz porównano otrzymane modele z rezultatami wykorzystania dedykowanych zaproponowanych metod triangulacji opisanych w rozdziale 4.6.2. Przedstawione wyniki rekonstrukcji prezentują najlepszej jakości modele jakie się udało uzyskać dla poszczególnych metod. W realizowanych algorytmach, wartości odpowiednich parametrów wejściowych były dobierane i stopniowo dostrajane w sposób empiryczny.

Za pierwszy zbiór testowy posłużył fragment niskorozdzielczego zestawu danych opisującego wyniki sondowania dna Zatoki Gdańskiej w miejscu, w którym znajduje się wrak holownika parowego o nieznanym nazwie, a średnia głębokość dna wynosi ok. 47 metrów. Na Rys. 55a) przedstawiono przetworzoną chmurę punktów przed i po zastosowaniu klasyfikacji punktów (obejmującej podział zbioru danych na osobne modele reprezentujące dno, wrak statku oraz jego maszt), a poniżej (Rys. 55b, c, d, e) pokazano wyniki zastosowania dla niej różnych algorytmów rekonstrukcji kształtu (opisanych w podrozdziałach 2.3 oraz 4.6.2), przy czym w wersji z użyciem klasyfikacji pominięto rekonstrukcję masztu statku, obrazując go zamiast tego za pomocą zestawu punktów. Jak łatwo zauważyć, metoda Poissona (Rys. 55b) wypadła w tym przypadku najgorzej, ponieważ wygenerowane przez nią modele charakteryzują się ogólnie niskim poziomem szczegółowości. Zauważalnie lepsze wyniki otrzymano za pomocą algorytmu Ball-Pivoting (Rys. 55c), aczkolwiek można w nich dostrzec dużą ilość niewielkich „dziur”. Modele uzyskane za pomocą dwuwymiarowego algorytmu triangulacji Delaunaya (Rys. 55d) nie zawierają tego rodzaju wad, natomiast można w nich dostrzec usytuowaną poziomo

płaszczyznę, której w rzeczywistości tam nie ma, występującą na brzegach wraku statku (w wersji uwzględniającej klasyfikację). **Proponowana metoda rekonstrukcji siatki (Rys. 55e) stworzyła modele podobne do tych uzyskanych za pomocą algorytmu Delaunaya, ale wersja sklasyfikowana zapewnia lepsze oddzielenie wraku od otoczenia.**

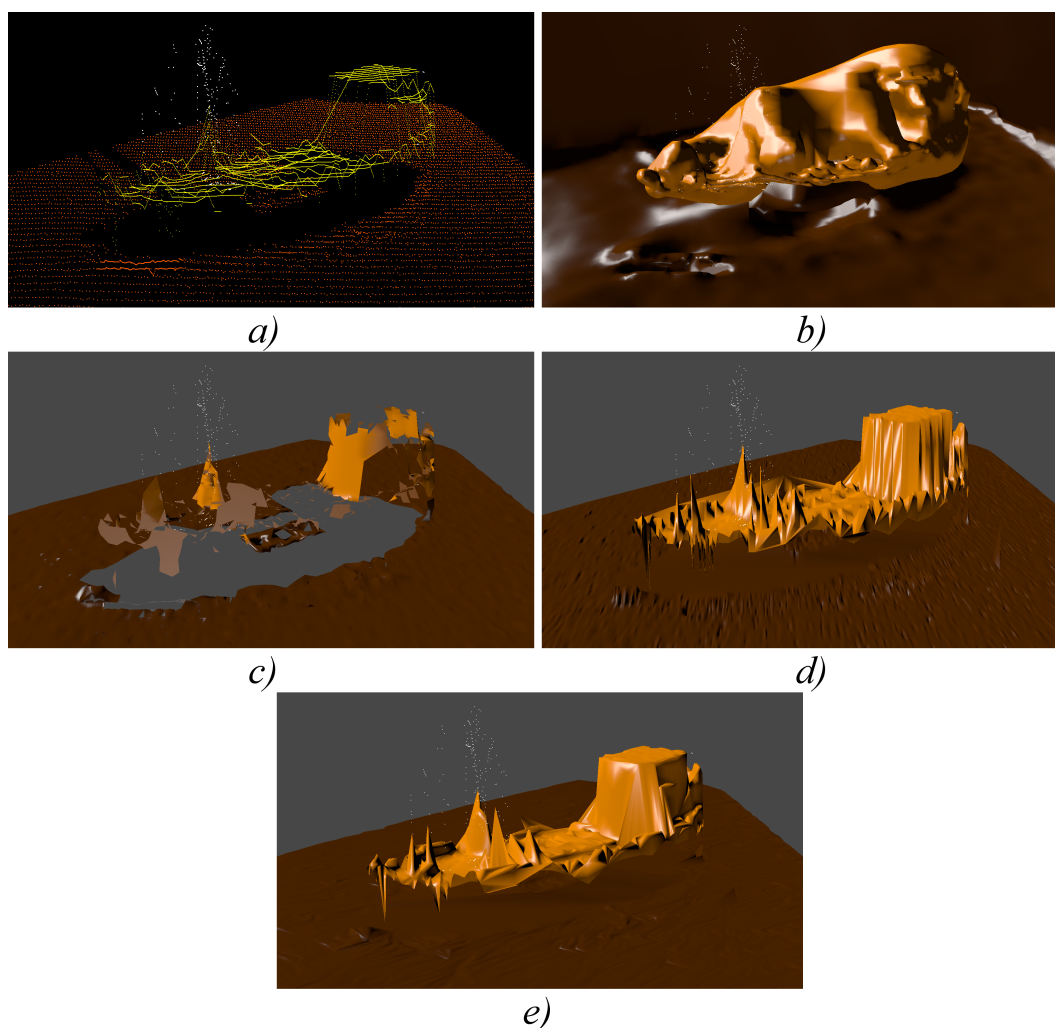


Rys. 55. Wyniki zastosowania algorytmów odtwarzania kształtu dla chmury punktów reprezentującej fragment Zatoki Gdańskiej (a) bez poprzedzenia klasyfikacją punktów (po lewej) i z zastosowaniem wpieryw klasyfikacji punktów (po prawej): metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c), triangulacja Delaunaya (d) oraz rekonstrukcja siatki (e)

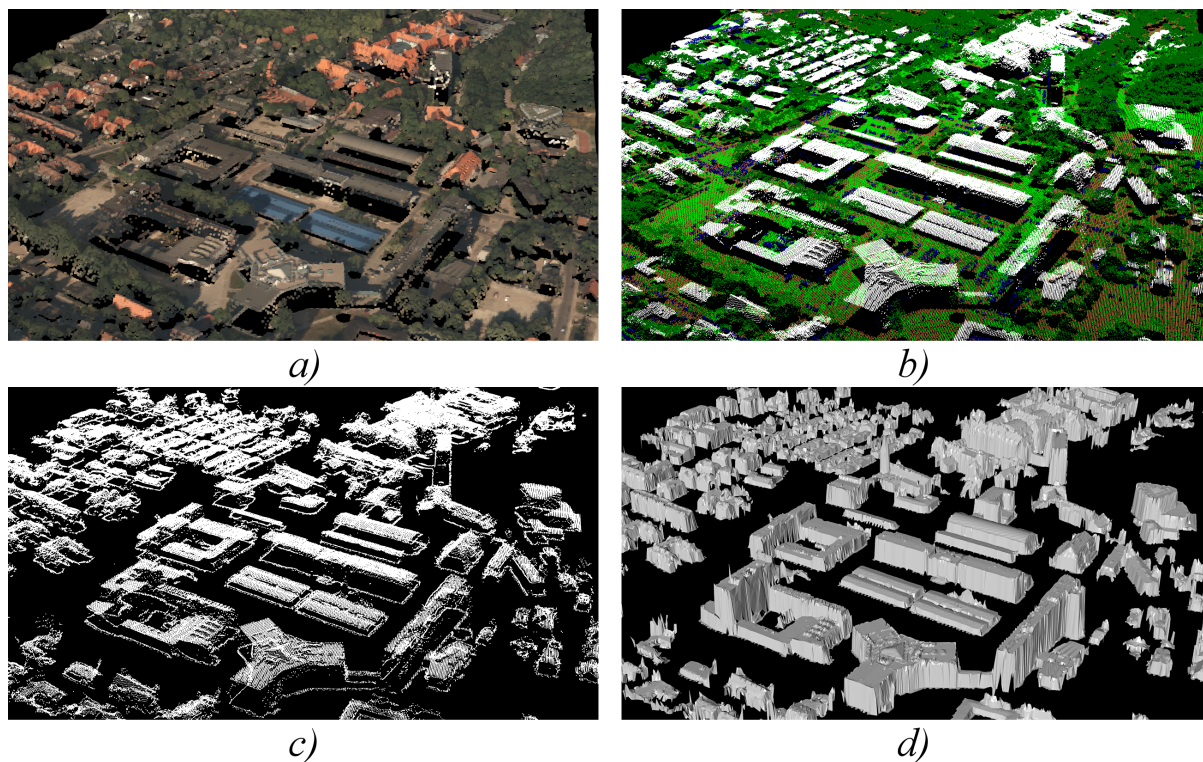
Za drugi zestaw danych testowych posłużył zbiór punktów stanowiący wyniki sondowania dna zatoki Oslofjorden w miejscu, w którym znajduje się wrak statku Cleona na głębokości ok. 18 metrów. W tym przypadku ograniczono się wyłącznie do danych sklasyfikowanych, gdzie na Rys. 56a) przedstawiono trzy podzbiory punktów: dno zatoki, wrak Cleona oraz punkty należące do masztów statku (a raczej pozostałości po nich). Ten ostatni podzbiór punktów następnie został pominięty w procesie odtwarzania kształtu. W niniejszym przypadku metoda Poissona (Rys. 56b) wypadła lepiej niż poprzednio, niemniej jednak uzyskany przez nią rezultat nie jest zadowalający, głównie ze względu na wypełnienie przez nią wolnych przestrzeni pomiędzy miejscami gdzie znajdowały się maszty a nadbudówką statku. Najgorsze wyniki wygenerował jednak algorytm Ball-Pivoting (Rys. 56c), ponieważ odtworzony przez niego model wraku statku reprezentuje jedynie niewielką część całego obiektu. Stosunkowo dobry rezultat otrzymano za pomocą triangulacji Delaunaya (Rys. 56d), gdzie odtworzone modele nie zawierają „dziur”, a poszczególne części wraku są łatwo dostrzegalne i rozpoznawalne, aczkolwiek model ten zawiera charakterystyczne nieregularności. **Modele zrekonstruowane za pomocą zaproponowanej przez autora niniejszej rozprawy metody siatki (Rys. 56e) wyglądają podobnie do brył odtworzonych algorytmem triangulacji Delaunaya, jednak zawierają one znacznie mniejszą liczbę zniekształceń, szczególnie w obrębie nadbudówki.**

Za ostatni zbiór testowy dla metod przetwarzania kończących się zastosowaniem algorytmu siatki posłużył zestaw danych zawierający wyniki skanowania LiDAR na terenie obejmującym kampus Politechniki Gdańskiej oraz jego najbliższe okolice. Dane zostały wcześniej przetworzone do postaci regularnej mapy wysokościowej w rozdzielczości jednego metra kwadratowego przypadającego na każdy piksel obrazu (w sposób opisany w podrozdziałach 4.3.2 oraz 4.3.3), która następnie została odczytana jako zestaw punktów w trójwymiarowej przestrzeni. W tym przypadku w procesie przetwarzania uwzględniono dodatkowe kroki dostosowane do danych naziemnych, które polegały na ograniczeniu wyników do klasy budynków, dodaniu do nich najbliższych punktów z klas opisujących teren (w celu lepszej rekonstrukcji ścian), a także detekcję ścian i ich derasteryzację (z użyciem procedur opisanych w podrozdziale 4.4.2). Efekty końcowe można zobaczyć na Rys. 57, gdzie Rys. 57a) przedstawia oryginalną chmurę punktów w zobrazowaniu RGB (pokolorowanie na podstawie informacji pochodzących z kanału czerwonego, zielonego i niebieskiego ze zdjęć lotniczych tego samego terenu, wykonanych wielkoformatową kamerą cyfrową [79]), Rys. 57b) reprezentuje te same dane ale z podziałem na klasy wg informacji

zawartych w źródłowych plikach LAS, Rys. 57c) przedstawia dane ograniczone do klasy budynków z dodaniem punktów najbliższych z nimi sąsiadujących (stąd przy każdym budynku występują także punkty, które pierwotnie były przypisane do klasy gruntu), natomiast Rys. 57d) reprezentuje ostateczny rezultat odtworzenia kształtu budynków za pomocą algorytmu siatki, z uwzględnieniem kroków polegających na wykrywaniu ścian i ich derasteryzacji. Jednocześnie na Rys. 58 przedstawiono efekt zamieszczenia ostatecznego modelu z Rys. 57d) w aplikacji Cesium [80], stanowiącej otwarte oprogramowanie do tworzenia trójwymiarowych systemów informacji przestrzennej dostępnych z poziomu przeglądark internetowych. Teksturę dla modelu pozyskano na podstawie danych RGB z pliku LAS, natomiast współrzędne dla jej mapowania zostały wygenerowane automatycznie. Przed umieszczeniem modelu w Cesium konieczna była jego konwersja do formatu glTF [81].



Rys. 56. Wyniki zastosowania algorytmów rekonstrukcji kształtu dla sklasyfikowanych danych (a) przedstawiających wrak statku Cleona w zatoce Oslofjorden: metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c), triangulacja Delaunaya (d) oraz rekonstrukcja siatki (e)

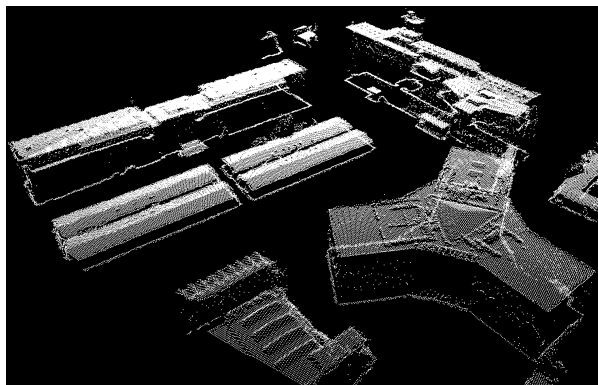


Rys. 57. Chmura punktów reprezentująca tereny Politechniki Gdańskiej i okolic, z pokolorowaniem na podstawie wartości z kanałów RGB pochodzących z cyfrowej ortofotomapy (a) oraz danych o klasyfikacji obiektów (b), gdzie (c) przedstawia efekt ograniczenia danych do klasy budynków oraz punktów bezpośrednio z nimi sąsiadujących, natomiast (d) reprezentuje ostateczny wynik odtworzenia kształtu budynków za pomocą algorytmu siatki (punkty należące do pozostałych klas są niewidoczne).

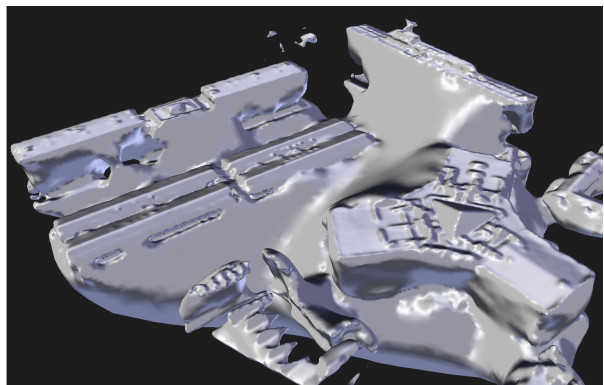
Dla celów porównawczych, z przetworzonego zestawu punktów przedstawionego na Rys. 57c) wyodrębniono mniejszy zbiór danych (Rys. 59a), który został wykorzystany jako dane wejściowe dla wcześniej opisywanych algorytmów rekonstrukcji kształtu. Podobnie jak w przypadku danych reprezentujących wraki statków, modele otrzymane za pomocą metody Poissona (Rys. 59b) dla omawianego zbioru cechują się ogólnie niską dokładnością, a wolne przestrzenie pomiędzy poszczególnymi budynkami zostały wypełnione przez nadmiarowe powierzchnie o nieregularnym kształcie. Modele uzyskane za pomocą algorytmu Ball-Pivoting (Rys. 59c) w dokładny sposób reprezentują prawie całą powierzchnię dachów budynków, aczkolwiek zawierają one liczne dziury, szczególnie w obrębie bocznych ścian budynków. **Modele zrekonstruowane za pomocą proponowanej metody rekonstrukcji siatki (Rys. 59d) wyglądają podobnie do brył odtworzonych algorytmem Ball-Pivoting, jednak nie zawierają one prawie żadnych dziur, a jednocześnie zachowane są w nich wolne przestrzenie występujące pomiędzy poszczególnymi budynkami.**



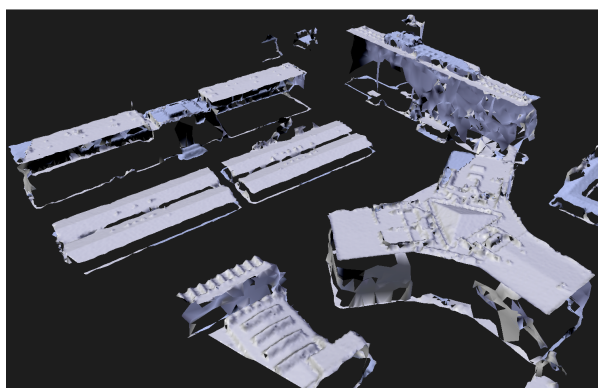
Rys. 58. Modele budynków uzyskane na podstawie opisanych metod, umieszczone w trójwymiarowym systemie informacji przestrzennej Cesium



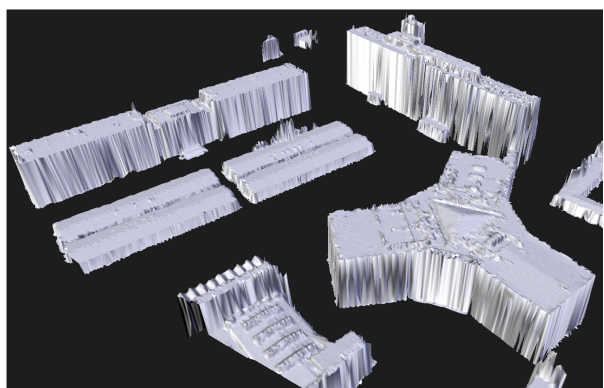
a)



b)



c)



d)

Rys. 59. Przetworzone dane przedstawiające wybrane budynki Politechniki Gdańskiej (a) oraz wyniki zastosowania dla nich algorytmów rekonstrukcji kształtu: metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c) oraz rekonstrukcja siatki (d)

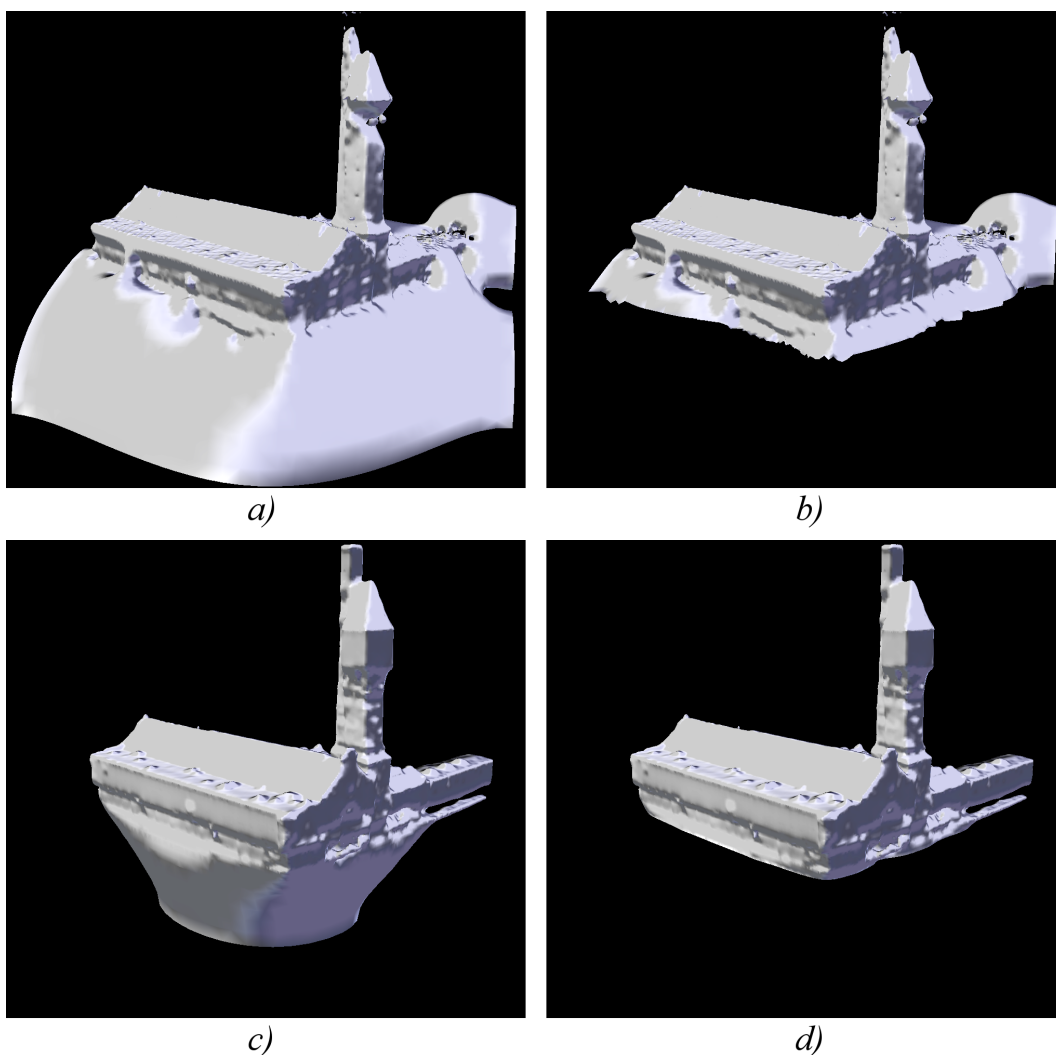
5.2. Modele odtworzone metodą kostki

W poniższym podrozdziale przedstawione zostały wyniki zastosowania metod przetwarzania wejściowych danych do postaci trójwymiarowych siatek opisanych w rozdziałach 4.5 i 4.6.3. Następnie zarówno przetworzone dane, jak i oryginalne chmury punktów, zostały wykorzystane jako dane wejściowe w procesie odtwarzania kształtów trójwymiarowych modeli za pomocą implementacji metody Poissona dostępnej w programie MeshLab [82], która w omawianych przypadkach oferowała najlepsze rezultaty spośród algorytmów rekonstrukcji powierzchni wymienionych w rozdziale 4.1. Wygenerowane modele, uzyskane na podstawie zarówno danych oryginalnych jak i odpowiednio przetworzonych, zostały następnie ze sobą porównane pod względem ich jakości na podstawie kryteriów omówionych w rozdziale 4.7 oraz wzorcowych modeli wymienionych w rozdziale 3.4. Jako że metoda Poissona miała tendencję do tworzenia dużej ilości nadmiarowych ścian w okolicach podłoża rekonstruowanych obiektów, przed porównaniem wyników wszystkie otrzymane modele trójwymiarowe zostały odpowiednio przycięte w programie Blender w taki sposób, żeby usunąć wszystkie elementy odtworzonego modelu, znajdujące się poniżej najniższego punktu oryginalnych danych wejściowych. Sytuacja ta została zobrazowana na Rys. 60 na przykładzie różnych modeli uzyskanych dla Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Rys. 60a) i Rys. 60c) przedstawiają odpowiednio modele otrzymane bezpośrednio po zastosowaniu rekonstrukcji metodą Poissona, natomiast Rys. 60b) i Rys. 60d) przedstawiają ich przycięte wersje.

Dla uproszczenia nazewnictwa przyjęto następujące oznaczenia poszczególnych modeli: niech W oznacza model wzorcowy, $R1$ - model wygenerowany na podstawie danych oryginalnych (Rys. 60a i b), natomiast $R2$ - model utworzony na podstawie danych przetworzonych przez algorytm kostki (Rys. 60c i d). Przedstawione wyniki rekonstrukcji prezentują najlepsze modele jakie się udało uzyskać dla każdego zbioru danych. Wartości odpowiednich parametrów działania metody Poissona były identyczne zarówno dla danych przetworzonych jak i oryginalnych.

Aby wyniki porównywania modeli $R1$ i $R2$ z modelem W były wiarygodne, modele te musiały być w jednakowy sposób umieszczone we wspólnym układzie współrzędnych dla każdego reprezentowanego przez nie obiektu. Jako że w każdym z opisywanych przypadków model $R2$ powstał na podstawie danych stanowiących przetworzoną wersję oryginalnej chmury punktów wykorzystanej do stworzenia modelu $R1$, modele $R1$ i $R2$ są ze sobą idealnie dopasowane. W tych przypadkach, w których oryginalna chmura punktów stanowi

wynik symulowanego skanowania powierzchni modelu W, modele R1 i R2 są jednocześnie idealnie dopasowane z W, natomiast w pozostałych sytuacjach dopasowanie modelu W do modeli R1 i R2 zostało wykonane ręcznie. W tym celu model W został odpowiednio przesunięty, obrócony i przeskalowany względem oryginalnej chmury punktów w taki sposób, żeby jak największa liczba jej punktów pokrywała się z odpowiadającymi im elementami powierzchni modelu W. Jako że odległości pomiędzy powyższymi punktami i odpowiadającymi im elementami W nawet w skrajnych przypadkach nie przekraczały kilkudziesięciu centymetrów, uznano, że ewentualne błędy powstałe przy tym procesie są pomijalnie małe w porównaniu z rzędem wielkości błędów ogólnie otrzymanych przy porównywaniu modelu W z modelami R1 i R2, gdzie błędy te osiągały wartości nawet kilkudziesięciu metrów.



Rys. 60. Modele wynikowe reprezentujące budynek Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej, otrzymane na podstawie danych oryginalnych (a) i przetworzonych algorytmem kostki (c) oraz ich przycięte wersje (b, d)

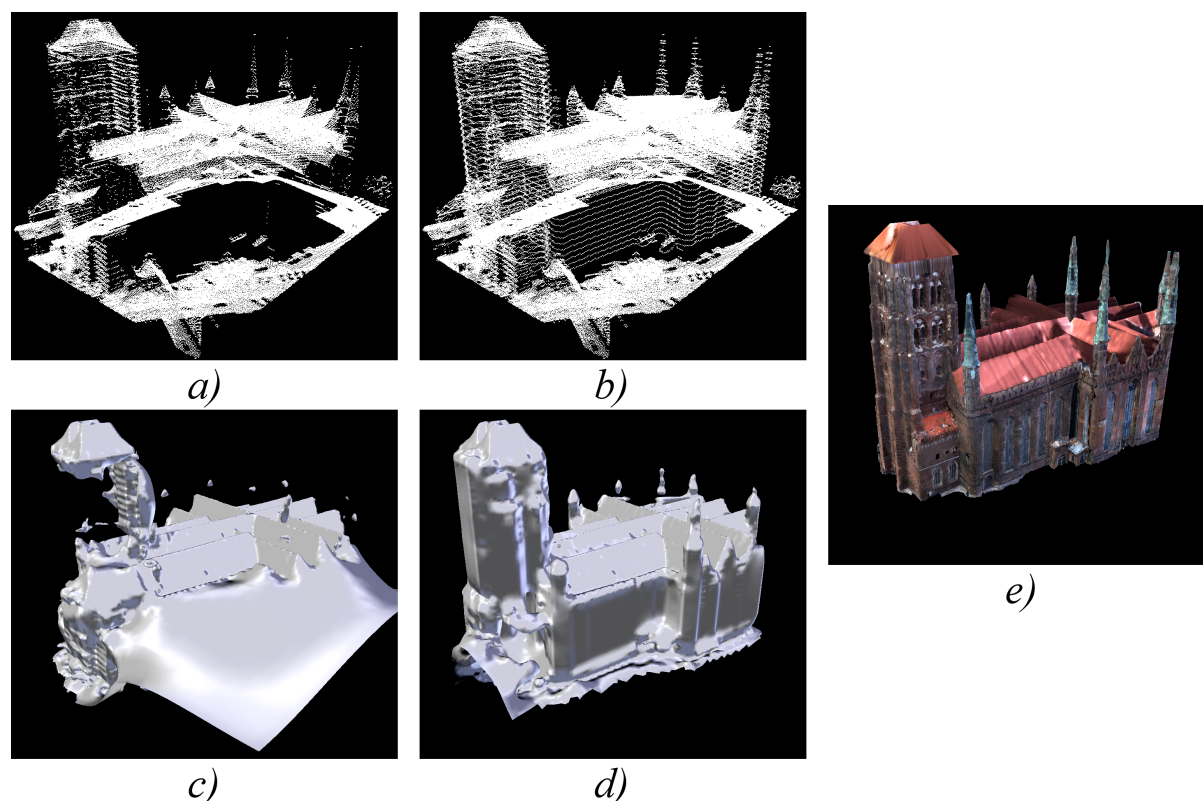
Za pierwszy zestaw testowy przyjęto dane opisujące kształt Bazyliki konkatedralnej Wniebowzięcia Najświętszej Maryi Panny w Gdańsku, dla których przygotowano odpowiedni model referencyjny uzyskany z użyciem technologii fotogrametrii, opisanej w podrozdziałach 2.4 oraz 3.4.. W Tab. 5 przedstawiono wartości poszczególnych parametrów wejściowych działania algorytmu kostki, które zostały dobrane metodą empiryczną. W wyniku zastosowania przedstawionej rozdzielczości przestrzennej, oryginalny zestaw składający się z 69142 punktów i reprezentujący obiekt o wysokości około 104 metrów, został w tym przypadku podzielony na 41 poziomów wysokości, tworząc w ten sposób nowy zbiór o liczebności 106421 punktów. Na szczególną uwagę zasługuje tutaj zastosowanie wysokiego poziomu wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki w celu uzupełnienia powierzchni reprezentujących boczne ściany budynku oraz jego główną wieżę. Oprócz tego, dzięki wykorzystaniu opcji trybu hybrydowego, przetworzona chmura punktów zawiera wszystkie detale występujące w oryginalnych danych, natomiast dzięki zastosowaniu wysokiego poziomu rozmycia, wynikowy model nie zawiera istotnych zniekształceń na powierzchni dachów.

Tab. 5. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących Bazylikę NMP w Gdańsku

Rozdzielczość przestrzenna pojedynczego sektora (XYZ) [m]	0,5 0,5 2,0
Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki	TAK
Poziom rozmycia	2
Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki	20
Opcja trybu hybrydowego	TAK

Na Rys. 61 przedstawiono: wyniki skanowania LiDAR ograniczone do obszaru Bazyliki NMP w Gdańsku (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model R1 (c), te same wyniki przetworzone algorytmem kostki (b) oraz stworzony na ich podstawie model R2 (d), a także referencyjny model W (e), z którym pozostałe modele zostały porównane. Można łatwo zauważyć, że w R1 występują duże braki w obrębie głównej wieży, podczas gdy R2 reprezentuje w tym miejscu pełną bryłę. Podobna sytuacja zachodzi w przypadku pozostałych wieżyczek, które w R1 są reprezentowane przez osobne bryły umieszczone luźno w przestrzeni i odseparowane od reszty Bazyliki, podczas gdy w R2 te same wieżyczki są reprezentowane dokładniej, aczkolwiek są one znacznie niższe od rzeczywistych wież

widocznych zarówno w chmurze punktów, jak i w modelu W.

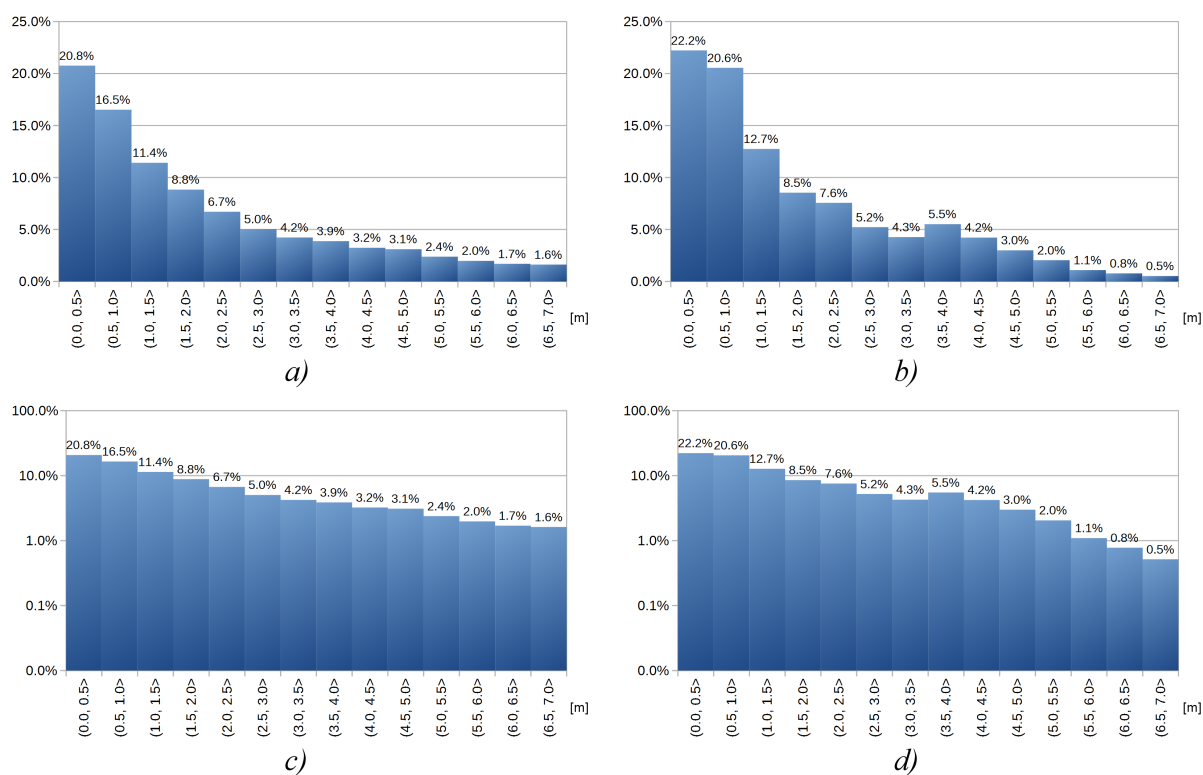


Rys. 61. Dane przedstawiające modele Bazyliki NMP w Gdańsku: wyniki skanowania LiDAR (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (c), dane przetworzone przy użyciu zaproponowanych przez autora metod (b) oraz stworzony na ich podstawie model (d), a także model referencyjny (e)

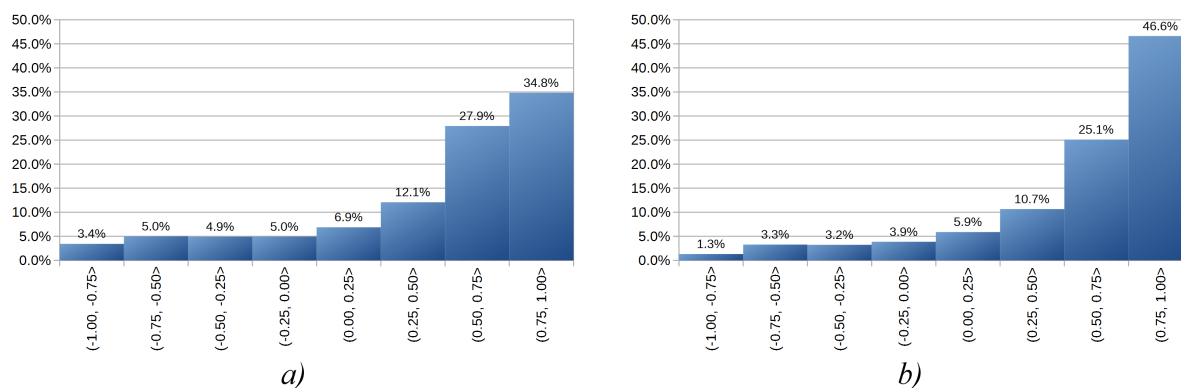
Na Rys. 62 przedstawiono rozkłady odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami W a odpowiadającymi im wierzchołkami w modelach zrekonstruowanych. Wartości tych odległości zostały pogrupowane w przedziały, rozkłady zostały przedstawione w postaci histogramów, aby zobrazować w ten sposób częstotliwość występowania błędów o różnych wartościach. Rys. 62a) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R1, natomiast Rys. 62b) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R2. Dodatkowo na Rys. 62c) i Rys. 62d) przedstawiono te same wyniki, ale z zastosowaniem skali logarytmicznej na osi odległości. Każdy słupek reprezentuje pewien przedział odległości, a jego wysokość informuje o tym, jaka część wierzchołków całego modelu mieści się pod względem swoich wartości w tym przedziale. Przykładowo, w modelu R1 20,8% wszystkich wierzchołków znajduje się w odległości nie większej niż pół metra od położenia odpowiadających im wierzchołków w modelu W, natomiast w R2 liczba wierzchołków nie przekraczających tej odległości wynosi już 22,2% wszystkich jego punktów. Jednocześnie w R2 można dostrzec mniejszą liczbę wierzchołków, których

odległości od wierzchołków W przekraczają pięć metrów. Oprócz tego rozkłady odległości R1 i R2 są do siebie zbliżone.

Na Rys. 63 natomiast porównano otrzymane modele 3D z modelem wzorcowym pod względem zgodności normalnych ich wierzchołków z normalnymi wierzchołków modelu W. Rys. 63a) przedstawia rozkłady wartości iloczynu skalarnego wektorów normalnych dla wierzchołków W i wektorów normalnych odpowiadających im wierzchołków R1, natomiast Rys. 63b) przedstawia analogiczne wyniki dla modeli W i R2. Jak można łatwo zauważyć, wyniki dla R2 są w tym przypadku zdecydowanie lepsze niż wyniki dla R1, gdyż np. dla R1 34,8% wszystkich jego wierzchołków przekracza wartość iloczynu skalarnego wynoszącą 0,75, podczas gdy w R2 liczba takich wierzchołków wynosi już 46,6% wszystkich jego punktów. W idealnym przypadku (identyczność modeli lub jedynie ich wzajemne przesunięcie równoległe), iloczyn skalarny normalnych dla wszystkich par odpowiadających sobie wierzchołków powinien wynosić 1.



Rys. 62. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi Bazylikę NMP w Gdańsku. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej



Rys. 63. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Bazyliki NMP w Gdańsku

W Tab. 6 przedstawiono zestawienie najważniejszych kryteriów określających jakość modelu R1 („rekonstrukcja z danych oryginalnych R1”) oraz modelu R2 („rekonstrukcja z danych przetworzonych R2”). Wartości wytłuszczone oznaczają lepszy wynik uzyskany w danej kategorii. Jak łatwo zauważyć, **R2 uzyskał zdecydowanie lepsze rezultaty od R1 niemal w każdej kategorii**, szczególnie pod względem otrzymanej łącznej liczby brył, co jest spowodowane m. in. dokładniejszym odwzorowaniem wieżyczek Bazyliki (w idealnym przypadku model powinna stanowić jedna bryła). Jediną kategorią, w której R2 jest gorszej jakości od R1, jest największa w całym zbiorze odległość jaka występuje pomiędzy wierzchołkami W a wierzchołkami modelu odtworzonego. Przypadek ten został zilustrowany na Rys. 64, gdzie na Rys. 64a) zaznaczono kolorem czerwonym wierzchołek W , dla którego odległość do najbliższego mu wierzchołka w R2 (Rys. 64c) jest największa. Dla porównania, odpowiadający mu wierzchołek w R1 został przedstawiony na Rys. 64b). Jak łatwo zauważyć, są to wierzchołki odpowiadające wieżyczkom Bazyliki, które w obu przypadkach zostały odtworzone jedynie w niewielkim stopniu. W przypadku R1 za zwieńczenie wieżyczki uznana została niewielka bryła unosząca się ponad pozostałą częścią modelu, podczas gdy w R2 wieżyczka ta nie występuje, dlatego za wierzchołek najbliższy uznany został najbardziej wysunięty fragment dachu.

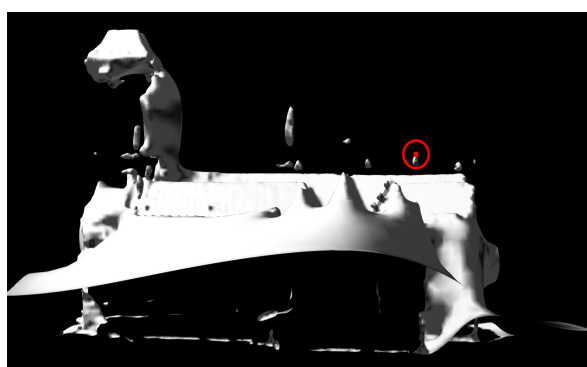
Tab. 6. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli Bazyliki NMP w Gdańsku odtworzonych na podstawie danych oryginalnych i danych przetworzonych

	Rekonstrukcja z danych oryginalnych R1	Rekonstrukcja z danych przetworzonych R2
Odległość najmniejsza [cm]	1.24	1.00

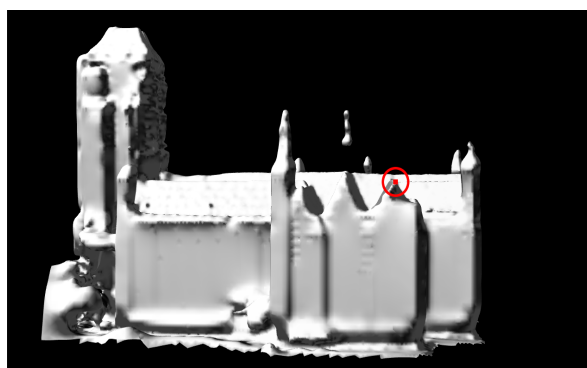
Odległość średnia [cm]	259.84	189.83
Odległość największa [m]	20.81	27.66
Dokładność pozycji wierzchołków przy progu jednego metra	37.29%	42.78%
Średnia wartość iloczynu skalarnego normalnych dla par wierzchołków	0.45	0.57
Dokładność normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75	34.82%	46.62%
Liczba wynikowych jednospójnych brył	37	13



a)



b)



c)

Rys. 64. Wierzchołek reprezentujący czubek jednej z wieżyczek modelu referencyjnego Bazyliki NMP w Gdańsku (a) oraz odpowiadające mu wierzchołki w modelu R1 (b) i R2 (c)

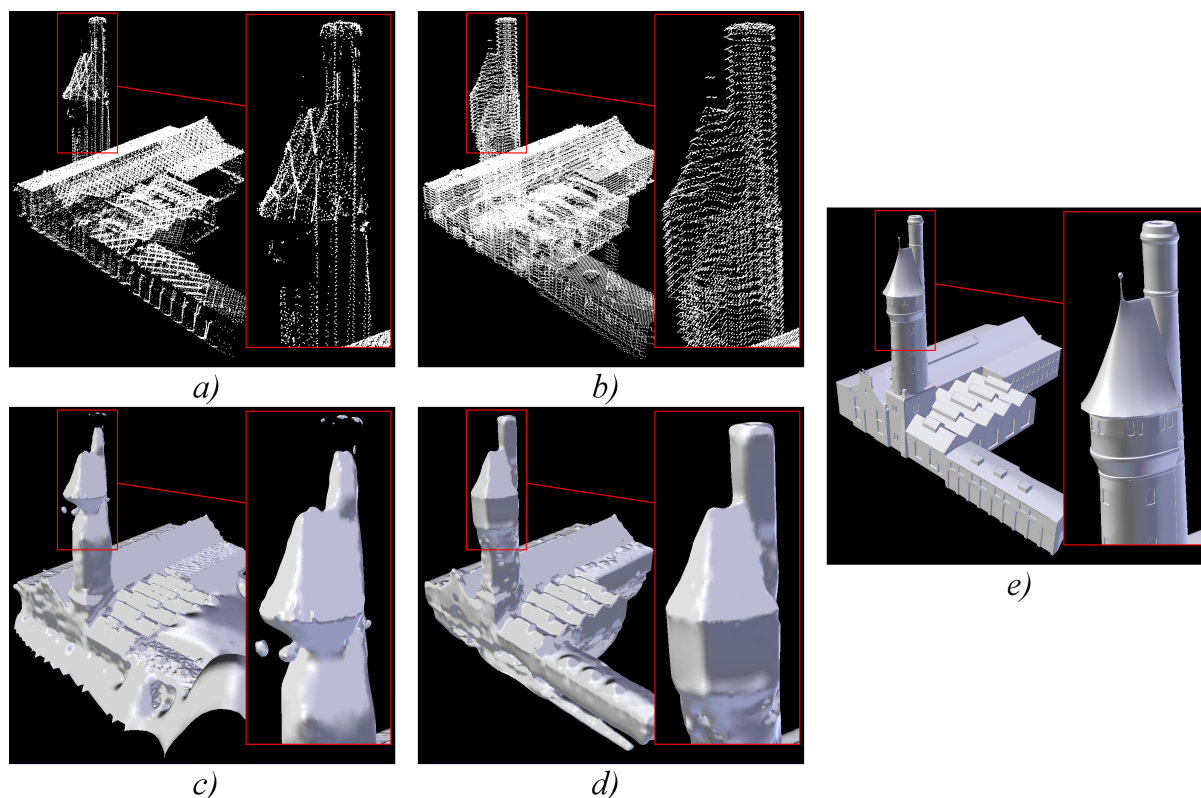
Za drugi zestaw testowy przyjęto dane ze skanowania powierzchni budynku Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, dla których stworzono szczegółowy model referencyjny na podstawie planów architektonicznych tego budynku. W Tab. 7 przedstawiono wartości poszczególnych parametrów wejściowych przekazanych do użytego algorytmu kostki. Jako że oryginalny zbiór danych zawierał aż 89485 punktów i cechował się dużą rozdzielczością przestrzenną, zastosowano tutaj

niewielkie rozmiary dla pojedynczego sektora, w wyniku czego oryginalna chmura punktów, reprezentująca budynek o wysokości około 51 metrów, została w tym przypadku podzielona na 68 poziomów wysokości. Podobnie jak w przypadku Bazyliki NMP w Gdańsku, zastosowano tutaj wysoki poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki, a także wysoki poziom rozmycia. W tym przypadku nie skorzystano jednak z opcji trybu hybrydowego, ponieważ oryginalny zestaw punktów cechował się dużą nieregularnością przestrzenną, co miałoby negatywny wpływ na kształt odtworzonego modelu. Jako że wygenerowane punkty nie zostały połączone z oryginalnym zbiorem danych, ostateczna chmura punktów jest mniej liczna od oryginalnej i zawiera 84882 punkty.

Tab. 7. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących Laboratorium Maszynowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej

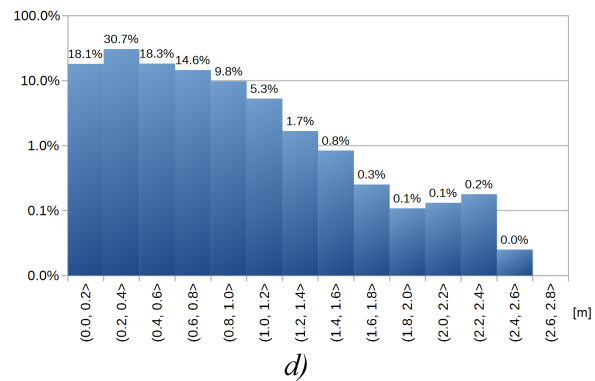
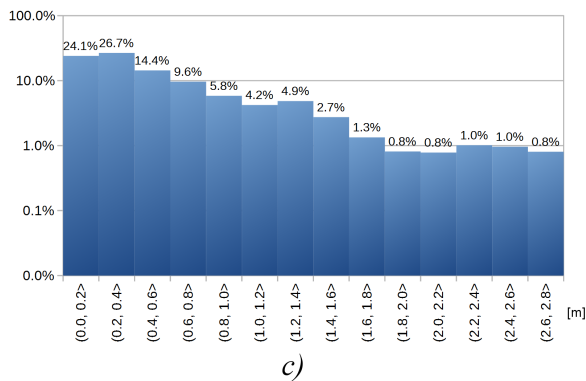
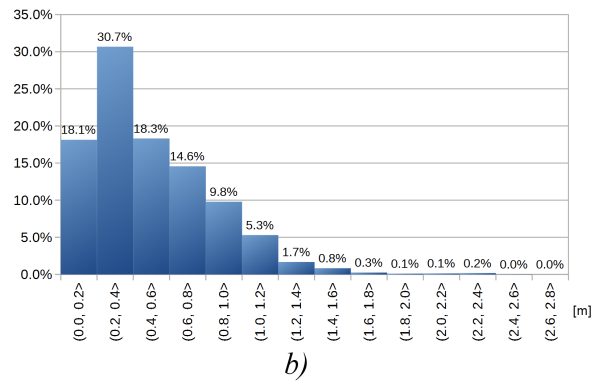
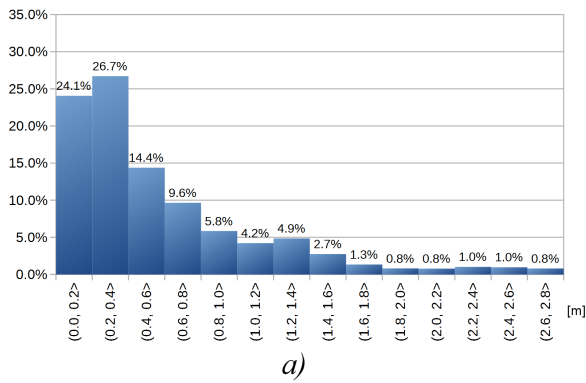
Rozdzielczość przestrzenna pojedynczego sektora (XYZ) [m]	0,25 0,25 0,75
Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki	TAK
Poziom rozmycia	2
Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki	10
Opcja trybu hybrydowego	NIE

Na Rys. 65 przedstawiono: wyniki skanowania LiDAR ograniczone do obszaru Laboratorium Maszynowego (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model R1 (c), te same wyniki przetworzone algorytmem kostki (b) oraz stworzony na ich podstawie model R2 (d), a także referencyjny model W (e), który w tym przypadku jest także modelem wejściowym dla procesu symulacji skanowania. Na Rys. 65 zamieszczono również zbliżenia na okolice dachu wieży, dzięki czemu można łatwo zauważyć, że w R1 model wieży zawiera pewnie zniekształcenia poniżej jej dachu oraz w obrębie komina, podczas gdy R2 w tych samych miejscach nadal wydaje się być bardziej kompletny. Jednocześnie R1 zawiera dużą ilość nadmiarowych ścian w dolnych częściach obiektu, które nie występują ani w R2, ani w referencyjnym modelu W.



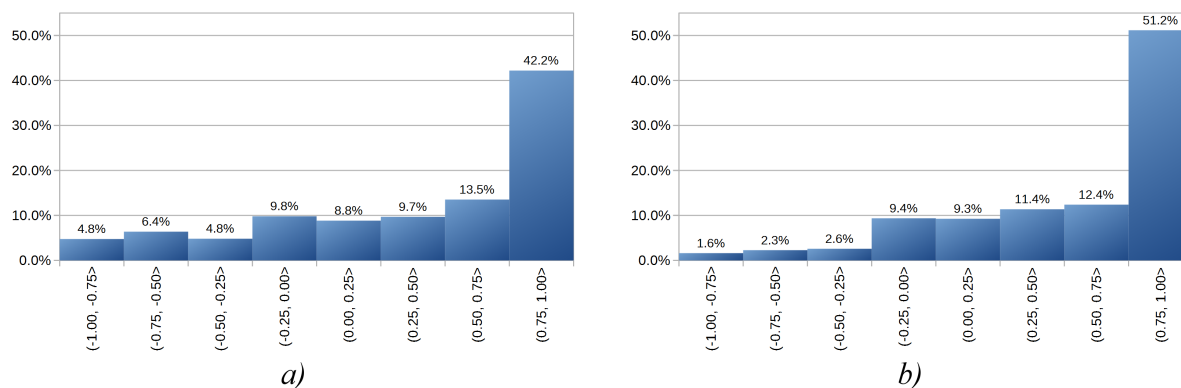
Rys. 65. Dane przedstawiające modele Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej: wyniki skanowania LiDAR (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (c), dane przetworzone przy użyciu zaproponowanych przez autora metod (b) oraz stworzony na ich podstawie model (d), a także model referencyjny (e)

Na Rys. 66 przedstawiono rozkłady odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami W a odpowiadającymi im wierzchołkami w modelach zrekonstruowanych, pogrupowane w taki sam sposób jak poprzednio. Rys. 66a) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R1, natomiast Rys. 66b) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R2. Dodatkowo na Rys. 66c) i Rys. 66d) przedstawiono te same wyniki, ale z zastosowaniem skali logarytmicznej na osi odległości. W przypadku obu modeli zrekonstruowanych można zauważyć, że około połowa ich wierzchołków znajduje się w bliskiej odległości (maks. 40 cm) od wierzchołków wzorcowych W, a liczba błędów maleje wraz ze wzrostem wartości poszczególnych przedziałów. Warto zwrócić uwagę, że w **R2** występuje zdecydowanie mniejsza liczba wierzchołków, których odległość od odpowiadających mu punktów w W przekracza 120 cm. Oznacza to, że w tym przypadku zastosowanie metody kostki skutkuje utworzeniem modelu z niewielką ilością dużych błędów kosztem niewielkiego zwiększenia ilości błędów małych.



Rys. 66. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi Laboratorium Maszynowe Politechniki Gdańskiej. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarymicznej

Na Rys. 67 porównano otrzymane modele 3D z modelem wzorcowym pod względem zgodności normalnych ich wierzchołków z normalnymi wierzchołków modelu W. Rys. 67a) przedstawia rozkłady wartości iloczynu skalarnego wektorów normalnych dla wierzchołków W i wektorów normalnych odpowiadających im wierzchołków R1, natomiast Rys. 67b) przedstawia analogiczne wyniki dla modeli W i R2. O ile generalnie oba histogramy są do siebie dosyć podobne, warto zwrócić uwagę na to, że R2 osiąga w tym przypadku znacznie lepsze wyniki od R1, gdyż dla R1 42,2% wszystkich jego wierzchołków przekracza wartość iloczynu skalarnego wynoszącą 0,75, podczas gdy w R2 liczba takich wierzchołków wynosi aż 51,2% wszystkich jego punktów. Oprócz tego w R2 dla zauważalnie mniejszej liczby wierzchołków występują błędy grube. Za takie przyjęto wierzchołki, dla których wyliczona wartość iloczynu skalarnego jest ujemna.



Rys. 67. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków $R1$ (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków $R2$ (b), dla modelu Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej

W Tab. 8 przedstawiono zestawienie najważniejszych kryteriów określających jakość modelu $R1$ („rekonstrukcja z danych oryginalnych $R1$ ”) oraz modelu $R2$ („rekonstrukcja z danych przetworzonych $R2$ ”). W tym przypadku **model $R2$ ponownie uzyskał lepsze rezultaty od $R1$ niemal w każdej kategorii**, jednak w tym przypadku jedyną kategorią, w której $R2$ przegrywa z $R1$, jest najmniejsza odległość jaka występuje pomiędzy wierzchołkami W a wierzchołkami modelu odtworzonego. Wynik uzyskany dla $R2$ jest w tym przypadku gorszy jedynie o 4 milimetry.

Tab. 8. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli Laboratorium Maszynowego PG odtworzonych na podstawie danych oryginalnych i danych przetworzonych

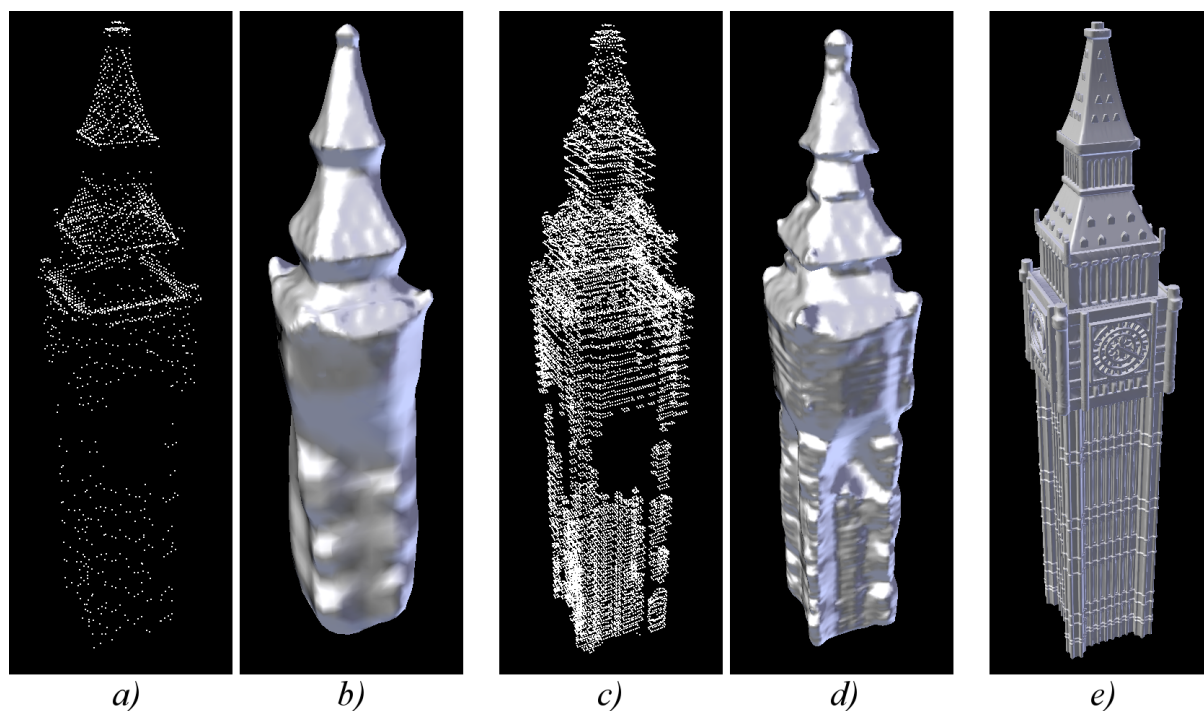
	Rekonstrukcja z danych oryginalnych $R1$	Rekonstrukcja z danych przetworzonych $R2$
Odległość najmniejsza [cm]	0.25	0.65
Odległość średnia [cm]	63.31	49.97
Odległość największa [m]	6.44	2.47
Dokładność pozycji wierzchołków przy progu jednego metra	80.64%	91.48%
Średnia wartość iloczynu skalarnego normalnych dla par wierzchołków	0.39	0.54
Dokładność normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75	42.20%	51.17%
Liczba wynikowych jednopójnych brył	38	18

Za kolejny zestaw testowy przyjęto zbiór danych stanowiący wynik symulowanego skanowania budowli Elizabeth Tower z wysokości 150 m nad ziemią, składający się z 2090 punktów. W Tab. 9 przedstawiono wartości poszczególnych parametrów wejściowych przekazanych do użytego algorytmu kostki. W tym przypadku zastosowano niski poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki. W związku z tym, dla pojedynczego sektora dobrano odpowiednio duże rozmiary, żeby rozłożenie punktów w wynikowym zbiorze danych było jak najbardziej równomierne na osi Z. Wejściowa chmura punktów, reprezentująca obiekt o wysokości 96 metrów, została podzielona na 65 poziomów wysokości, tworząc w ten sposób zbiór zawierający 15487 punktów. Wartości pozostałych parametrów zostały dobrane w sposób analogiczny jak w przypadku Bazyliki NMP w Gdańsku.

Tab. 9. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 150 m

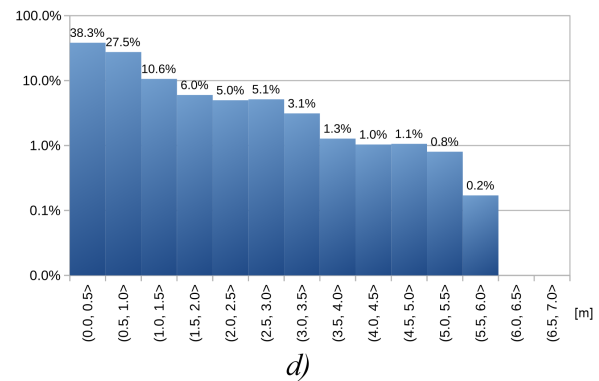
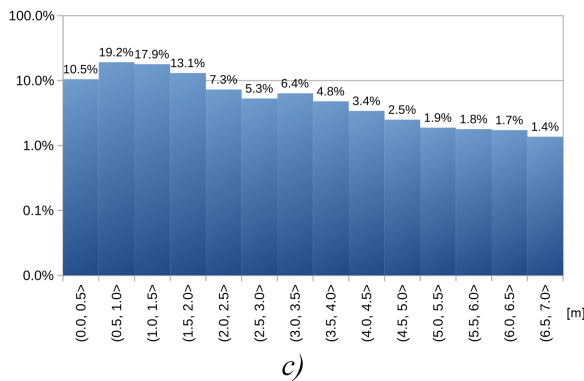
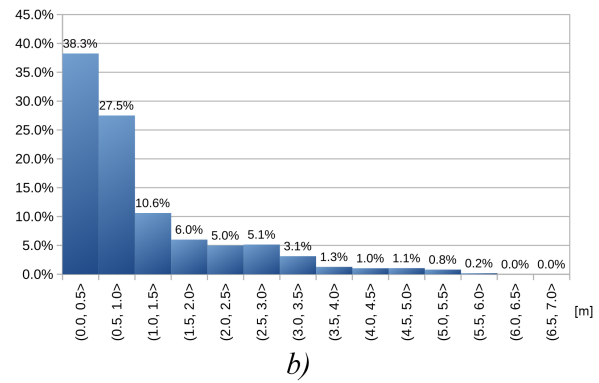
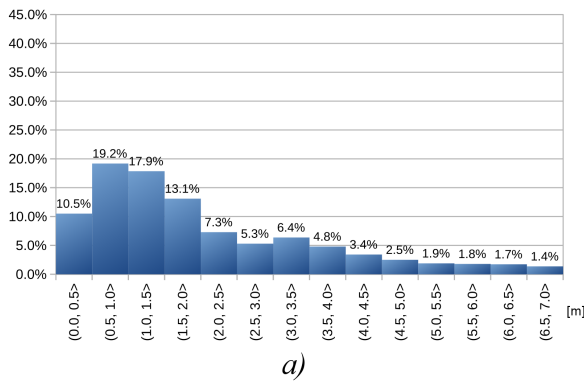
Rozdzielczość przestrzenna pojedynczego sektora (XYZ) [m]	0,35 0,35 1,5
Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki	TAK
Poziom rozmocowania	2
Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki	4
Opcja trybu hybrydowego	TAK

Na Rys. 68 przedstawiono: wyniki symulowanego skanowania z wysokości 150 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model R1 (b), te same wyniki przetworzone przez algorytm kostki (c) oraz stworzony na ich podstawie model R2 (d), a także model wzorcowy W (e), który w tym przypadku jest także modelem wejściowym dla procesu symulacji skanowania. Na pierwszy rzut oka oba zrekonstruowane modele mogą się wydawać do siebie zbliżone, jednak przy bliższej analizie na R2 można dostrzec więcej szczegółów, a także dokładniejsze zachowanie w nim ostrych krawędzi występujących w oryginalnym modelu.



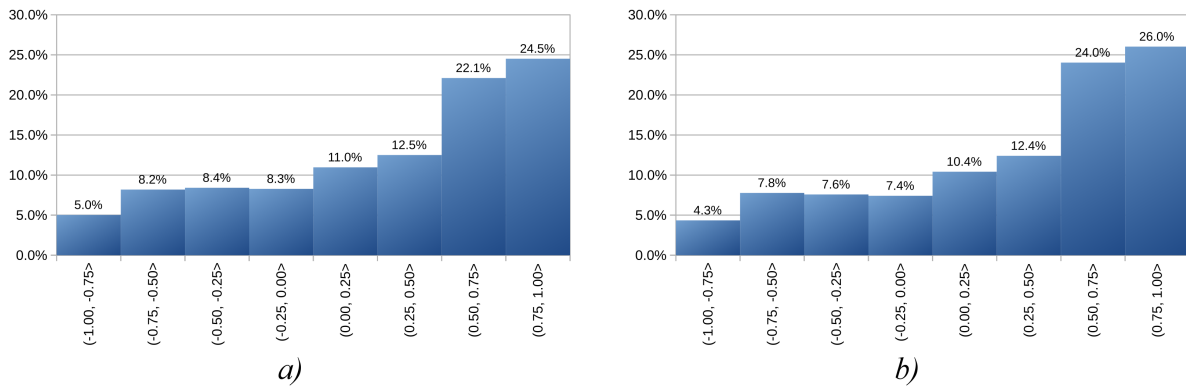
Rys. 68. Wyniki symulowanego skanowania Elizabeth Tower z wysokości 150 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e)

Na Rys. 69 przedstawiono rozkłady odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami W a odpowiadającymi im wierzchołkami w modelach zrekonstruowanych. Rys. 69a) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R1, natomiast Rys. 69b) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R2. Dodatkowo na Rys. 69c) i Rys. 69d) przedstawiono te same wyniki, ale z zastosowaniem skali logarytmicznej na osi odległości. Jak można wyczytać z histogramu, w modelu R2 aż 65,8% jego wierzchołków znajduje się w odległości nie większej niż 1 m od odpowiadających im wierzchołków w modelu W, podczas gdy w R1 tylko 29,7% jego wierzchołków spełnia to kryterium. Ponadto, w R2 żaden wierzchołek nie znajduje się w odległości większej niż 6 m od odpowiadającego mu wierzchołka w modelu W.



Rys. 69. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Elizabeth Tower zeskanowany metodą symulowaną z wysokości 150 m. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej

Na Rys. 70 porównano otrzymane modele 3D z modelem wzorcowym pod względem zgodności normalnych ich wierzchołków z normalnymi wierzchołków modelu W. Rys. 70a) przedstawia rozkłady wartości iloczynu skalarnego wektorów normalnych dla wierzchołków W i wektorów normalnych odpowiadających im wierzchołków R1, natomiast Rys. 70b) przedstawia analogiczne wyniki dla modeli W i R2. W tym przypadku wyniki dla obu zrekonstruowanych modeli są do siebie bardzo zbliżone, a model R2 w większości przypadków ma niewielką przewagę nad R1.



Rys. 70. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Elizabeth Tower zeskanowanego metodą symulowaną na wysokości 150 m

W Tab. 10 przedstawiono zestawienie najważniejszych kryteriów określających jakość modelu R1 („rekonstrukcja z danych oryginalnych R1”) oraz modelu R2 („rekonstrukcja z danych przetworzonych R2”). **Dla modelu R2 ponownie uzyskano lepsze wyniki w większości kategorii**, szczególnie w przypadku dokładności pozycji wierzchołków. Jednak tym razem model ten przegrywa nie tylko pod względem najmniejszej odległości, ale oprócz tego zawiera w tym przypadku dwie nadmiarowe, niewielkie bryły, które zostały wygenerowane we wnętrzu modelu głównego.

Tab. 10. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 150 m

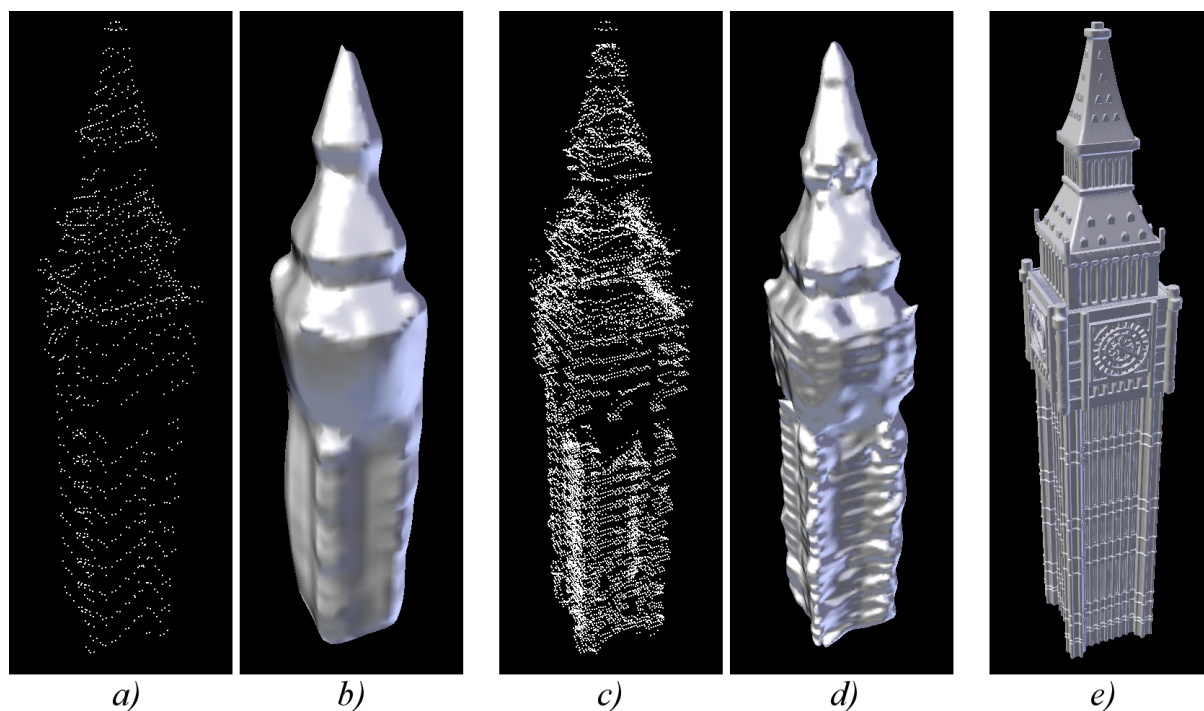
	Rekonstrukcja z danych oryginalnych R1	Rekonstrukcja z danych przetworzonych R2
Odległość najmniejsza [cm]	0.23	0.32
Odległość średnia [cm]	220.99	109.13
Odległość największa [m]	8.82	5.99
Dokładność pozycji wierzchołków przy progu jednego metra	29.69%	65.77%
Średnia wartość iloczynu skalarnego normalnych dla par wierzchołków	0.28	0.32
Dokładność normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75	24.52%	26.03%
Liczba wynikowych jednopójnych brył	1	3

Za następny zestaw testowy przyjęto zbiór danych stanowiący wynik symulowanego skanowania budowli Elizabeth Tower z wysokości 300 m nad ziemią, składający się z zaledwie 1096 punktów. W Tab. 11 przedstawiono wartości poszczególnych parametrów wejściowych przekazanych do zastosowanego algorytmu kostki. Wartości te są ogólnie zbliżone do tych użytych w przypadku skanowania budynku z wysokości 150 m nad ziemią, ale zostały one dostosowane do niższej rozdzielczości przestrzennej oryginalnych danych, w związku z czym otrzymana chmura punktów została podzielona na jedynie 49 poziomów wysokości, uzyskując w ten sposób zbiór o liczebności 8643 punktów.

Tab. 11. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 300 m

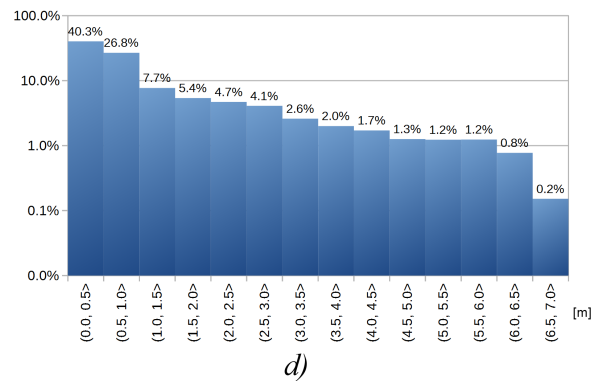
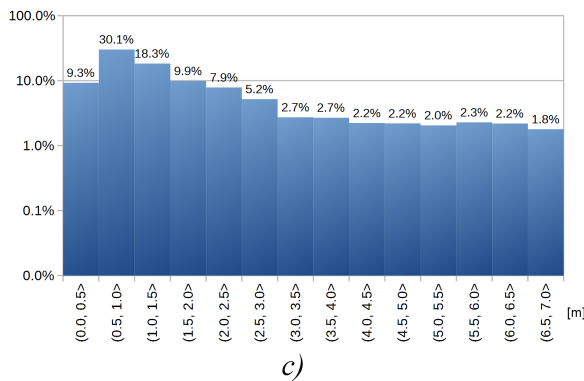
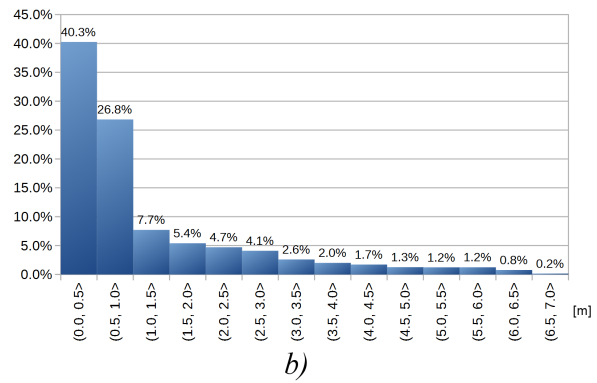
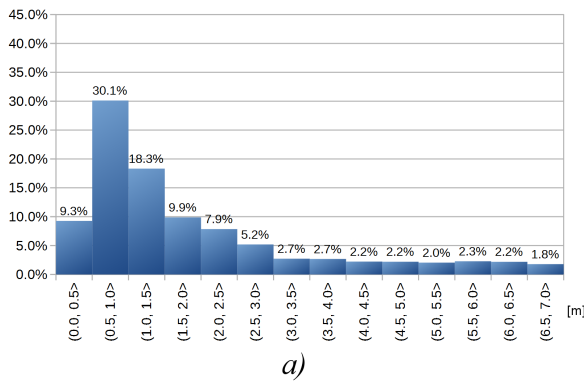
Rozdzielczość przestrzenna pojedynczego sektora (XYZ) [m]	0,5 0,5 2,0
Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki	TAK
Poziom rozmocia	2
Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki	2
Opcja trybu hybrydowego	TAK

Na Rys. 71 przedstawiono: wyniki symulowanego skanowania z wysokości 300 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model R1 (b), te same wyniki przetworzone przez algorytm kostki (c) oraz stworzony na ich podstawie model R2 (d), a także model referencyjny W (e), który w tym przypadku jest także modelem wejściowym dla procesu symulacji skanowania. Ze względu na niższą rozdzielczość przestrzenną wyniku symulowanego skaningu, reprezentowane przez niego szczegóły są bardzo słabo widoczne na modelu R1. Model R2 natomiast w dokładniejszy sposób przedstawia wszelkie nierówności i ostre krawędzie, co jest szczególnie zauważalne w jego dolnych partiach.



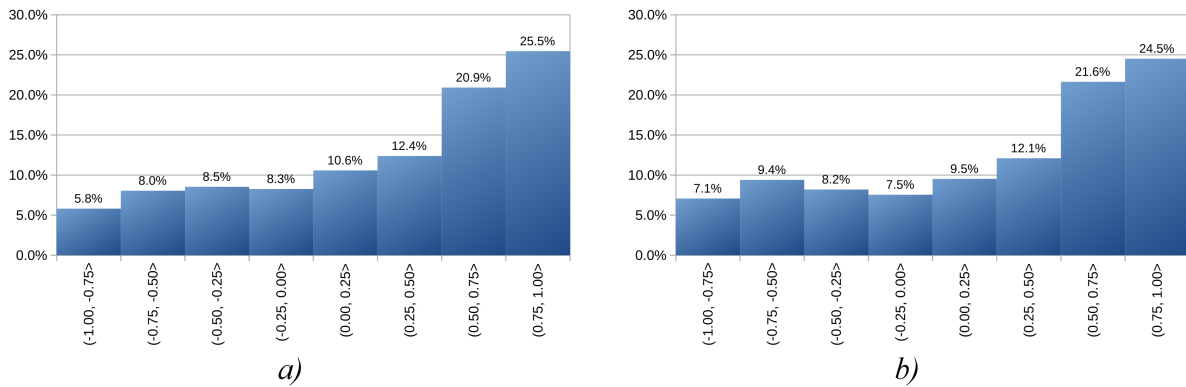
Rys. 71. Wyniki symulowanego skanowania Elizabeth Tower z wysokości 300 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e)

Na Rys. 72 przedstawiono rozkłady odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami W a odpowiadającymi im wierzchołkami w modelach zrekonstruowanych. Rys. 72a) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R1, natomiast Rys. 72b) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R2. Dodatkowo na Rys. 72c) i Rys. 72d) przedstawiono te same wyniki, ale z zastosowaniem skali logarytmicznej na osi odległości. Warto zwrócić uwagę na to, że w **modelu R2 aż 40,3% jego wierzchołków znajduje się w odległości nie większej niż 50 cm od odpowiadających im wierzchołków w modelu W, podczas gdy w R1 tylko 9,3% jego wierzchołków spełnia to kryterium.**



Rys. 72. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Elizabeth Tower zeskanowany metodą symulowaną z wysokości 300 m. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarymicznej

Na Rys. 73 porównano otrzymane modele 3D z modelem wzorcowym pod względem zgodności normalnych ich wierzchołków z normalnymi wierzchołków modelu W. Rys. 73a) przedstawia rozkłady wartości iloczynu skalarnego wektorów normalnych dla wierzchołków W i wektorów normalnych odpowiadających im wierzchołków R1, natomiast Rys. 73b) przedstawia analogiczne wyniki dla modeli W i R2. W tym przypadku wyniki otrzymane dla R1 są w niewielkim stopniu lepsze od wyników uzyskanych dla R2.



Rys. 73. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków $R1$ (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków $R2$ (b), dla modelu Elizabeth Tower zeskanowanego metodą symulowaną na wysokości 300 m

W Tab. 12 przedstawiono zestawienie najważniejszych kryteriów określających jakość modelu $R1$ („rekonstrukcja z danych oryginalnych $R1$ ”) oraz modelu $R2$ („rekonstrukcja z danych przetworzonych $R2$ ”). Tym razem przewaga $R2$ nad $R1$ jest zauważalnie mniejsza niż w przypadku danych pochodzących z symulacji skanowania wykonanej dla niższej wysokości. **Jest to niewątpliwie spowodowane faktem, że w tym przypadku pierwotna chmura punktów cechuje się w miarę stałym zagęszczeniem punktów, przez co algorytm kostki, którego działanie polega na zwiększaniu regularności struktury przestrzennej wejściowych danych, nie był w stanie poprawić wyników w sposób tak znaczący jak w przypadku symulowanego skaningu z mniejszej wysokości.**

Tab. 12. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 300 m

	Rekonstrukcja z danych oryginalnych $R1$	Rekonstrukcja z danych przetworzonych $R2$
Odległość najmniejsza [cm]	1.85	0.67
Odległość średnia [cm]	209.21	123.03
Odległość największa [m]	8.78	6.30
Dokładność pozycji wierzchołków przy progu jednego metra	39.39%	67.10%
Średnia wartość iloczynu skalarnego normalnych dla par wierzchołków	0.27	0.25
Dokładność normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75	25.46%	24.52%

Liczba wynikowych jednospójnych brył	1	2
--------------------------------------	---	---

Jako ostatni zestaw testowy wykorzystano wyniki symulowanego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła, zawierające 11105 punktów. W Tab. 13 przedstawiono wartości poszczególnych parametrów wejściowych przekazanych do algorytmu kostki. Wartości te są prawie identyczne jak w przypadku Bazyliki NMP w Gdańsku, z tą różnicą, że przyjęto tutaj mniejsze rozmiary dla pojedynczego sektora ze względu na gęstsze rozłożenie punktów na osi Z. W tym przypadku wejściowa chmura punktów, która została otrzymana na podstawie modelu o wysokości wynoszącej około 37 metrów, została podzielona na 38 poziomów wysokości, tworząc w ten sposób zbiór o liczebności 72669 punktów.

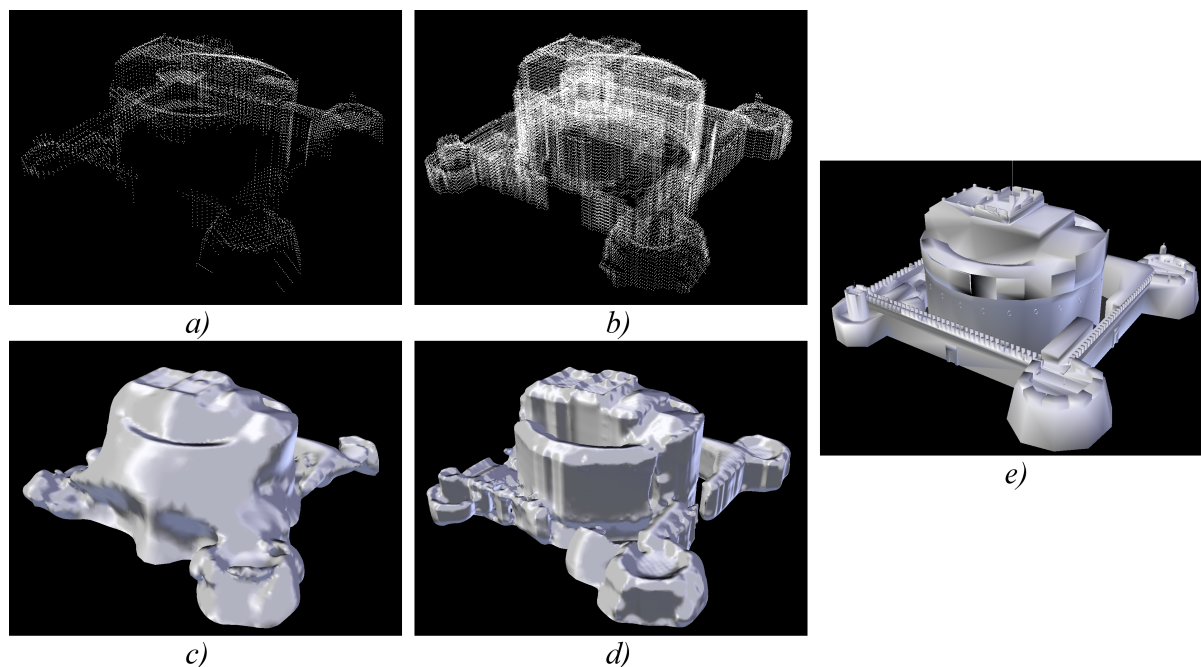
Tab. 13. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła

Rozdzielczość przestrzenna pojedynczego sektora (XYZ) [m]	0,5 0,5 1,0
Opcja wypełniania pustych elementów zbioru w obrębie pojedynczego poziomu siatki	TAK
Poziom rozmycia	2
Poziom wypełniania pustych elementów pomiędzy poszczególnymi poziomami siatki	20
Opcja trybu hybrydowego	TAK

Na Rys. 74 przedstawiono: wyniki symulowanego skanowania (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model R1 (b), te same wyniki przetworzone przez algorytm kostki (c) oraz stworzony na ich podstawie model R2 (d), a także model referencyjny W (e), który w tym przypadku jest także modelem wejściowym dla procesu symulacji skanowania. Już na pierwszy rzut oka widać, że model R2 w znacznie dokładniejszy sposób odzwierciedla kształt pionowych ścian, które w R1 zlewają się z sąsiadującymi obiektami.

Na Rys. 75 przedstawiono rozkłady odległości pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami W a odpowiadającymi im wierzchołkami w modelach zrekonstruowanych. Rys. 75a) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R1, natomiast Rys. 75b) przedstawia histogram odległości pomiędzy wierzchołkami W oraz R2. Dodatkowo na Rys. 75c) i Rys. 75d) przedstawiono te same wyniki, ale z zastosowaniem skali logarytmicznej na osi odległości.. W tym przypadku model R2 przewyższa R1 pod niemal każdym względem. Szczególnie warto zwrócić uwagę na to, że w R2 aż 91,4% jego

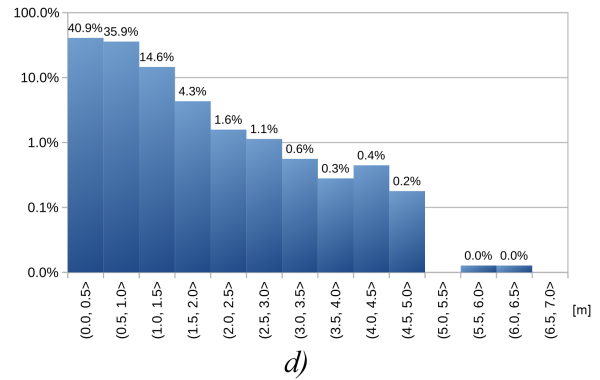
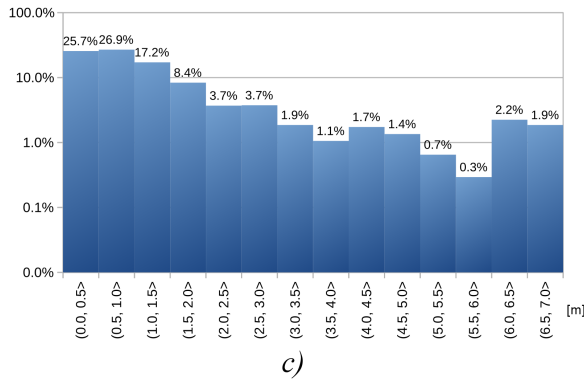
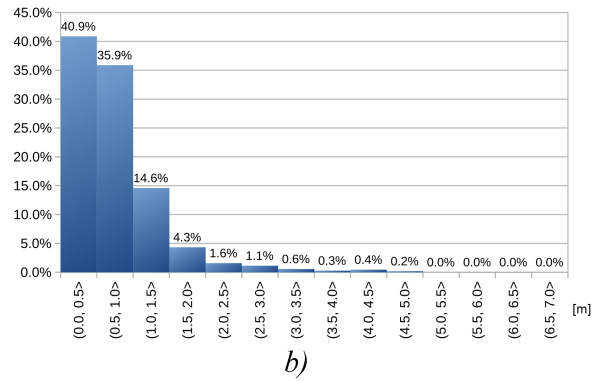
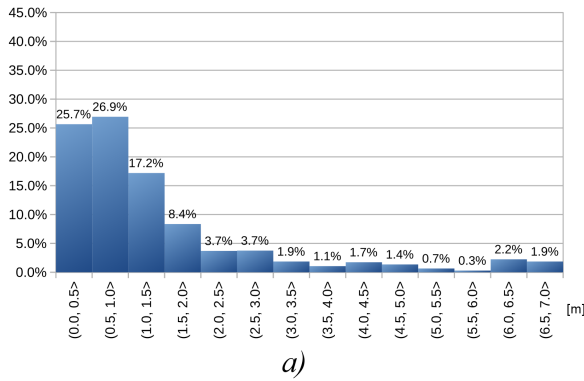
wierzchołków znajduje się w odległości nie większej niż 1,5 m od wierzchołków wzorcowych w modelu W, podczas gdy w R1 tylko 69,8% jego wierzchołków spełnia to kryterium. Ponadto, w R2 rzadziej występują takie sytuacje, w których jego wierzchołki znajdują się dalej niż 5 m od ich wzorcowych odpowiedników.



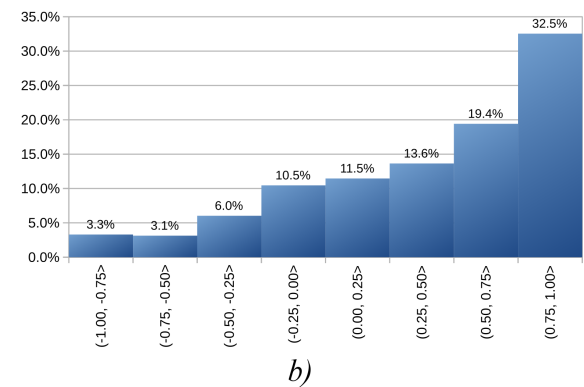
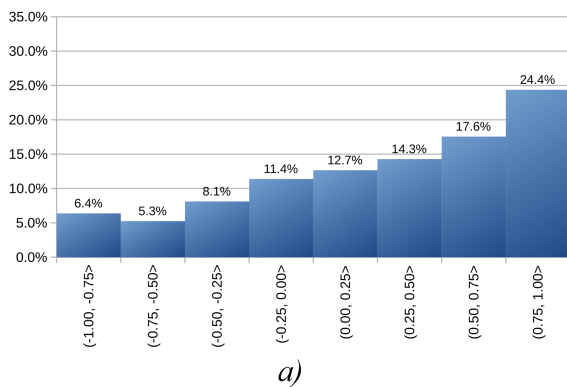
Rys. 74. Dane przedstawiające wyniki symulowanego skanowania Zamku Świętego Anioła (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e)

Na Rys. 76 porównano otrzymane modele 3D z modelem wzorcowym pod względem zgodności normalnych ich wierzchołków z normalnymi wierzchołków modelu W. Rys. 76a) przedstawia rozkłady wartości iloczynu skalarnego wektorów normalnych dla wierzchołków W i wektorów normalnych odpowiadających im wierzchołków R1, natomiast Rys. 76b) przedstawia analogiczne wyniki dla modeli W i R2. W tym przypadku wyniki otrzymane dla R2 są ogólnie lepsze od wyników uzyskanych dla R1, zwłaszcza dla przedziału wartości $(0,75, 1,0>$.

W Tab. 14 przedstawiono zestawienie najważniejszych kryteriów określających jakość modelu R1 („rekonstrukcja z danych oryginalnych R1”) oraz modelu R2 („rekonstrukcja z danych przetworzonych R2”). Tym razem **dla modelu R2 uzyskano lepsze wyniki niż dla R1 we wszystkich kategoriach**. Największa przewaga R2 nad R1 jest widoczna w przypadku średniej odległości wierzchołków od wzorcowych wierzchołków modelu W, gdzie wynik uzyskany dla R2 jest ok. 50 razy lepszy od R1.



Rys. 75. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Zamku Świętego Anioła zeskanowany metodą symulowaną. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej

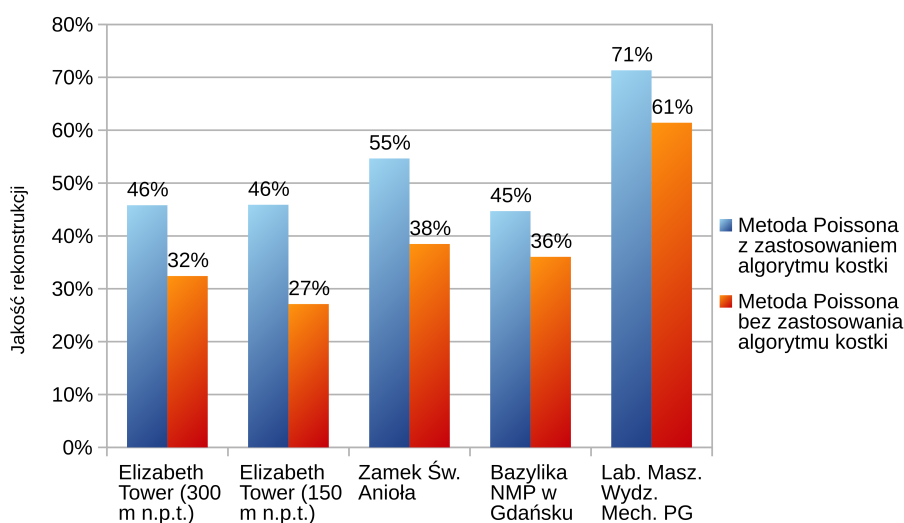


Rys. 76. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Zamku Świętego Anioła zeskanowanego metodą symulowaną

Tab. 14. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła

	Rekonstrukcja z danych oryginalnych R1	Rekonstrukcja z danych przetworzonych R2
Odległość najmniejsza [cm]	4.03	0.78
Odległość średnia [cm]	165.85	3.31
Odległość największa [m]	12.68	11.72
Dokładność pozycji wierzchołków przy progu jednego metra	52.60%	76.77%
Średnia wartość iloczynu skalarnego normalnych dla par wierzchołków	0.27	0.40
Dokładność normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75	24.37%	32.54%
Liczba wynikowych jednopójnych brył	4	3

Podsumowując, dla przedstawionych przypadków ogólna jakość modeli odtworzonych z wykorzystaniem algorytmu kostki jest zdecydowanie wyższa niż w przypadku modeli zrekonstruowanych bez jego użycia. Gdyby wprowadzić dodatkową wartość **jakość rekonstrukcji**, stanowiącą średnią arytmetyczną z wartości *dokładności pozycji wierzchołków przy progu jednego metra* oraz *dokładności normalnych dla wierzchołków przy progu 0.75*, wówczas podsumowanie wyników jakości poszczególnych modeli można by wyrazić za pomocą Rys. 77.



Rys. 77. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na jakość modeli odtworzonych za pomocą metody Poissona

5.3. Wyniki optymalizacji złożoności modeli

W niniejszym podrozdziale przedstawione zostały wyniki działania procedur zmniejszających złożoność wybranych modeli przedstawionych w rozdziałach 5.1 oraz 5.2. Uproszczenie modeli zostało wykonane za pomocą programu Fast-Quadric-Mesh-Simplification. Wyniki zostały uzyskane z wykorzystaniem różnych wartości parametru *ratio*, określającego poziom redukcji liczby trójkątów w modelu (np. wartość *ratio* równa 0.1 oznacza, że liczba trójkątów w modelu uproszczonym będzie w przybliżeniu równa około 10% liczby trójkątów w modelu wejściowym). Prezentowane tutaj wyniki zostały pogrupowane w trzy różne zestawy modeli, różniące się zastosowanym poziomem redukcji, gdzie użyto odpowiednio następujących wartości parametru *ratio*: 0.1 (redukcja dziesięciokrotna), 0.01 (redukcja stukrotna) oraz 0.005 (redukcja dwustukrotna). Dokładne liczby otrzymanych trójkątów dla poszczególnych modeli przed i po uproszczeniu zostały zamieszczone w Tab. 15. Jako że w grafice trójwymiarowej poziom złożoności modeli jest często wyrażany przez ich liczbę wierzchołków, taka informacja została również umieszczona w Tab. 15.

Tab. 15. Poziomy złożoności poszczególnych modeli przed i po procesie ich uproszczenia, przy zastosowaniu trzech poziomów redukcji ich liczby trójkątów: dziesięciokrotnej, stukrotnej oraz dwustukrotnej

Nazwa obiektu	Liczba trójkątów		Liczba wierzchołków	
	Model złożony	Model uproszczony	Model złożony	Model uproszczony
Kampus PG	372 578	37 229	198 293	21 341
Wrak statku Cleona	4 153	414	2 150	227
Wrak holownika parowego	5 508	551	2 908	315
Bazylika NMP w Gdańsku	465 607	2 321	233 173	1 167
Lab. Masz. Wydz. Mech. PG	334 720	1 669	167 544	839
Elizabeth Tower (skanowanie na wysokości 150 m n.p.t.)	58 766	294	29 385	149
Elizabeth Tower (skanowanie na wysokości 300 m n.p.t.)	37 134	186	18 575	92
Zamek Św. Anioła	262 052	1 306	131 417	653

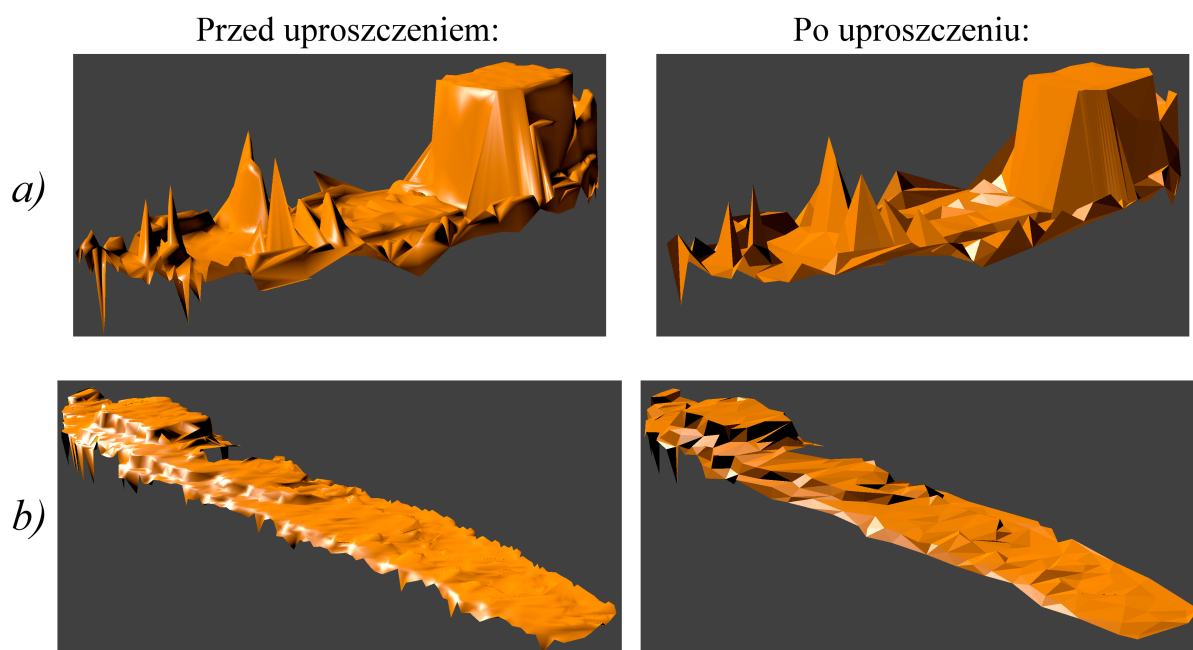
Pierwszy zestaw składa się z modelu podzielonego na kilkadziesiąt brył

reprezentujących budynki znajdujące się na terenie kampusu Politechniki Gdańskiej i jego bliskiej okolicy. Jako że bryły te cechują się stosunkowo niskim poziomem złożoności, zastosowano dla nich jedynie dziesięciokrotną redukcję ich liczby trójkątów. Na Rys. 78 przedstawiono trójwymiarowy widok pojedynczych budynków kampusu PG. Jak łatwo zauważyć, zastosowanie uproszczenia modelu pozwoliło na dodatkowe wyrównanie krawędzi poszczególnych brył, jednocześnie bez usunięcia przy tym żadnych istotnych szczegółów występujących na dachach budynków.

Drugi zestaw danych składa się z modeli przedstawiających wraki dwóch statków, z czego oba zostały otrzymane poprzez zastosowanie zbliżonych do siebie procesów przetwarzania wejściowych chmur punktów, wliczając w to oddzielenie tych obiektów od dna morskiego oraz usunięcie ich masztów. Na Rys. 79a) przedstawiono modele reprezentujące wrak statku Cleona (leżącego na dnie Zatoki Oslofjorden), natomiast na Rys. 79b) pokazano modele przedstawiające wrak holownika parowego (leżącego na dnie Zatoki Gdańskiej). W tym przypadku dla obu modeli zastosowano stukrotną redukcję liczby trójkątów. O ile w przypadku holownika parowego (Rys. 79b) redukcja zdaje się wpływać pozytywnie na ogólny kształt jego modelu, tak w przypadku wraku Cleona (Rys. 79a) uproszczenie wprowadza pewne zniekształcenia w jego modelu, szczególnie w obrębie nadbudówki statku.



Rys. 78. Modele budynków kampusu Politechniki Gdańskiej przed i po uproszczeniu (z zastosowaniem dziesięciokrotnej redukcji liczby trójkątów)

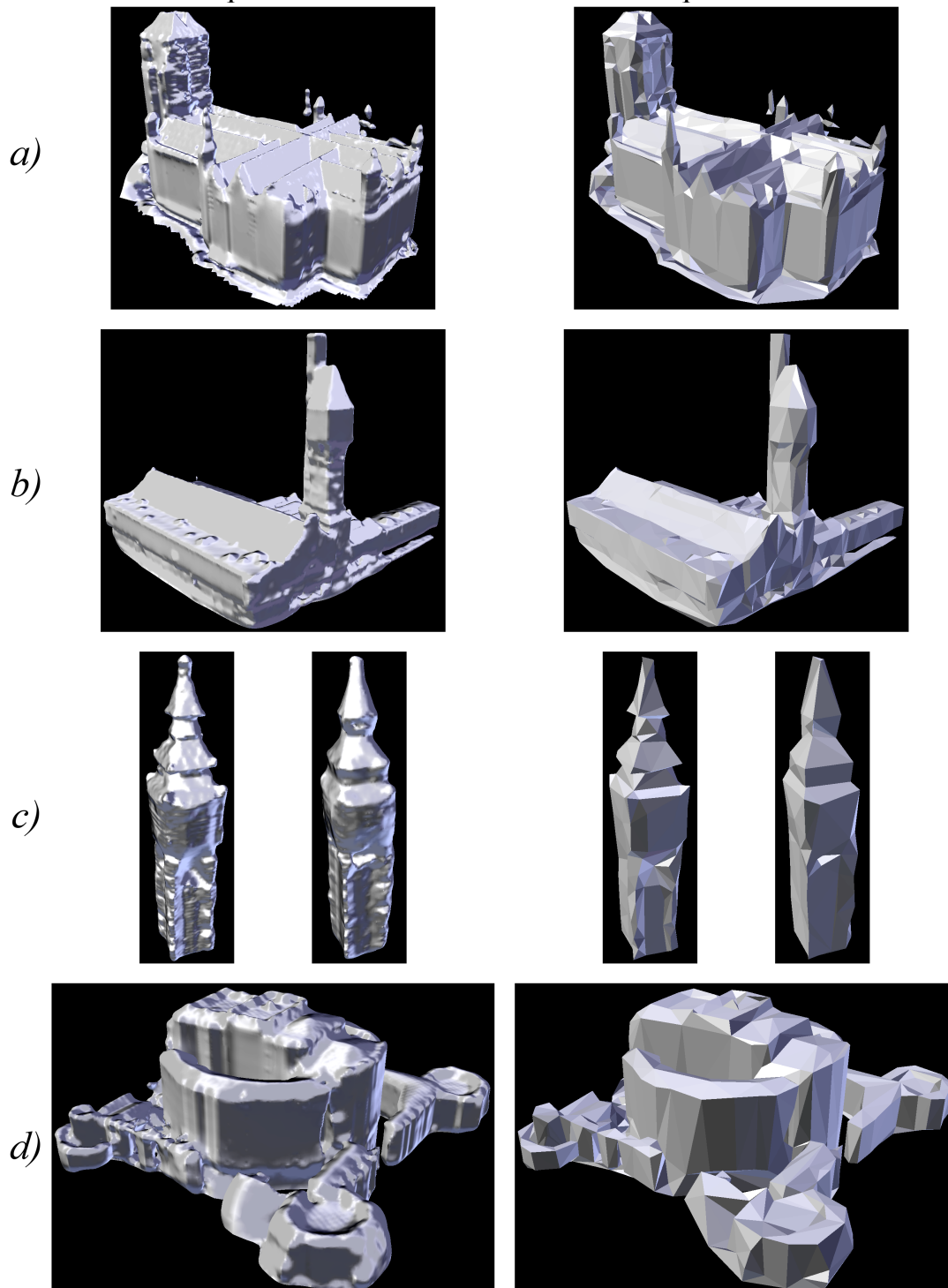


Rys. 79. Modele wraków Cleona (a) i holownika parowego (b) przed u po uproszczeniu, z zastosowaniem stukrotnej redukcji liczby trójkątów

Ostatni zestaw danych reprezentuje modele budynków odtworzone za pomocą algorytmu kostki i metody Poissona. Ze względu na wysoki poziom złożoności zrekonstruowanych brył, zastosowano dla nich aż dwustukrotną redukcję liczby ich trójkątów. W przypadku modelu Bazyliki NMP w Gdańsku (Rys. 80a) uproszczona bryła posiada wszystkie istotne informacje zawarte w oryginalnym modelu, przy wygładzeniu jednocześnie jego dolnych krawędzi. W przypadku modelu Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (Rys. 80b) wersja uproszczona dobrze odzwierciedla ogólny kształt obiektu, aczkolwiek można tutaj dostrzec niewielką utratę szczegółów w obrębie dachów oraz wieży budynku. Na Rys. 80c) przedstawiono odpowiednio cztery modele reprezentujące Elizabeth Tower: pierwsze dwa zostały uzyskane na podstawie symulowanego skaningu z wysokości odpowiednio 150 m n.p.t. oraz 300 m n.p.t., natomiast pozostałe dwa modele stanowią ich wersje uproszczone. W tym przypadku modele uproszczone ponownie stanowią dobrą reprezentację ogólnego kształtu oryginalnych obiektów, jednak tym razem można dostrzec również znaczne zmniejszenie ogólnej liczby reprezentowanych szczegółów. Na Rys. 80d) przedstawiono modele reprezentujące Zamek Świętego Anioła, gdzie model uproszczony dość dobrze odzwierciedla ogólną rzeźbę budynku, jednocześnie zachowując wszelkie istotne szczegóły, aczkolwiek ze względu na owalny kształt oryginalnego obiektu, niektóre ściany uproszczonego modelu są zniekształcone (mniej gładkie) w porównaniu z modelem oryginalnym.

Przed uproszczeniem:

Po uproszczeniu:



Rys. 80. Efekt uproszczenia modeli reprezentujących: Bazylikę NMP w Gdańsku (a), Laboratorium Maszynowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (b), Elizabeth Tower (c) oraz Zamek Świętego Anioła (d), z zastosowaniem dwustukrotnej redukcji liczby trójkątów

5.4. Testy wydajności zaproponowanych metod przetwarzania

W poniższym podrozdziale przedstawiono testy wydajności zaproponowanych procedur przetwarzania danych otrzymanych zarówno z sondowania dna morskiego jak i ze skanowania terenu za pomocą systemów LiDAR. Wydajność powyższych procedur została przetestowana dla zbiorów danych opisanych w podrozdziale 5.3. Testy zostały przeprowadzone na komputerze stacjonarnym o następujących parametrach:

- Procesor: Intel Core i7-8700K 3.70Ghz
- Dysk HDD: Toshiba HDWQ140 7200 rpm
- System operacyjny: Windows 10 Education 64-bitowy

W Tab. 16 opisano wydajność metod przetwarzania omówionych w rozdziałach 4.3 i 4.4 oraz algorytmów triangulacji przedstawionych w rozdziale 4.6.2. W tabeli zamieszczono liczbę punktów poszczególnych zbiorów danych, całkowity czas ich przetwarzania (obejmujący zarówno procesy wstępnego przetwarzania, klasyfikacji, jak i rekonstrukcji kształtu), a także maksymalne zużycie pamięci RAM.

Tab. 16. Wydajność metod przetwarzania danych obejmujących rekonstrukcję kształtu w przestrzeni dwuwymiarowej z wykorzystaniem algorytmu siatki

Nazwa obiektu	Liczba punktów	Czas przetwarzania [s]	Zużycie pamięci [MB]
Wrak holownika parowego	21 440	0.19	134.4
Wrak statku Cleona	28 922	0.53	136.6
Kampus PG	5 516 640	27.49	1 479.5

Jak można zauważyć, w przypadku niewielkich zbiorów danych zawierających po kilkadziesiąt tysięcy punktów, możliwe jest ich całkowite przetworzenie oraz odtworzenie reprezentowanych przez nie kształtów za pomocą algorytmu siatki w czasie krótszym niż jedna sekunda. W tym miejscu warto zaznaczyć, że wykorzystane implementacje powyższych metod przetwarzania nie zawsze są optymalne, a ich wydajność mogłaby zostać istotnie zwiększona poprzez równoległe wykonywanie obliczeń na większej liczbie rdzeni procesora. W przypadku zoptymalizowania algorytmów i zrównoleglenia odpowiednich obliczeń, możliwe byłoby nawet kilkukrotne zmniejszenie całkowitego czasu przetwarzania

danych, dzięki czemu zaproponowane algorytmy mogłyby działać w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

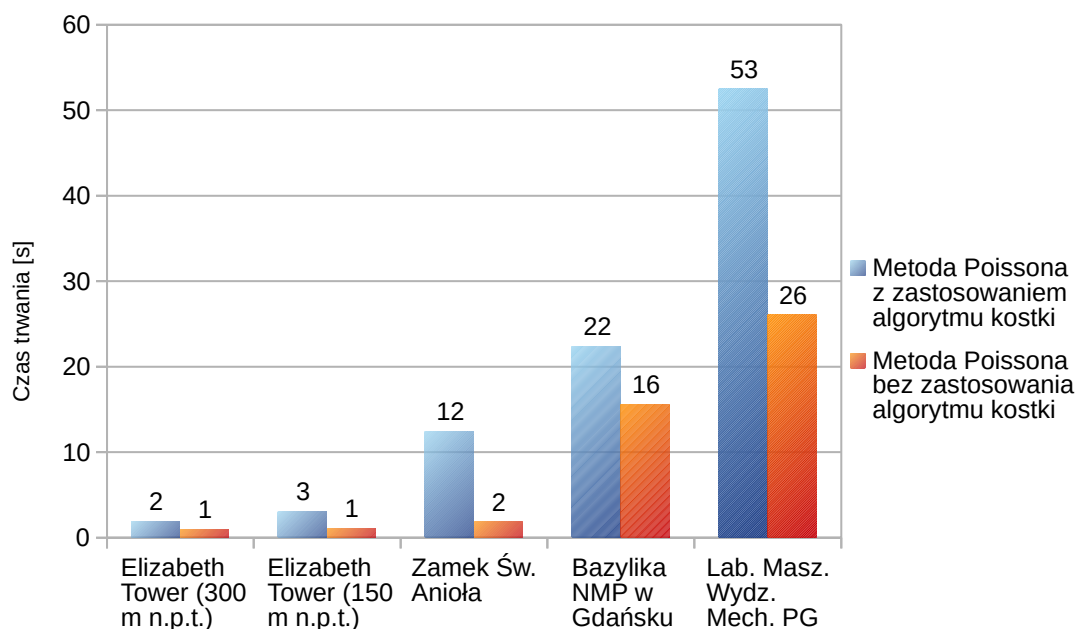
W Tab. 17 scharakteryzowano wydajność algorytmu kostki omówionego w rozdziale 4.5, a także metody Poissona zastosowanej dla przetworzonych chmur punktów. W tabeli zamieszczono liczbę punktów poszczególnych zbiorów danych, wydajność algorytmu kostki zastosowanego w celu konwersji oryginalnych chmur punktów do postaci regularnej, trójwymiarowej siatki punktów, a także wydajność wykorzystanej implementacji metody Poissona (dostępnej w programie MeshLab [82]), zastosowanej dla przetworzonych zbiorów danych. Oprócz tego, na Rys. 81 oraz Rys. 82 porównano wpływ zastosowania algorytmu kostki na całkowity czas trwania oraz maksymalne zużycie pamięci procesu przetwarzania danych i rekonstrukcji modelu.

Tab. 17. Wydajność metod przetwarzania danych obejmujących rekonstrukcję kształtu w przestrzeni trójwymiarowej z wykorzystaniem algorytmu kostki

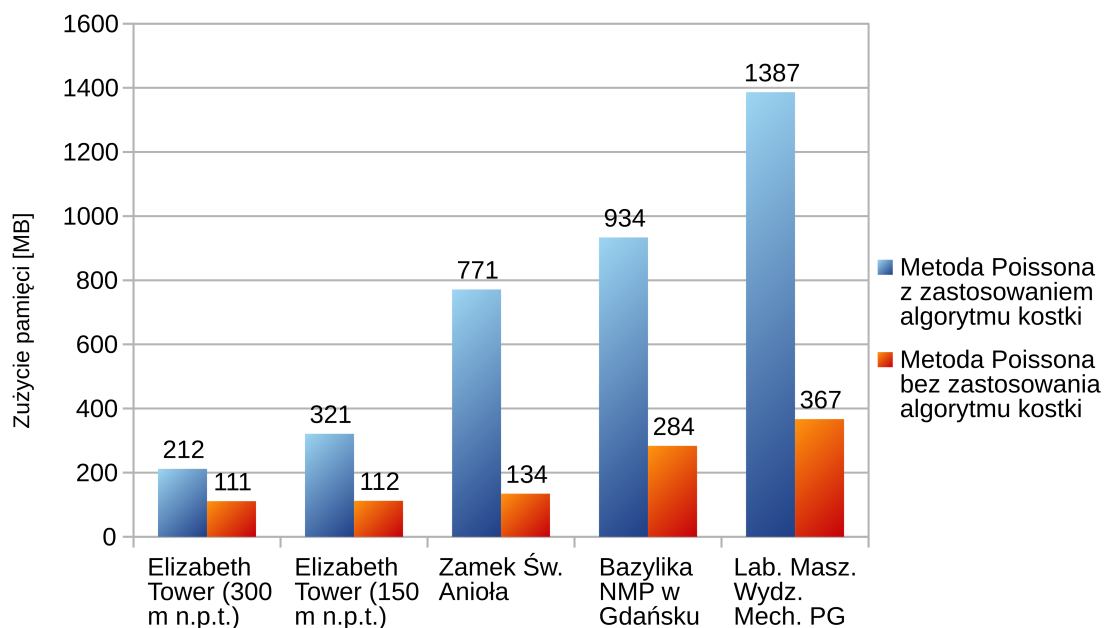
Nazwa obiektu	Liczba punktów	Wydajność algorytmu kostki		Wydajność metody Poissona	
		Czas trwania [s]	Zużycie pamięci [MB]	Czas trwania [s]	Zużycie pamięci [MB]
Elizabeth Tower (skanowanie na wysokości 300 m n.p.t.)	1 096	0.33	75.35	1.6	136.4
Elizabeth Tower (skanowanie na wysokości 150 m n.p.t.)	2 090	0.80	158.07	2.3	163.1
Zamek Św. Anioła	11 105	4.88	549.44	7.6	221.9
Bazylika NMP w Gdańsku	69 142	5.92	596.75	16.5	336.8
Lab. Masz. Wydz. Mech. PG	89 485	29.85	951.53	22.7	435.0

Jak można zaobserwować, czas potrzebny na konwersję danych za pomocą algorytmu kostki jest zwykle znacznie krótszy niż czas potrzebny na odtworzenie kształtu modelu za pomocą metody Poissona. Z drugiej strony zastosowanie algorytmu kostki powoduje nawet dwukrotne zwiększenie zapotrzebowania na ilość pamięci RAM, niemniej jednak w testowanych scenariuszach wymagana ilość pamięci nie przekraczała jednego gigabajta.

Podsumowując, zastosowanie algorytmu kostki powoduje pewne zwiększenie czasu przetwarzania danych oraz ilości wymaganej pamięci, jednak biorąc pod uwagę zalety wynikające z jego wykorzystania (rozdział 5.2), wymagania te wydają się być akceptowalne dla większości zastosowań.



Rys. 81. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na całkowity czas ich przetwarzania oraz rekonstrukcji modeli za pomocą metody Poissona



Rys. 82. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na ilość zużytej pamięci potrzebnej do ich przetworzenia oraz rekonstrukcji modeli za pomocą metody Poissona

6. Opracowane i wykorzystane narzędzia

W pracy wykorzystano różnorakie dostępne narzędzia ułatwiające osiągnięcie zamierzonego celu. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć aplikację MeshLab, która udostępnia gotowe implementacje powszechnie znanych algorytmów służących do automatycznej rekonstrukcji kształtów z chmur punktów, takich jak metoda Poissona czy algorytm Ball-Pivoting. Oprócz tego, w pracy skorzystano z aplikacji Qhull [83] w celu odtworzenia kształtu wybranych zbiorów punktów za pomocą triangulacji Delaunaya. Ponadto, istotnym wykorzystanym narzędziem był program Blender do tworzenia złożonych wizualizacji trójwymiarowych, który w niniejszej pracy był wielokrotnie użyty w celu przygotowywania i obróbki danych testowych, ich konwersji pomiędzy różnymi formatami zapisu, a także przygotowania wizualizacji wyników końcowych.

Oprócz tego, wiele nowych narzędzi powstało specjalnie na potrzeby niniejszej pracy. Ze względu na charakter pracy, znaczna ilość czasu poświęconego na jej wykonanie obejmowała następujące prace programistyczne:

- implementację wszystkich zaproponowanych algorytmów przetwarzania danych wejściowych,
- stworzenie programowalnego Symulatora Skanera w celu wygenerowania dodatkowych zestawów danych testowych,
- przygotowanie programu dokonującego oceny jakości poszczególnych metod rekonstrukcji kształtu na podstawie wykorzystanych metryk,
- stworzenie zestawu skryptów parsujących zawartość plików binarnych zawierających wyniki pomiarowe skanowania laserowego i sondowania hydroakustycznego,
- przygotowanie mechanizmów wizualizacji pośrednich wyników przetwarzania danych wejściowych,
- oprogramowanie innych, nie wymienionych w niniejszej pracy algorytmów testowych, które ostatecznie zostały zastąpione lepszymi rozwiązaniami.

Większość z ww. narzędzi powstałych w ramach niniejszej pracy zostało stworzonych w języku C++ z wykorzystaniem wieloplatformowych bibliotek dostępnych na zasadach open source, w szczególności silnika graficznego OGRE [84], użytego w celu wykonywania obliczeń pomocniczych związanych z generowaniem grafiki 3D. Pozostałe narzędzia zostały stworzone za pomocą języka Java oraz skryptów interpretowanych przez oprogramowanie

MATLAB i Octave.

7. Podsumowanie

7.1. Weryfikacja tezy pracy

Zautomatyzowana rekonstrukcja kształtu powierzchni reprezentowanych przez chmury punktów jest zagadnieniem badanym od wielu lat. Pomimo tego, że w przeciągu ostatnich dwudziestu lat zaproponowano różne algorytmy pozwalające na odtworzenie coraz dokładniejszych modeli, osiągane za ich pomocą rezultaty są dalekie od satysfakcjonujących, jeżeli wejściowe zbiory punktów cechują się nieregularną strukturą przestrzenną, co jest częstym zjawiskiem w przypadku danych pochodzących z sondowania hydroakustycznego czy skaningu laserowego. W związku z powyższym, sformułowana teza pracy doktorskiej zakładała możliwość uzyskania dokładniejszych modeli badanych obiektów w porównaniu do wyników osiągniętych z użyciem znanych algorytmów, poprzez zastosowanie odpowiedniej kombinacji metod i technik przetwarzania danych wejściowych mających na celu zwiększenie ich poziomu regularności przed zastosowaniem faktycznego procesu odtwarzania kształtu reprezentowanych przez nie powierzchni.

W pracy wykorzystano kombinacje różnych sposobów przetwarzania danych przestrzennych, łącząc ze sobą techniki obejmujące m.in. redukcję zakłóceń, rasteryzację, wykrywanie obiektów, wypełnianie pustych obszarów, a także triangulację. Zaproponowane techniki zostały przetestowane dla wielu przypadków i źródeł, obejmujących dane reprezentujące obiekty pochodzące z różnych środowisk. Zastosowanie zróżnicowanych technik przetwarzania na poszczególnych etapach działania proponowanej metodyki ma pozytywny wpływ na kształt odtworzonych modeli, co zostało wykazane w odpowiednich rozdziałach pracy doktorskiej. Wynikowe modele, otrzymane z użyciem zaproponowanej kombinacji różnych metod przetwarzania, zostały szczegółowo porównane z modelami otrzymanymi za pomocą dotychczas stosowanych metod odtwarzania kształtu. Przedstawione wyniki zastosowania zaproponowanej metodyki pokazują, że wykorzystywane przez nią na różnych etapach procedury pozwalają na uzyskanie dokładniejszych trójwymiarowych modeli badanych obiektów w porównaniu do wyników osiągniętych z użyciem znanych algorytmów. Jednocześnie pokazano, iż możliwe jest następnie zmniejszenie złożoności otrzymanych modeli bez straty lub z niewielką stratą dokładności, przy użyciu istniejących algorytmów, takich jak Fast-Quadric-Mesh-Simplification.

Podsumowując, otrzymane wyniki zaprezentowane i przeanalizowane w pracy

potwierdzają słusność postawionej tezy niniejszej rozprawy.

7.2. Główne osiągnięcia pracy

Jak wskazano w rozdziale 1., głównym celem pracy było opracowanie nowej metodyki przetwarzania nieregularnych danych przestrzennych, która zgodnie z zaproponowaną tezą pracy umożliwiałaby poprawę otrzymywanych wyników w zakresie trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu reprezentowanych obiektów poprzez zastosowanie odpowiedniej kombinacji metod i technik przetwarzania danych wejściowych. Metody te zostały szczegółowo opisane w rozdziale 4. Drugim celem było przeprowadzenie weryfikacji zaproponowanej metodyki z użyciem różnorodnych danych, co pozwoliło na potwierdzenie słusności postawionej tezy. Przeprowadzone badania, których wyniki zostały przedstawione w rozdziale 5., uwzględniały wykonanie testów na danych pochodzących z wielu różnych źródeł wymienionych w rozdziale 3., pozyskanych za pomocą echosond wielowiązkowych, skanerów laserowych, a także symulowanych zbiorach punktów wygenerowanych za pomocą dedykowanej aplikacji stworzonej na potrzeby badań. Spośród zebranych danych testowych skupiono się przede wszystkim na odtwarzaniu kształtu powierzchni złożonych obiektów, takich jak budynki czy wraki statków, gdyż automatyczna rekonstrukcja ich modeli jest z reguły znacznie trudniejsza niż w przypadku danych opisujących kształt terenów niezurbanizowanych. Tam, gdzie było to możliwe, wyniki otrzymane za pomocą zaproponowanych metod zostały porównane z rezultatami uzyskanymi z wykorzystaniem znanych algorytmów wspomnianych w rozdziale 2., z użyciem przy tym zaproponowanych metryk, wzorowanej na istniejących rozwiązaniach polegających na porównywaniu wygenerowanych brył z modelami referencyjnymi. Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowane metody pozwalają na zauważalne poprawienie dokładności odwzorowania badanych obiektów za pomocą wygenerowanych modeli 3D względem obecnie stosowanych rozwiązań. Na szczególną uwagę zasługuje algorytm kostki, który przy odpowiednim doborze parametrów ma potencjał uniwersalnej metody wstępnego przetwarzania nieregularnych chmur punktów. W niektórych przypadkach modele odtworzone za pomocą zaproponowanych metod wykazują się nadmiernym poziomem złożoności, jednak jak wykazano w podrozdziałach 4.8 i 5.3, istnieje możliwość znacznego uproszczenia ich struktury przy jednoczesnym zachowaniu wszystkich istotnych szczegółów. Na potrzeby pracy stworzono także zestaw pomocniczych narzędzi wymienionych w rozdziale 6., bez których potwierdzenie słusności postawionej tezy byłoby niemożliwe.

Z powodu braku lepszych możliwości, na chwilę obecną różnorakie firmy i instytucje zajmujące się trójwymiarową wizualizacją terenu środowiska lądowego czy podwodnego często ograniczają się do stosowania prymitywnych metod rekonstrukcji kształtu opartych na mapach wysokościowych lub zamiast tego tworzone są ręcznie wykonane, uproszczone modele poszczególnych obiektów. Jedynie nieliczne podmioty mogą sobie pozwolić na pozyskanie danych przestrzennych mających wystarczająco dużo informacji, aby możliwe było na ich podstawie automatyczne wygenerowanie szczegółowych modeli o zadowalającej jakości. Zaproponowane w ramach niniejszej pracy metody przetwarzania danych wejściowych stwarzają potencjał automatycznego odtwarzania modeli o zbliżonym poziomie złożoności na podstawie danych niższej jakości. Zastosowanie zaproponowanych rozwiązań umożliwi nie tylko obniżenie kosztów uzyskania zadowalającej jakości reprezentacji i wizualizacji trójwymiarowych obiektów, ale w przyszłości mogą one posłużyć za inspirację do stworzenia jeszcze lepszej jakości rozwiązań opartych na zbliżonych metodach przetwarzania.

Do głównych osiągnięć i aspektów oryginalnych rozprawy należy zaliczyć:

1. Opracowanie metod rekonstrukcji trójwymiarowej z wykorzystaniem wyłącznie surowych zbiorów punktów. Opracowane algorytmy nie wymagają posiadania dodatkowych informacji, takich jak obrazy satelitarne czy gotowe zestawy brył.
2. Dużą elastyczność opracowanych metod, pozwalającą na stosowanie ich dla danych pochodzących z wielu różnych źródeł.
3. Możliwość dostosowania poziomu złożoności odtworzonych modeli w zależności od potrzeb. Oznacza to, że wynikowe bryły mogą reprezentować kształt pierwotnych obiektów z zadaną dokładnością, dostosowaną z jednej strony do możliwości różnego sprzętu i systemów, a z drugiej do wymagań dotyczących dalszego wykorzystania otrzymanych modeli.
4. Oparcie niektórych metod na znanych algorytmach, dla których istnieją publicznie dostępne implementacje.
5. Opracowanie zestawu metryk jakościowych do porównywania efektywności różnych metod odzyskiwania kształtów.
6. Możliwość otrzymania dokładniejszych modeli niż to było dotychczas możliwe.

Opracowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w wielu różnych dziedzinach życia. W przypadku danych pochodzących z sondowań

hydroakustycznych mogą one być wykorzystane na potrzeby takich działań jak:

- Mapowanie dna morskiego i obiektów podwodnych, wraz z ich identyfikacją. Na powierzchni odtworzonych modeli łatwiej jest dostrzec niektóre elementy i zniekształcenia, które mogą być niewidoczne w surowych danych mających postać chmur punktów [72].
- Archeologia morska, gdzie przygotowanie dokładniejszych modeli reprezentujących dużych rozmiarów obiekty może ułatwić zaplanowanie dalszych badań podwodnych, szczególnie w trudnym terenie.
- Prace hydrotechniczne, takie jak instalacja platform wiertniczych czy pogłębianie torów wodnych, ponieważ przydatna jest tutaj wiedza o jak najdokładniejszej rzeźbie dna.

W przypadku dziedzin, w których wykorzystywane są dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego, opracowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w takich pracach jak:

- Tworzenie trójwymiarowych modeli miast, gdzie odpowiednia adaptacja opisanych metod pozwoli na automatyczną generację uproszczonych modeli budynków.
- Wizualizacje przestrzenne obiektów architektonicznych, w tym w sieciowych systemach informacji przestrzennej [85], gdzie umiejętne wykorzystanie algorytmu kostki w wielu przypadkach umożliwi szybsze przygotowanie modeli wysokiej jakości.
- Generowanie Numerycznych Modeli Terenu (NMT) [86], gdzie pomocne mogą być przedstawione techniki rasteryzacji.

Jest rzeczą oczywistą, że zakres prac opisanych w rozprawie dalece nie wyczerpuje przedmiotowego zagadnienia i w wielu aspektach opracowane metody mogłyby zostać ulepszone. Przedmiotem dalszych prac mogłoby być:

- Usuwanie większej ilości zniekształceń występujących w surowych danych, wynikających ze sposobu ich pozyskiwania. Przykładem tutaj mogą być zniekształcenia w danych podwodnych spowodowane kołysaniem się statku, które nie zostały odpowiednio skompensowane w ramach procesu pomiarowego. Przypuszcza się, że powyższy problem można by zredukować poprzez odpowiednie zastosowanie analizy Fouriera.
- Stworzenie dedykowanej metody odtwarzania kształtu dostosowanej do danych

przetworzonych za pomocą algorytmu kostki. Dedykowana metoda rekonstrukcji mogłaby np. przyjmować różne wagi dla poszczególnych elementów odtwarzanego modelu w zależności od tego czy reprezentują one punkty istniejące w pierwotnych danych czy też punkty dodane podczas ich przetwarzania.

- Zastosowanie odpowiednich algorytmów wykrywania wzorców w danych pierwotnych, które pozwoliłyby na wykrycie konkretnych rodzajów obiektów i zastosowanie dla nich dedykowanych procedur ich przetwarzania, przyczyniając się w ten sposób do otrzymania dokładniejszych modeli końcowych.
- Poprawa działania niektórych procedur wchodzących w skład zaproponowanych algorytmów przetwarzania danych. Dobrym przykładem może być zaproponowanie metody odtwarzania kształtu masztów wraków statków, które w opisanej metodyce są w dużej części pomijane ze względu na stosunkowo małą ilość danych opisujących maszty w danych wejściowych.
- Weryfikacja zaproponowanego podejścia na większym i jeszcze bardziej zróżnicowanym zbiorze danych pomiarowych, obejmującym dane pochodzące z bardziej zróżnicowanych środowisk, a także pozyskanych za pomocą innych rodzajów urządzeń.

Słownik pojęć

Chmura punktów – nieuporządkowany zbiór punktów umieszczonych w dwu- lub trójwymiarowej przestrzeni, stanowiący uproszczoną reprezentację kształtu danego obiektu.

Echosonda – urządzenie służące do badania środowiska akwenów wodnych, wykorzystujące w tym celu emisję sygnałów akustycznych i odbiór powstających ech.

Georeferencja – proces przypisywania danych (obszaru, modelu obiektu) zawierających informacje o położeniu do konkretnego układu współrzędnych przestrzennych, np. geograficznych lub kartograficznych.

LiDAR (ang. *Light Detection And Ranging*) – technologia badania powierzchni obiektów za pomocą silnych impulsów światła o konkretnej długości fal, wysyłanych w określonym kierunku.

Mapa wysokości (ang. *heightmap*) – obraz rastrowy, w którym wartość każdego piksela reprezentuje wysokość terenu w danym punkcie.

Normalna – wektor jednostkowy prostopadły do powierzchni lub stycznej do powierzchni w danym miejscu, służący m.in. do wyznaczania jej poprawnego cieniowania.

Normalna dla wierzchołka sieci wielościennej – średnia normalnych do powierzchni sąsiadujących z wierzchołkiem.

Shape from shading – technika wyznaczania normalnych oraz trójwymiarowego kształtu powierzchni na podstawie informacji o jej oświetleniu.

TIN (ang. *triangulated irregular network*) – reprezentacja rzeźby terenu lub innego geopola ciągłego $z = f(x, y)$ za pomocą nieregularnej sieci trójkątów.

Triangulacja – przekształcenie chmury punktów do postaci sieci trójkątów.

Wykaz oznaczeń

- A, B – punkty będące najbliższymi nieusuniętymi sąsiadami punktu P
- A_i, B_i, P_i – indeksy tablicowe punktów A, B i P w tablicy
- A_h, B_h – wysokości punktów A i B
- $A_i(t)$ – obwiednia sygnału i -tego przetwornika, wolno zmienna w odniesieniu do f_0
- $A_{i\text{odb}}(t)$ – przebieg amplitudy sygnału odbieranego przez i -ty przetwornik, wolno zmienny w odniesieniu do f_0
- c – prędkość dźwięku w ośrodku wodnym
- f_0 – częstotliwość pracy sonaru
- inf – dolna granica dopuszczalnych różnic głębokości
- j – jednostka urojona
- K_{li} – najliczniej występująca klasa w sektorze S_i
- P – pojedynczy punkt dodany do przetwarzanej chmury punktów
- P_j – pojedynczy punkt należący do sektora S_i
- P_h – wysokość wygenerowanego punktu P
- R – zrekonstruowany model danego obiektu
- $R1$ – model zrekonstruowany na podstawie nieprzetworzonych danych
- $R2$ – model zrekonstruowany na podstawie danych przetworzonych przez algorytm kostki
- $R_{\bar{s}r}$ – średnia arytmetyczna różnic głębokości lub wysokości
- sup – górna granica dopuszczalnych różnic głębokości
- S_i – aktualnie przetwarzany sektor w zbiorze danych
- $S_{i\text{odb}}$ – sygnał akustyczny zarejestrowany przez i -ty przetwornik
- T_0 – okres obwiedni
- w_i – wagi stosowane w celu wzmocnienia $S_{i\text{odb}}$
- W – model wzorcowy danego obiektu

- $y_e(t)$ – sygnał obwiedni
- $z(P_j)$ – wysokości punktów P_j
- Z_{S_i} – wartość pojedynczego piksela w wynikowym zbiorze danych, stanowiąca średnią wysokość wszystkich punktów przypisanych do odpowiadającego mu sektora S_i
- $\Phi_{i\text{odb}}(t)$ – przebieg fazy sygnału odbieranego przez i -ty przetwornik, wolno zmienny w odniesieniu do f_0
- θ_{odb} – kąt fali odbieranej, w płaszczyźnie prostopadłej do toru przemieszczania się jednostki pływającej
- λ – długość generowanej fali hydroakustycznej

Bibliografia

- [1] Moisan E, Charbonnier P, Foucher P, Grussenmeyer P, Guillemain S, Koehl M. Adjustment of Sonar and Laser Acquisition Data for Building the 3D Reference Model of a Canal Tunnel. *Sensors*. 11 grudzień 2015;15(12):31180–204.
- [2] Vaaja M, Kukko A, Kaartinen H, Kurkela M, Kasvi E, Flener C, i in. Data processing and quality evaluation of a boat-based mobile laser scanning system. *Sensors (Basel)*. 17 wrzesień 2013;13(9):12497–515.
- [3] Bikonis K, Moszyński M, Stepnowski A. Submerged object imaging using virtual reality modeling language. *International Congress on The Application of Recent Advances in Underwater Detection and Survey Techniques to Underwater Archeology*. 2004;215–20.
- [4] Wang Z, Schenk T. Building extraction and reconstruction from lidar data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33B3/2; Part 3*. 2000;958–64.
- [5] Demkowicz J, Bikonis K. Instalacja i wstępna analiza danych batymetrycznych pochodzących z echosondy wielowiązkowej. *Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne*. 2005;T. 7:495–502.
- [6] Łubniewski Z, Bruniecki K. Seafloor Characterisation and Imaging Using Multibeam Sonar Data. W: *Acoustical Imaging* [Internet]. Springer, Dordrecht; 2012 [cytowane 25 czerwiec 2018]. s. 437–45. (Acoustical Imaging). Dostępne na: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2619-2_41
- [7] Calder BR, Mayer LA. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* [Internet]. 1 czerwiec 2003 [cytowane 28 listopad 2018];4(6). Dostępne na: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002GC000486>
- [8] Hughes Clarke JE, Mayer LA, Wells DE. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Marine Geophysical Researches*. 1 grudzień 1996;18(6):607–29.
- [9] Bikonis K. Three-dimensional imaging of submerged objects by side-scan sonar data

- processing. 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurement: Technologies and Results, Heraklion. 2005;7.
- [10] Klein M. Side Scan Sonar. W: International Handbook of Underwater Archaeology. Boston: Springer; 2002. s. 667–78.
- [11] Castellani U, Fusiello A, Murino V, Papaleo L, Puppo E, Pittore M. A complete system for on-line 3D modelling from acoustic images. *Signal Processing: Image Communication*. 1 październik 2005;20(9):832–52.
- [12] Rost H, Grierson H. High Precision Projects using LiDAR and Digital Imagery. TS11 – Imaging and Data Applications, Integrating Generations, FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden. czerwiec 2008;11.
- [13] Nikic D, Wu J, Pauca VP, Plemmons R, Zhang P. A Novel Approach to Environment Reconstruction in Lidar and Hsi Datasets. 2012; Dostępne na: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Approach-to-Environment-Reconstruction-in-Nikic-Wu/85ec9ce70ea6437c9312a7f42013a1332cf89a59>
- [14] Huber M, Schickler W, Hinz S, Baumgartner A. Fusion of LIDAR data and aerial imagery for automatic reconstruction of building surfaces. W: 2003 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. 2003. s. 82–6.
- [15] Stateczny A, Bodus-Olkowska I. Hierarchical Hydrographic Data Fusion for Precise Port Electronic Navigational Chart Production. W: Mikulski J, redaktor. *Telematics - Support for Transport*. Springer Berlin Heidelberg; 2014. s. 359–68.
- [16] Thomson J, Garrett M, Taylor M, George T, Melancon M, Behrens K. Sonar Surveys For Pipeline Inspection Show Extent Of Pipeline Displacement And Seafloor Instability Following Hurricane Ivan. W *Offshore Technology Conference*; 2005.
- [17] Todd B, Shaw J. Applications of seafloor mapping on the Canadian Atlantic continental shelf. *Geoscience Canada*. 1 czerwiec 2009;36:81–94.
- [18] Brown CJ, Sameoto JA, Smith SJ. Multiple methods, maps, and management applications: Purpose made seafloor maps in support of ocean management. *Journal of Sea Research*. 1 sierpień 2012;72:1–13.

- [19] Bernard EN, Robinson AR. *The Sea, Volume 15: Tsunamis* — Eddie N. Bernard, Allan R. Robinson | Harvard University Press. 2009.
- [20] Chybicki A, Dąbrowski J, Kulawiak M, Łuba M, Łubniewski Z, Moszyński M, i in. System GIS do analizy i wizualizacji zanieczyszczeń oraz innych składników środowiska morskiego. *Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne*. 2008;T. 15:111–6.
- [21] Integrated multiscale 3d imaging geographic information system using acoustic data. *Proceedings of 8th European Conference on Underwater Acoustics, Carvoeiro*. czerwiec 2006;2:585–90.
- [22] Kulawiak M, Lubniewski Z, Bikonis K, Stepnowski A. Geographical Information System for analysis of Critical Infrastructures and their hazards due to terrorism, man-originated catastrophes and natural disasters for the city of Gdansk. W: *Information Fusion and Geographic Information Systems [Internet]*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2009 [cytowane 25 czerwiec 2018]. s. 251–62. (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography). Dostępne na: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-00304-2_17
- [23] Drypczewski K, Moszyński M, Demkowicz J, Bikonis K, Stepnowski A. Design of the Dual Constellation Gps/Galileo Mobile Device for Improving Navigation of the Visually Impaired in an Urban Area. *Polish Maritime Research*. 1 grudzień 2015;22(4):15–20.
- [24] Manfredini AM, Russo M. Multi-scalar 3D digitization of Cultural Heritage using a low-cost integrated approach. W: *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*. 2013. s. 153–60.
- [25] Pavlidis G, Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, Tsioukas V, Chamzas C. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*. 1 styczeń 2007;8(1):93–8.
- [26] Łubniewski Z, Partyka A, Stepnowski A, Bikonis K, Ruciński A, Czarnul P, i in. System informacji przestrzennej do analizy, wizualizacji i zdalnego udostępniania danych o infrastrukturach krytycznych. *Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne*. 2006;T. 10:607–12.

- [27] Dalecki D, Lebień J, Mieloszyk K, Wiszniewski B. Interakcyjna wizualizacja terenu rzeczywistego wykorzystująca klaster obliczeniowy. Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne. 2007;T. 13:323–30.
- [28] Dharmapuri S, Tully M. Evolution of Point Cloud [Internet]. LIDAR Magazine. 2018 [cytowane 28 listopad 2018]. Dostępne na: <https://lidarmag.com/2018/07/16/evolution-of-point-cloud/>
- [29] Floriani LD, Magillo P. Triangulated Irregular Network. W: LIU L, ÖZSU MT, redaktorzy. Encyclopedia of Database Systems [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2009 [cytowane 28 listopad 2018]. s. 3178–9. Dostępne na: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_437
- [30] Seafloor Information System SIS Operator Manual, Release 3.6, Kongsberg Maritime AS. 2009.
- [31] QINSy Knowledge Base [Internet]. [cytowane 2 październik 2017]. Dostępne na: <https://confluence.qps.nl/display/KBE/QINSy+Knowledge+Base>
- [32] Lu D, Li H, Wei Y, Shen T. An improved merging algorithm for Delaunay meshing on 3D visualization multibeam bathymetric data. 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2010. 1 czerwiec 2010;
- [33] Hurtós N, Cufi X, Salvi J. Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3D scene reconstruction. W 2010. s. 1–7.
- [34] Mosca F, Matte G, Lerda O, Naud F, Charlot D, Rioblanc M, i in. Scientific potential of a new 3D multibeam echosounder in fisheries and ecosystem research - ScienceDirect. Fisheries Research. czerwiec 2016;178:130–41.
- [35] Lu Y, Oshima M. On the 3-D Reconstruction of Seabed Using Multiple Sidescan Sonar Images. IAPR Workshop on Machine Vision Applications. 2002;5.
- [36] Coiras E, Petillot Y, Lane DM. Multiresolution 3-D Reconstruction From Side-Scan Sonar Images. IEEE Transactions on Image Processing. luty 2007;16(2):382–90.
- [37] Prados E, Faugeras O. Shape From Shading. W: Paragios N, Chen Y, Faugeras O, redaktorzy. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision [Internet]. Boston,

MA: Springer US; 2006 [cytowane 28 listopad 2018]. s. 375–88. Dostępne na:
https://doi.org/10.1007/0-387-28831-7_23

- [38] Bikonis K, Moszynski M, Lubniewski Z. Application of Shape From Shading Technique for Side Scan Sonar Images. *Polish Maritime Research*. 1 wrzesień 2013;20(3):39–44.
- [39] Kada M, Mckinley L. 3D building reconstruction from LiDAR based on a cell decomposition approach. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 1 wrzesień 2009;38.
- [40] Kim K, Shan J. Building roof modeling from airborne laser scanning data based on level set approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1 lipiec 2011;66(4):484–97.
- [41] Henn A, Gröger G, Stroh V, Plümer L. Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1 luty 2013;76:17–29.
- [42] Cheng L, Tong L, Chen Y, Zhang W, Shan J, Liu Y, i in. Integration of LiDAR data and optical multi-view images for 3D reconstruction of building roofs. *Optics and Lasers in Engineering*. 1 kwiecień 2013;51(4):493–502.
- [43] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction. *Symposium on Geometry Processing*. 2006;61–70.
- [44] Kazhdan M, Hoppe H. Screened Poisson Surface Reconstruction. *ACM Trans Graph*. lipiec 2013;32(3):29:1–29:13.
- [45] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, Silva C, Taubin G. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. październik 1999;5(4):349–59.
- [46] Amenta N, Choi S, Kolluri RK. The Power Crust. W: *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications* [Internet]. New York, NY, USA: ACM; 2001. s. 249–266. (SMA '01). Dostępne na: <http://doi.acm.org/10.1145/376957.376986>
- [47] Sitnik R, Karaszewski M. Optimized Point Cloud Triangulation for 3D Scanning Systems. *MG&V*. styczeń 2008;17(4):349–371.

- [48] Campos R, Garcia R, Nicosevici T. Surface reconstruction methods for the recovery of 3D models from underwater interest areas. W: OCEANS 2011 IEEE - Spain. 2011. s. 1–10.
- [49] Tse ROC, Gold CM, Kidner DB. Building reconstruction using LIDAR data. Proceedings 4th ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS. 2005;6.
- [50] Rottensteiner F. Automatic generation of high-quality building models from lidar data. IEEE Computer Graphics and Applications. listopad 2003;23(6):42–50.
- [51] Kulawiak M, Łubniewski Z. Reconstruction methods for 3D underwater objects using point cloud data. Hydroacoustics. 2015;Vol. 18:95–102.
- [52] Kulawiak M, Łubniewski Z. 3D imaging of underwater objects using multibeam data. Hydroacoustics [Internet]. 2014 [cytowane 25 czerwiec 2018];Vol. 17. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-d8cd6a46-5963-49fd-b89a-94b4e7661254>
- [53] Seitz SM, Curless B, Diebel J, Scharstein D, Szeliski R. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. W: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06). 2006. s. 519–28.
- [54] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. Paris, France, France: Centre National de la Recherche Scientifique; 1996.
- [55] Lavoué G. A Multiscale Metric for 3D Mesh Visual Quality Assessment. Comput Graph Forum. 1 sierpień 2011;30:1427–37.
- [56] Urick RJ. Principles of underwater sound for engineers. New York: McGraw-Hill Book Company; 1975.
- [57] Multibeam Sonar Theory of Operation. L-3 Communications SeaBeam Instruments; 2000.
- [58] EM Series Multibeam echo sounders Datagram formats [Internet]. [cytowane 12 grudzień 2005]. Dostępne na: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/253E4C58DB98DDA4C1256D790048373B/\\$file/160692_em_datagram_formats.pdf](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/253E4C58DB98DDA4C1256D790048373B/$file/160692_em_datagram_formats.pdf)

- [59] Wójciuk K. LIDAR – rozpraszanie ramanowskie - Artykuły - Laboratoria.net [Internet]. [cytowane 25 lipiec 2018]. Dostępne na: <http://laboratoria.net/artukul/17603.html>
- [60] Ernst K. Lidary w badaniach atmosfery. Wiedza i Życie [Internet]. 1997 [cytowane 29 październik 2018];6. Dostępne na: <http://archiwum.wiz.pl/1997/97062200.asp>
- [61] Numeryczne Dane Wysokościowe. Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej [Internet]. [cytowane 13 kwiecień 2018]. Dostępne na: <http://www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/numeryczne-dane-wysokosciowe.html>
- [62] ASPRS. (2011). LAS Specification version 1.4, The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, Maryland, USA [Internet]. [cytowane 12 grudzień 2005]. Dostępne na: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf
- [63] ASG-EUPOS, Technologie, Układy odniesienia, PSWG '92 [Internet]. [cytowane 26 listopad 2018]. Dostępne na: http://www.asgeupos.pl/index.php?wpg_type=tech_rf&sub=pswg92
- [64] Kadaj RJ. Polskie Układy Współrzędnych [Internet]. [cytowane 26 listopad 2018]. Dostępne na: http://www.geonet.net.pl/images/2002_12_uklady_wspolrz.pdf
- [65] Niemeyer J, Rottensteiner F, Soergel U. Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1 styczeń 2014;87:152–65.
- [66] Iwanowski M. Morphological Boundary Pixel Classification. W: EUROCON 2007 - The International Conference on „Computer as a Tool”. 2007. s. 146–50.
- [67] Mosorov V, Rusyn B. Automatic image segmentation based on tophat morphological transformation. W: Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics Proceedings of the VI-th International Conference CADSM 2001 (IEEE Cat No01 EX473). 2001. s. 173–4.
- [68] Foundation B. blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software [Internet]. blender.org. [cytowane 11 lipiec 2018]. Dostępne na: <https://www.blender.org/>

- [69] BB3D. Big Ben, London. Scan The World. MyMiniFactory [Internet]. 2017. Dostępne na: <https://www.myminifactory.com/object/big-ben-london-2462>
- [70] CSA. Castelo De Santo Angelo (Castel Sant'Angelo). brnipon. 3D Warehouse [Internet]. 2018. Dostępne na: <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/e6b5d74421f6aaf3ee1dec833bfa8b3/Castelo-De-Santo-Angelo-Castel-SantAngelo>
- [71] Kulawiak M, Łubniewski Z. Processing of LiDAR and Multibeam Sonar Point Cloud Data for 3D Surface and Object Shape Reconstruction. W: 2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics). 2016. s. 187–90.
- [72] Kulawiak M, Łubniewski Z. 3D Object Shape Reconstruction from Underwater Multibeam Data and Over Ground Lidar Scanning. Polish Maritime Research. 2018;25(2):47–56.
- [73] Mallat SG. A wavelet tour of signal processing: the sparse way. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Academic Press; 2009. 805 s.
- [74] C Envelope follower.png. W: Wikipedia, wolna encyklopedia [Internet]. [cytowane 10 wrzesień 2018]. Dostępne na: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:C_Envelope_follower.png
- [75] Kulawiak M. Processing of Hydroacoustic and LiDAR Data for Three-dimensional Surface Reconstruction. Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne. 2018;81–9.
- [76] Vorobel R, Stobińska M, Przybyszewski K. Wykorzystanie metod kontrastu lokalnego do wykrywania krawędzi w obrazie. Automatyka / Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie. 2009;T. 13, z. 3/1:1033–41.
- [77] Sirakov N, Iwanowski M, Hack D, Feves M. Morphological approach to volume calculation of complex 3D geological objects. W South African Institute of Mining and Metallurgy; 2003.
- [78] Spacerat. Fast-Quadric-Mesh-Simplification: Mesh triangle reduction using quadrics [Internet]. 2018 [cytowane 9 lipiec 2018]. Dostępne na: <https://github.com/sp4cerat/Fast-Quadric-Mesh-Simplification>

- [79] Maślanka M. Podstawowe informacje o projekcie ISOK Rola GUGiK w projekcie ISOK [Internet]. [cytowane 26 listopad 2018]. Dostępne na:
http://www.gugik.gov.pl/__data/assets/pdf_file/0004/23755/WYKLAD-1.pdf
- [80] About CesiumJS - Open Source 3D Globe and Maps [Internet]. [cytowane 6 lipiec 2018]. Dostępne na: <https://cesiumjs.org/about>
- [81] glTF - Runtime 3D Asset Delivery [Internet]. The Khronos Group. 2013 [cytowane 3 grudzień 2018]. Dostępne na: <https://www.khronos.org/glTF/>
- [82] Cignoni P, Callieri M, Corsini M, Dellepiane M, Ganovelli F, Ranzuglia G. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. The Eurographics Association; 2008.
- [83] Qhull code for Convex Hull, Delaunay Triangulation, Voronoi Diagram, and Halfspace Intersection about a Point [Internet]. [cytowane 17 grudzień 2018]. Dostępne na:
<http://www.qhull.org/>
- [84] OGRE - Open Source 3D Graphics Engine | Home of a marvelous rendering engine [Internet]. [cytowane 12 lipiec 2018]. Dostępne na: <https://www.ogre3d.org/>
- [85] Kulawiak M, Kulawiak M, Lubniewski Z. Integration, Processing and Dissemination of LiDAR Data in a 3D Web-GIS. ISPRS International Journal of Geo-Information. marzec 2019;8(3):144.
- [86] Numeryczny Model Terenu - Geomatyka w Lasach Państwowych - Lasy Państwowe [Internet]. [cytowane 3 grudzień 2018]. Dostępne na:
<http://www.geomatyka.lasy.gov.pl/numeryczny-model-terenu>

Spis rysunków

Rys. 1. Gęsta chmura punktów reprezentująca budynek o stosunkowo prostej strukturze geometrycznej.....	7
Rys. 2. Przykład scalenia dwóch sąsiadujących ze sobą sieci trójkątów [32].....	12
Rys. 3. Schemat tworzenia otekstowanego modelu dna morskiego na podstawie danych pochodzących z kamery oraz echosondy wielowiązkowej [33].....	13
Rys. 4. Wizualizacja fragmentu dna morskiego, obejmująca aktualne położenie statku, ukształtowanie terenu, a także miejsca występowania ławic ryb [34].....	13
Rys. 5. Zestaw obrazów z sonaru bocznego pozyskanych z równoległych do siebie torów ruchu [35].....	14
Rys. 6. Porównanie wyników odtworzenia kształtu dna morskiego metodą prostą (o) oraz z wykorzystaniem dodatkowych operacji zwiększających dokładność oszacowania głębokości poszczególnych punktów (b) na podstawie danych z sonaru bocznego [36].....	15
Rys. 7. Wizualizacja fragmentu dna morskiego: obraz uzyskany z echosondy wielowiązkowej (a), model uzyskany na podstawie obrazu z echosondy wielowiązkowej (b), model uzyskany za pomocą omawianej metody na podstawie danych z sonaru bocznego (c) [38].....	15
Rys. 8. Model fragmentu okrętu, odtworzony na podstawie zdjęć z aparatu akustycznego [11]	16
Rys. 9. Punkty LiDAR pokolorowane wg wykrytych płaszczyzn a)) oraz zestaw brył złożonych w uproszczony model (b) reprezentujący wykryty budynek [39].....	17
Rys. 10. Chmura punktów z zaznaczonymi miejscami przecięć poszczególnych płaszczyzn (a) oraz stworzony na jej podstawie model końcowy (b) [40].....	17
Rys. 11. Prosty model budynku (a) oraz efekt jego nałożenia na obraz satelitarny (b) przedstawiający oryginalny obiekt [41].....	18
Rys. 12. Proces wykrywania krawędzi budynku na obrazie rastrowym (a) oraz pomocniczym modelu 3D uzyskanym za pomocą triangulacji Delaunaya (b) [42].....	18

Rys. 13. Wyniki zastosowania różnych algorytmów odtwarzania kształtu dla przykładowej chmury punktów (a) pochodzącej z sondowania dna morskiego: algorytmu Ball-Pivoting (b), metody Poissona (c) oraz metody Power Crust (d).....	21
Rys. 14. Niekompletny model Bazyliki NMP w Gdańsku otrzymany za pomocą aplikacji Agisoft PhotoScan na podstawie serii zdjęć wykonanych z różnych perspektyw.....	23
Rys. 15. Cyfrowy model Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej stworzony ręcznie na podstawie jego planów architektonicznych.....	25
Rys. 16. Zobrazowanie sposobu wyznaczania dwóch aspektów związanych z oceną jakości zrekonstruowanego modelu R względem modelu wzorcowego W: dokładności (a) oraz kompletności (b) [53].....	26
Rys. 17. Geometria sondowania dna morskiego za pomocą echosondy wielowiązkowej.....	28
Rys. 18. Schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezyera wiązek sonaru wielowiązkowego..	31
Rys. 19. Lokalizacje miejsc pozyskania danych podwodnych (zaznaczone kolorem czerwonym) w rejonie Zatoki Gdańskiej.....	32
Rys. 20. Lokalizacje miejsc pozyskania danych podwodnych (zaznaczone kolorem czerwonym) w rejonie zatoki Oslofjorden w Norwegii.....	32
Rys. 21. Schemat układu pomiarowego urządzenia LiDAR [59].....	34
Rys. 22. Siatka danych CODGiK. Kolorem żółtym oznaczono obszar udostępniony przez CODGiK. Kolorem czerwonym oznaczono sektory, z których pochodzą poszczególne zestawy danych zaprezentowane w niniejszej pracy.....	35
Rys. 23. Podział danych CODGiK na regularną siatkę i związany z nim problem rozdzielania informacji o niektórych obiektach na różne sektory (na przykładzie Ratusza Głównego Miasta w Gdańsku).....	36
Rys. 24. Model referencyjny Bazyliki NMP w Gdańsku otrzymany za pomocą technologii fotogrametrii.....	38
Rys. 25. Model referencyjny budynku Laboratorium Maszynowego Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej odtworzony ręcznie na podstawie planów architektonicznych.....	39
Rys. 26. Schemat działania zaproponowanej metodyki przetwarzania danych przestrzennych	

.....	42
Rys. 27. Operacje wykonywane na etapie detekcji i klasyfikacji obiektów występujących we wstępnie przetworzonych danych, dla przypadku zastosowania algorytmu siatki....	43
Rys. 28. Symulacja procesu skanowania powierzchni Elizabeth Tower w celu uzyskania trójwymiarowej chmury punktów.....	46
Rys. 29. Wyniki symulacji skanowania laserowego powierzchni Elizabeth Tower: a) tor I 150 m nad ziemią, b) tor II 150 m nad ziemią, c) tor I 300 m nad ziemią, d) tor II 300 m nad ziemią.....	48
Rys. 30. Wejściowy model Elizabeth Tower (a) porównany z wynikowymi chmurami punktów powstałymi na podstawie połączonych wyników symulacji skanowania na wysokości 150 m n.p.t. (b) oraz na wysokości 300 m n.p.t. (c).....	49
Rys. 31. Wyniki symulacji skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła: a) tor I, b) tor II	49
Rys. 32. Model wejściowy Zamku Świętego Anioła (a) porównany z końcowym wynikiem symulacji skanowania jego powierzchni (b).....	50
Rys. 33. Porównanie wyników skanowania LiDAR (a) ze zbiorem danych wygenerowanym za pomocą Symulatora Skanera (b).....	50
Rys. 34. Wizualizacja działania algorytmu wykrywania zakłóceń w przykładowym zbiorze danych (a), dla którego wyliczane są różnice pomiędzy poszczególnymi punktami (b) w celu oznaczenia podzbioru zakłóconych danych (c) oraz zastosowaniu na nim zmodyfikowanego filtru maksymalnego (d).....	55
Rys. 35. Zestaw przykładowych punktów umieszczonych w dwuwymiarowej przestrzeni (a) oraz rezultat jego przetworzenia metodą zmodyfikowanego filtru maksymalnego (b)	56
Rys. 36. Obwiednia przykładowego sygnału, oznaczona kolorem czerwonym [74].....	57
Rys. 37. Przykład podzielenia nieregularnego zbioru danych na regularną siatkę sektorów (zaznaczonych kolorem niebieskim) i konwersji ich do postaci dwuwymiarowej tablicy punktów. Punkty C1 i D3 (zaznaczone kolorem czerwonym) reprezentują elementy puste.....	58

Rys. 38. Dwa różne rezultaty przetworzenia pojedynczego zbioru danych do postaci rastrow o rozdzielczościach $0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m}$ (a) oraz $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ (b).....	60
Rys. 39. Rezultat konwersji nieregularnej chmury punktów o średniej rozdzielczości 19 punktów na metr kwadratowy (a) do postaci regularnego zbioru o stałej rozdzielczości 4 punktów na metr kwadratowy (b).....	60
Rys. 40. Szczegółowy proces działania pojedynczej iteracji pętli odpowiadającej za korekcję istniejącej klasyfikacji przykładowego zbioru danych rastrowych.....	64
Rys. 41. Wynik zastosowania wstępnej klasyfikacji (b) oraz jej korekcji (c) dla przykładowego zbioru danych (a).....	65
Rys. 42. Porównanie wyników rekonstrukcji kształtu wraku statku bez zastosowania algorytmu wykrywania masztów (a) oraz z jego użyciem (b).....	67
Rys. 43. Przykład zastosowania algorytmu wykrywającego ściany budynków (b) w obrębie regularnej chmury punktów (a) pochodzącej ze skaningu laserowego.....	68
Rys. 44. Fragment słownika wzorców wykorzystywanego w celu wykrywania rastrowych reprezentacji linii (a) oraz sposobu przekształcania ich do odpowiadających im postaci wektorowych (b).....	69
Rys. 45. Porównanie rezultatów odtworzenia modelu 3D (b) na podstawie danych bez zastosowania algorytmu derasteryzacji (a) oraz rekonstrukcji modelu (d) na bazie danych zderasteryzowanych (c).....	70
Rys. 46. Przetworzenie chmury punktów reprezentującej wynik zeskanowania powierzchni Bazyliki Mariackiej w Gdańsku (a) do postaci uproszczonej siatki 3D (b) składającej się z czterech warstw rastrowych (c), gdzie jasność piksela oznacza jego położenie na osi pionowej w obrębie danej warstwy.....	73
Rys. 47. Porównanie rezultatu działania triangulacji Delaunaya (b) z wynikiem działania proponowanego algorytmu triangulacji (c), zastosowanych dla przykładowej chmury punktów mającej postać regularnej siatki rastrowej (a).....	76
Rys. 48. Rezultat działania poszczególnych kroków algorytmu triangulacji zastosowanego dla niewielkiego zestawu danych, przedstawionego wcześniej na Rys. 47.....	78
Rys. 49. Dwa różne sposoby triangulacji zestawu czterech punktów.....	79

- Rys. 50. Wszystkie możliwe sposoby dokonania triangulacji pojedynczego sektora gdy występują w nim dokładnie trzy punkty oznaczone jako elementy ścian oraz potencjalny czwarty punkt.....80
- Rys. 51. Pozostałe metody dokonania triangulacji punktów w pojedynczym sektorze, gdy występują w nim nie więcej niż dwa punkty sklasyfikowane jako fragmenty ścian. 81
- Rys. 52. Rezultat zastosowania trybu działania bez wykrywania ścian pionowych (a) oraz trybu działania z wykrywaniem ścian (b) algorytmu rekonstrukcji siatki na przykładzie fragmentu danych reprezentujących niewielki budynek.....81
- Rys. 53. Porównanie oryginalnej chmury punktów pochodzącej z wyników skanowania powierzchni Bazyliki NMP w Gdańsku (a) z jej wersją przetworzoną przez algorytm kostki (b).....82
- Rys. 54. Wyniki działania ekranowanej metody Poissona (c, f) w porównaniu z klasyczną metodą Poissona (b, e) dla chmury punktów oryginalnej (a) oraz przetworzonej przez algorytm kostki (d) dla danych reprezentujących Zamek Świętego Anioła.....83
- Rys. 55. Wyniki zastosowania algorytmów odtwarzania kształtu dla chmury punktów reprezentującej fragment Zatoki Gdańskiej (a) bez poprzedzenia klasyfikacją punktów (po lewej) i z zastosowaniem wpierw klasyfikacji punktów (po prawej): metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c), triangulacja Delaunaya (d) oraz rekonstrukcja siatki (e).....88
- Rys. 56. Wyniki zastosowania algorytmów rekonstrukcji kształtu dla sklasyfikowanych danych (a) przedstawiających wrak statku Cleona w zatoce Oslofjorden: metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c), triangulacja Delaunaya (d) oraz rekonstrukcja siatki (e).....90
- Rys. 57. Chmura punktów reprezentująca tereny Politechniki Gdańskiej i okolic, z pokolorowaniem na podstawie wartości z kanałów RGB pochodzących z cyfrowej ortofotomapy (a) oraz danych o klasyfikacji obiektów (b), gdzie (c) przedstawia efekt ograniczenia danych do klasy budynków oraz punktów bezpośrednio z nimi sąsiadującymi, natomiast (d) reprezentuje ostateczny wynik odtworzenia kształtu budynków za pomocą algorytmu siatki (punkty należące do pozostałych klas są

niewidoczne).....	91
Rys. 58. Modele budynków uzyskane na podstawie opisanych metod, umieszczone w trójwymiarowym systemie informacji przestrzennej Cesium.....	92
Rys. 59. Przetworzone dane przedstawiające wybrane budynki Politechniki Gdańskiej (a) oraz wyniki zastosowania dla nich algorytmów rekonstrukcji kształtu: metoda Poissona (b), algorytm Ball-Pivoting (c) oraz rekonstrukcja siatki (d).....	92
Rys. 60. Modele wynikowe reprezentujące budynek Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej, otrzymane na podstawie danych oryginalnych (a) i przetworzonych algorytmem kostki (c) oraz ich przycięte wersje (b, d).....	94
Rys. 61. Dane przedstawiające modele Bazyliki NMP w Gdańsku: wyniki skanowania LiDAR (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (c), dane przetworzone przy użyciu zaproponowanych przez autora metod (b) oraz stworzony na ich podstawie model (d), a także model referencyjny (e).....	96
Rys. 62. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi Bazylikę NMP w Gdańsku. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej.....	97
Rys. 63. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Bazyliki NMP w Gdańsku.....	98
Rys. 64. Wierzchołek reprezentujący czubek jednej z wieżyczek modelu referencyjnego Bazyliki NMP w Gdańsku (a) oraz odpowiadające mu wierzchołki w modelu R1 (b) i R2 (c).....	99
Rys. 65. Dane przedstawiające modele Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej: wyniki skanowania LiDAR (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (c), dane przetworzone przy użyciu zaproponowanych przez autora metod (b) oraz stworzony na ich podstawie model (d), a także model referencyjny (e).....	101
Rys. 66. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b)	



- przedstawiającymi Laboratorium Maszynowe Politechniki Gdańskiej. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej.....102
- Rys. 67. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Laboratorium Maszynowego Politechniki Gdańskiej.....103
- Rys. 68. Wyniki symulowanego skanowania Elizabeth Tower z wysokości 150 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e).....105
- Rys. 69. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Elizabeth Tower zeskanowany metodą symulowaną z wysokości 150 m. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej.....106
- Rys. 70. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Elizabeth Tower zeskanowanego metodą symulowaną na wysokości 150 m.....107
- Rys. 71. Wyniki symulowanego skanowania Elizabeth Tower z wysokości 300 m (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e).....109
- Rys. 72. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Elizabeth Tower zeskanowany metodą symulowaną z wysokości 300 m. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej.....110
- Rys. 73. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Elizabeth Tower zeskanowanego

metodą symulowaną na wysokości 300 m.....	111
Rys. 74. Dane przedstawiające wyniki symulowanego skanowania Zamku Świętego Anioła (a) oraz wygenerowany na ich podstawie model (b), dane przetworzone (c) oraz utworzony na ich podstawie model (d), a także model wzorcowy (e).....	113
Rys. 75. Histogramy odległości pomiędzy wierzchołkami modelu W i modelu R1 (a) oraz pomiędzy wierzchołkami modelu W i wierzchołkami modelu R2 (b) przedstawiającymi model Zamku Świętego Anioła zeskanowany metodą symulowaną. Histogramy (c) i (d) przedstawiają te same wyniki z użyciem skali logarytmicznej.....	114
Rys. 76. Histogramy wartości iloczynu skalarnego normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R1 (a) oraz normalnych dla wierzchołków W i normalnych dla wierzchołków R2 (b), dla modelu Zamku Świętego Anioła zeskanowanego metodą symulowaną.....	114
Rys. 77. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na jakość modeli odtworzonych za pomocą metody Poissona.....	115
Rys. 78. Modele budynków kampusu Politechniki Gdańskiej przed i po uproszczeniu (z zastosowaniem dziesięciokrotnej redukcji liczby trójkątów).....	117
Rys. 79. Modele wraków Cleona (a) i holownika parowego (b) przed i po uproszczeniu, z zastosowaniem stukrotnej redukcji liczby trójkątów.....	118
Rys. 80. Efekt uproszczenia modeli reprezentujących: Bazylikę NMP w Gdańsku (a), Laboratorium Maszynowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (b), Elizabeth Tower (c) oraz Zamek Świętego Anioła (d), z zastosowaniem dwustukrotnej redukcji liczby trójkątów.....	119
Rys. 81. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na całkowity czas ich przetwarzania oraz rekonstrukcji modeli za pomocą metody Poissona.....	122
Rys. 82. Wpływ zastosowania algorytmu kostki dla poszczególnych zbiorów danych na ilość zużytej pamięci potrzebnej do ich przetworzenia oraz rekonstrukcji modeli za pomocą metody Poissona.....	122

Spis tabel

Tab. 1. Dostępne klasy w formacie LAS w wersji 1.2.....	36
Tab. 2. Parametry wykorzystane podczas symulacji laserowego skanowania powierzchni Elizabeth Tower.....	46
Tab. 3. Parametry wykorzystane podczas symulacji laserowego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła.....	47
Tab. 4. Sposób przypisania kolorów poszczególnym klasom obiektów do celów wizualizacyjnych.....	59
Tab. 5. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących Bazylikę NMP w Gdańsku	95
Tab. 6. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli Bazyliki NMP w Gdańsku odtworzonych na podstawie danych oryginalnych i danych przetworzonych.....	98
Tab. 7. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących Laboratorium Maszynowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej.....	100
Tab. 8. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli Laboratorium Maszynowego PG odtworzonych na podstawie danych oryginalnych i danych przetworzonych.....	103
Tab. 9. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 150 m.....	104
Tab. 10. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 150 m.....	107
Tab. 11. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 300 m.....	108

Tab. 12. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Elizabeth Tower z wysokości 300 m.....	111
Tab. 13. Parametry wejściowe algorytmu kostki wykorzystane w celu wygenerowania trójwymiarowego modelu dla danych reprezentujących wyniki symulowanego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła.....	112
Tab. 14. Zestawienie wyników w zakresie kryteriów jakości poszczególnych modeli otrzymanych na podstawie symulowanego skanowania powierzchni Zamku Świętego Anioła.....	115
Tab. 15. Poziomy złożoności poszczególnych modeli przed i po procesie ich uproszczenia, przy zastosowaniu trzech poziomów redukcji ich liczby trójkątów: dziesięciokrotnej, stukrotnej oraz dwustukrotnej.....	116
Tab. 16. Wydajność metod przetwarzania danych obejmujących rekonstrukcję kształtu w przestrzeni dwuwymiarowej z wykorzystaniem algorytmu siatki.....	120
Tab. 17. Wydajność metod przetwarzania danych obejmujących rekonstrukcję kształtu w przestrzeni trójwymiarowej z wykorzystaniem algorytmu kostki.....	121