

Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polska Akademia Nauk

ALGORYTMY FRAKTALNE
W CYFROWEJ ANALIZIE
OBIEKTÓW PRZESTRZENNYCH

Piotr Łabędź

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński
Promotor pomocniczy: dr inż. arch. Agnieszka Ozimek

Instytut Informatyki
Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki
Politechnika Krakowska

Kraków, 2016

Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczną wdzięczność osobom, bez których powstanie niniejszej pracy byłoby niemożliwe:

- promotorowi, prof. dr hab. inż. Tadeuszowi Burczyńskiemu za opiekę merytoryczną oraz umożliwienie rozwoju naukowego;
- promotorowi pomocniczemu, dr inż. arch. Agnieszce Ozimek za współpracę i nieocenione uwagi merytoryczne oraz techniczne;
- dr inż. arch. Pawłowi Ozimkowi za inspirację i twórcze dyskusje;
- uczestnikom Wakacyjnych Warsztatów Multimedialnych za udostępnienie kilku szczegółowych modeli zabudowań;
- żonie Basi oraz dzieciom Tomusiowi, Andrzejkowi i Michałkowi za niewyczerpaną cierpliwość i wsparcie.

Spis treści

Rozdział 1. Wstęp	2
1.1. Wprowadzenie	2
1.2. Cel i motywacja pracy	3
1.3. Zarys stanu badań	3
1.4. Przegląd treści rozprawy	6
Rozdział 2. Podstawy teoretyczne	8
2.1. Wymiar fraktalny	8
2.2. Wymiar Hausdorffa	9
2.3. Wymiar pudełkowy	11
2.3.1. Definicja formalna	11
2.3.2. Sposób pomiaru wymiaru pudełkowego	12
2.4. Analizy krajobrazowe	14
Rozdział 3. Badania wstępne wymiaru pudełkowego w analizie obrazów dwuwymiarowych	16
Rozdział 4. Fotografia krajobrazowa	21
4.1. Akwizycja obrazu	21
4.2. Segmentacja obrazu	24
Rozdział 5. Badania wymiaru pudełkowego w analizie krajobrazowej 2D dla wybranych obiektów	30
5.1. Apartamentowiec w miejsce istniejącego hotelu	30
5.2. Hotel pośród gór	33
5.3. Farmy wiatrowe	37
5.4. Podsumowanie	40
Rozdział 6. Badania wstępne wymiaru pudełkowego w analizie obiektów trójwymiarowych	41
6.1. Wprowadzenie	41
6.2. Algorytm brutalny	43
6.3. Testy numeryczne	45

<i>Spis treści</i>	II
Rozdział 7. Model AABB	49
7.1. Konstrukcja modelu	49
7.2. Konstrukcja algorytmu	50
7.3. Eksperymenty numeryczne	54
7.3.1. Test stabilności wyników	59
7.3.2. Czas działania algorytmu	61
7.4. Podsumowanie	65
Rozdział 8. Model OBB	66
8.1. Konstrukcja modelu	66
8.2. Konstrukcja algorytmu	68
8.2.1. Tworzenie podprzestrzeni obiektu	68
8.2.2. Test kolizji	70
8.3. Eksperymenty numeryczne	77
8.3.1. Obroty obiektów wokół różnych osi	77
8.3.2. Obroty wokół osi Z	81
8.3.3. Zmiana wielkości obiektu	88
8.4. Podsumowanie	93
Rozdział 9. Model zaawansowany oparty na siatce wielokątowej	96
9.1. Konstrukcja modelu	97
9.2. Konstrukcja algorytmu	98
9.3. Eksperymenty numeryczne	104
9.4. Podsumowanie	110
Rozdział 10. Zakończenie rozprawy	111
Bibliografia	117
Spis rysunków	122
Spis tabel	126
Streszczenie	127

Rozdział 1

Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Początki badań dotyczących fraktali sięgają prac Benoita Mandelbrota z lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, a przede wszystkim jego najsłynniejszego dzieła *The Fractal Geometry of Nature* z 1982 roku [34]. Od tamtego czasu dokonuje się stały postęp tej koncepcji, który nie byłby możliwy bez rozwoju technologii informatycznych, a w szczególności grafiki komputerowej. Choć fraktale w szerokim rozumieniu bywają kojarzone głównie z obiektami samopodobnymi, ich naukowe zastosowanie obejmuje szeroki zakres, w szczególności zagadnieniem takim jest pomiar wymiaru fraktalnego obiektów znajdujących się w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej. Trudno jest jednak zdefiniować pojęcie wymiaru fraktalnego w sposób jednoznaczny, dlatego też do jego opisu stosuje się różnorakie definicje, m.in. wymiaru samopodobieństwa, pudełkowego czy cyrklowego. Należy jednak zaznaczyć, iż pomiar wartości wymiaru fraktalnego nie musi być stosowany jedynie do obiektów fraktalnych, jakkolwiek niektóre z przytoczonych definicji wymagają spełnienia przez obiekt określonych warunków. Dodatkowo, precyzyjne określenie wartości tego wymiaru możliwe jest jedynie dla obiektów posiadających cechy matematycznego samopodobieństwa. Dla pozostałej klasy obiektów, skutecznym narzędziem może być natomiast porównanie kilku stanów badanego obiektu oraz szacowanie zachodzących zmian pomiędzy nimi, na podstawie wartości liczbowych, uzyskanych z pomiaru wymiaru fraktalnego. W takim przypadku istotniejszym parametrem jest *różnica* wartości tego wymiaru pomiędzy poszczególnymi stanami niż wartość określająca pojedynczy stan. Z uwagi na ścisłe powiązanie z matematyką jest to parametr obiektywny, mogący mieć zastosowanie w różnych dziedzinach nauki.

Niniejsza praca podejmuje temat pomiaru wartości wymiaru fraktalnego metodą pudełkową na obrazach rastrowych oraz cyfrowych scenach trójwymiarowych, koncentrując się na zastosowaniu tych pomiarów w architekturze krajobrazu.

1.2. Cel i motywacja pracy

Głównym celem niniejszej pracy jest opracowanie metody i algorytmów umożliwiających ocenę zmian zachodzących w krajobrazie, bazujących na pomiarze wymiaru fraktalnego. Stwarza to możliwość obiektywnej oceny charakteru zmian wprowadzanych do krajobrazu, co jest szczególnie istotne przy obiektach budowanych na obszarach chronionych. Metoda obejmuje analizę dwuwymiarowych obrazów (zdjęć) zrobionych z perspektywy człowieka oraz cyfrowych modeli trójwymiarowych. Konstrukcja algorytmu pracującego w przestrzeni trójwymiarowej pozwala na analizę zarówno modeli uproszczonych, skonstruowanych jedynie za pomocą prostopadłościów, jak i skomplikowanych, składających się z siatek wielokątowych. Oczekiwaną cechą każdego algorytmu jest maksymalne skrócenie czasu jego działania, z tego względu algorytmy działające na różnych reprezentacjach modeli wymagają różnego podejścia matematycznego. Elementem wspólnym i bazą każdego z nich jest szacowanie wymiaru fraktalnego metodą pudełkową oraz obliczanie różnic w wartościach tego wymiaru pomiędzy stanem istniejącym, a stanem po wprowadzeniu danej zmiany.

Ocena zmiany charakteru krajobrazu, jaka może nastąpić w wyniku realizacji nowych inwestycji, jest szczególnie istotna w przypadku terenów objętych ochroną, stanowiących około 30% powierzchni Polski. Przedsięwzięcia budowlane zlokalizowane w powyższych strefach podlegają przeważnie ocenie eksperckiej, która przeprowadzana jest najczęściej na podstawie o subiektywnych kryteriów [55]. Wymiar fraktalny, ze względu na swój matematyczny obiektywizm może się stać istotnym wskaźnikiem umożliwiającym podjęcie trafnej decyzji, dotyczącej ingerencji w krajobraz, ograniczając tym samym rolę opinii wydawanych jedynie na podstawie intuicji.

1.3. Zarys stanu badań

Od momentu wprowadzenia przez Mandelbrota [34] pojęcia fraktala minęło ponad 30 lat. Do tego czasu fraktale były uważane głównie za obiekty niepasujące do standardowej geometrii Euklidesa, której wpływ był tak wielki, że kształty, które nie redukowały się lokalnie do linii prostej były nazywane „matematycznymi monstrami”, a czasem nawet „obiettami patologicznymi”. Jednak wraz z rozwojem technologii komputerowych są one coraz częściej stosowane w wielu różnych obszarach nauki i techniki [3, 11, 45]. Znajdują zastosowanie zarówno podczas pomiaru chropowatości powierzchni, służąc za dodatkowy wskaźnik opisujący jej parametry [24, 62] jak i podczas analiz

systemów transportowych w dużych miastach, pomagając w ocenie rozwoju sieci metra na przestrzeni lat [54]. W grafice komputerowej służą za podstawę wydajnych algorytmów kompresji obrazów i tekstur [13, 56]. Znaczna część współczesnych zastosowań dotyczy także różnych aspektów medycyny i nauk biomedycznych [21]. Pomiar wymiaru fraktalnego jest używany jako jeden ze wskaźników w diagnostyce okulistycznej, podczas badania dna oka, gdzie pomaga wstępnie zweryfikować obrazy pod kątem występowania stanów chorobowych [41]. Spora ilość zastosowań wiąże się również z analizą obrazów otrzymanych radiologicznie oraz metodą rezonansu magnetycznego [22, 27]. Kuczyński [27] w swojej pracy opisuje metodę analizy wymiaru fraktalnego obrazów mózgu pozwalającą na wstępne rozróżnienie pomiędzy stanem zdrowym a stanem patologicznym. De Miras i inni [49] przenieśli metodę badań w trzeci wymiar tworząc aplikację działającą na zbiorach wokseli, reprezentujących dane otrzymane za pomocą rezonansu magnetycznego. Również w tym przypadku wykazana została użyteczność wskaźnika, jakim jest wymiar fraktalny, do rozpoznania stanów chorobowych.

Algorytmy fraktalne są także używane w różnych aspektach analiz krajobrazowych. Ruan i Zhang [48] zastosowali indeks fraktalny do śledzenia zmian zachodzących w krajobrazie na przestrzeni lat, jako studium przypadku wybierając otoczenie jednego z chińskich jezior. Przeprowadzone przez nich badania na zdjęciach satelitarnych, umożliwiły śledzenie historii zróżnicowania gruntów w założonych odstępach czasowych. Inni badacze wykorzystali wymiar fraktalny do określenia złożoności przestrzennej krajobrazu miejskiego na podstawie zdjęć satelitarnych (również w podczerwieni). Miara fraktalna została porównana z istniejącym wskaźnikiem autokorelacji przestrzennej (indeks Morana), użytecznym w opisie stopnia klasteryzacji krajobrazu miejskiego. Indeks ten okazał się ujemnie skorelowany z wymiarem fraktalnym, zatem oba wskaźniki zostały uznane za przydatne w charakterystyce wspomnianego krajobrazu [23]. Również w polskiej literaturze można spotkać prace z podobnego zakresu. Przykładem może być próba rozróżnienia roślin rosnących w przybrzeżnych pasach jezior za pomocą analiz wymiaru fraktalnego obliczanego na zdjęciach teledetekcyjnych. Wyższe wartości tego wymiaru związane są ze strukturami o wysokim rozdrobieniu bez wewnętrznego uporządkowania (oczerety, makrofity, powierzchnie lasów) natomiast niższe dla pól ozimin i gruntów ornych, gdzie powierzchnia jest bardziej regularna [37]. W szerszym zakresie przeprowadzone zostały badania mające na celu określenie na podstawie wymiaru pudełkowego struktury użytków rolnych w obszarze województwa dolnośląskiego. Analizy te posłużyły m.in.

do wyznaczenia stopnia koncentracji kompleksów słabej przydatności rolniczej gleb na terenie wybranych powiatów [25]. Wymiar pudełkowy stosowany bywa także do opisu oraz oceny obiektów architektonicznych. Żarnowiecka [66] zastosowała procedurę jego pomiaru na elewacji budynku przed modernizacją oraz po modernizacji, oceniając na tej podstawie stopień przeprowadzonych zmian. Istnieją także publikacje z pogranicza psychologii poruszające problematykę zależności pomiędzy wymiarem fraktalnym, a ludzkimi odczuciami dotyczącymi krajobrazu. Zastosowany został w tym przypadku wymiar pudełkowy obliczany na podstawie uproszczonego obrazu przedstawiającego jedynie linię nieba. Obrazy te były poddawane ocenie przez grupę osób, mających za zadanie określić swoje preferencje. Wyniki wykazują istnienie pewnej zależności pomiędzy postrzeganiem zdjęć krajobrazowych, a wymiarem fraktalnym, konieczne są jednak dalsze badania [20].

Większość z wymienionych publikacji bazuje na oszacowaniu wymiaru fraktalnego metodą pudełkową. Część badaczy przeprowadza swoje analizy bezpośrednio na obrazach monochromatycznych, bez stosowania binaryzacji, używając do tego celu metody graniastosłupów trójkątnych [23, 37] skutecznej w przypadku analiz prowadzonych lokalnie, lub różnicowego wymiaru pudełkowego [27] na podstawie metody opisanej przez Sarkara i Chaudhuriego [52]. Istotną cechą w prawie wszystkich publikacjach jest konieczność dokładnego wyliczenia wartości wymiaru fraktalnego. Niektórzy naukowcy dokonują ewaluacji zastosowanego rozwiązania na podstawie tej wartości [41]. Z tego powodu pojawiają się publikacje, mające na celu opracowanie metody służącej zwiększeniu dokładności szacowania wymiaru pudełkowego, lub przyspieszania czasu jego pomiaru [26]. Bazują one w głównej mierze na odpowiednim dobraniu wielkości pudełek oraz ilości kroków wykonywanych podczas procedury pomiaru [5, 16]. Nieco inne podejście stosuje Kuczyński [27], dla którego bardziej istotna jest różnica wymiaru fraktalnego pomiędzy analizowanymi zdjęciami.

Rozwój narzędzi cyfrowych pozwolił również na ukształtowanie się nowych narzędzi wykorzystywanych w analizach krajobrazowych. Już w latach 70. ubiegłego wieku prowadzone były prace nad pomiarem cech krajobrazu w celu inwentaryzacji i ewaluacji jego zasobów [61]. Robinson [47] zaproponował stosowanie w tych badaniach obiektywnych numerycznych wskaźników pozwalających na osiągnięcie powtarzalnych wyników oraz ograniczenie wpływu ocen subiektywnych, zależnych od osądu. Cyfrowe wskaźniki pozwalające ocenić różne scenariusze przekształcenia krajobrazu pojawiają się w pracy Ozimka [43]. Analizowane jest w niej przesłanianie obiektów za-

bytkowych przez nowy budynek na fotografiach wykonanych z miejsc często odwiedzanych przez turystów. Metody komputerowe stosowane są również do oznaczenia obiektów charakteryzujących się znacznym kontrastem z otoczeniem oraz wskazania największych zaburzeń linii nieba [50]. Steinitz [57] przeprowadził badania z udziałem grupy obserwatorów polegające na ocenie przez nich fotografii krajobrazowych, a następnie próbie dopasowania odpowiednich równań do empirycznych wyników. Wraz z rozwojem technik komputerowych w publikacjach zaczął się pojawiać temat analiz krajobrazowych w przestrzeni trójwymiarowej. Do tego celu służą cyfrowo wygenerowane modele terenu, których dwa podstawowe typy to DEM (Digital Elevation Model) oraz TIN (Triangular Irregular Network). Prace z tego zakresu koncentrują się zarówno na analizie jakości generowanych modeli w zależności od jakości danych i sposobu ich pozyskiwania [6, 60] jak i przede wszystkim na przeprowadzaniu na tych modelach analiz numerycznych. Należy tu wymienić prace mające na celu klasyfikację funkcjonalności algorytmów pracujących na modelu TIN [14] oraz analizę wyników, jakie można otrzymać stosując algorytmy analizy widoczności na różnych modelach terenu [35]. Wykorzystanie narzędzi cyfrowych w analizach krajobrazowych jest również omawiane w pracach polskich badaczy [43, 44], przy czym jeden z najważniejszych współczesnych głosów w tej tematyce stanowi praca zbiorowa [42], będąca podsumowaniem kilkuletniego projektu badawczego realizowanego na Politechnice Krakowskiej.

1.4. Przegląd treści rozprawy

Niniejsza rozprawa rozpoczyna się od wstępu teoretycznego (rozdział 2), w którym zostały przedstawione podstawowe pojęcia oraz definicje stosowane w treści, takie jak fraktal i wymiar fraktalny. W tym miejscu jest również zaprezentowany od strony teoretycznej, stosowany w pracy sposób pomiaru wymiaru fraktalnego metodą pudełkową, jak również krótki wstęp dotyczący analiz krajobrazowych. Zasadnicza część pracy podzielona jest na dwie części. W pierwszej z nich (rozdziały 3 - 5) przedstawione zostały prace i badania prowadzone na obrazach dwuwymiarowych, podczas gdy druga (rozdziały 6 - 9) bazuje na modelach w przestrzeni trójwymiarowej.

Rozdział 3 opisuje badania wstępne, prowadzone na obrazach sztucznych, zmierzające do stwierdzenia użyteczności stosowania wymiaru pudełkowego w analizach dwuwymiarowych obrazów. Rozdział 4 przedstawia różne aspekty akwizycji oraz przygotowania danych, w postaci fotografii krajobra-

zowych, na których zostały następnie przeprowadzone pomiary. Przedstawiono w nim również problemy związane z zastosowaniem automatycznych algorytmów segmentujących oraz ograniczenia wynikające ze specyfiki obrazów rastrowych jak i samej fotografii krajobrazowej. Rozdział 5 przedstawia wyniki badań, przeprowadzonych na fotografiach, z zastosowaniem wymiaru pudełkowego, na podstawie trzech studiów przypadków - apartamentowca w centrum miasta, hotelu w górskiej miejscowości oraz farmy wiatrowej.

W rozdziale 6 zaprezentowane zostało wprowadzenie do analiz przeprowadzanych w przestrzeni trójwymiarowej wraz z algorytmem brutalnym działającym w tej przestrzeni, stanowiącym bazę do testów numerycznych. Rozdział ten opisuje również wstępne testy, wykonane na przykładowej scenie, wykazujące użyteczność wymiaru pudełkowego do analiz obiektów w trójwymiarowej przestrzeni. W rozdziale 7 opisany został model AABB (Axis-Aligned Bounding Box), stanowiący największe uproszczenie trójwymiarowej sceny wraz z algorytmem działającym na tym modelu. Opisane zostały również testy numeryczne, wykazujące zgodność wyników z algorytmem brutalnym, testy stabilności oraz czasu działania. Rozdział 8 opisuje nieco bardziej skomplikowany model OBB (Oriented Bounding Box), w którym uwzględnia się również obrót obiektu wokół dowolnej osi. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, został tu opisany algorytm działający przy użyciu tego modelu, ze szczególnym uwzględnieniem testu kolizji pomiędzy obiektami. Przedstawione w dalszej części rozdziału eksperymenty numeryczne koncentrują się na analizie zależności wartości wymiaru pudełkowego od obrotu obiektu w przestrzeni, jak również od zmiany jego wielkości. Rozdział 9 przedstawia najbardziej zaawansowany model, oparty na siatce wielokątowej. Opisany jest w nim odpowiedni algorytm, a także wyniki eksperymentów numerycznych. Ostatni rozdział stanowi podsumowanie całej rozprawy i dyskusję otrzymanych wyników. Na końcu umieszczona została bibliografia oraz spis rysunków i tablic.

Rozdział 2

Podstawy teoretyczne

2.1. Wymiar fraktalny

Termin *fraktal* został wprowadzony w 1975 roku przez Benoita Mandelbrota. Naukowcy unikają podawania ścisłej definicji tego pojęcia, dlatego w literaturze można spotkać ich kilka. Najprostsza z nich ma następujące brzmienie:

„Fraktalem na płaszczyźnie R^2 nazywamy każdy niepusty i zwarty podzbiór płaszczyzny R^2 .” [28]

Zgodnie z tą definicją takie obiekty jak kwadrat, okrąg, odcinek są szczególnymi przypadkami fraktali (podobnie jak liczby całkowite są szczególnymi przypadkami liczb wymiernych). Mimo swojej ogólności jest ona jednak bardzo wygodna podczas formułowania twierdzeń [28].

Według niektórych badaczy, do zagadnienia fraktali powinniśmy podchodzić w taki sam sposób, w jaki biolodzy podchodzą do definicji życia. Nie szukać ścisłej definicji, która może nie obejmować wielu interesujących zagadnień, lecz sporządzić raczej listę istotnych cech charakterystycznych:

- posiadają one złożoną strukturę, zarówno dla małych, jak i dużych skal,
- ze względu na nieregularność i złożoność struktura ta nie daje się łatwo opisać za pomocą tradycyjnej geometrii zarówno lokalnie jak i globalnie,
- posiadają pewne formy samopodobieństwa, np. idealne, przybliżone, statystyczne,
- ich wymiar, zwany wymiarem fraktalnym (definiowany w różny sposób) jest zazwyczaj większy od ich wymiaru topologicznego,
- w wielu przypadkach mogą być określane w prosty sposób, np. za pomocą zależności rekurencyjnej [12].

Cechy te są rozbudowaną wersją trzech cech podanych przez Mandelbrota (określanie za pomocą zależności rekurencyjnej, samopodobieństwo, niecałkowity wymiar) [34].

Podobnie jak w przypadku terminu *fraktal*, również jednoznaczne zdefiniowanie pojęcia *wymiar* nie jest zadaniem łatwym. W powszechnym rozumieniu, wymiar danego obiektu (nazywamy *wymiarem topologicznym*) to najmniejsza liczba niezależnych zmiennych (określanych mianem współrzędnych), które są potrzebne do jednoznacznego opisu jego punktów. W geometrii fraktalnej częstsze, a zarazem właściwsze zastosowanie znajdują inne definicje, między innymi *wymiar Hausdorffa*, *wymiar samopodobieństwa*, *wymiar cyrkłowy*, *wymiar pojemnościowy*, czy *wymiar pudełkowy* [11]. W niniejszej pracy używaną metodą pomiaru, oraz stosowaną definicją wymiaru fraktalnego jest wymiar pudełkowy.

Nie jest w żadnej mierze intencją autora próba klasyfikacji zaprezentowanych w pracy obiektów jako fraktali. Nie przeszkadza to jednak w zastosowaniu do nich miar fraktalnych, takich jak wymiar pudełkowy, gdyż jak zaznaczono we wstępie, pomiar wartości wymiaru fraktalnego nie musi być stosowany jedynie do obiektów fraktalnych. Należy zaznaczyć, że obliczone wartości tego wymiaru przybierają zawsze postać liczby niecałkowitej i są ściśle uzależnione od ilości wymiarów przestrzeni, w jakiej znajduje się analizowany obiekt. Maksymalna wartość jaką mogą osiągać jest równa ilości wymiarów dostępnej przestrzeni, natomiast minimalna jest od niej mniejsza o 1. Zatem dla przedstawionych w pracy przykładów analiz prowadzonych na dwuwymiarowych obrazach wartości te będą się zawierać w domkniętym przedziale pomiędzy 1.0 a 2.0, natomiast dla obiektów w przestrzeni trójwymiarowej - pomiędzy 2.0 a 3.0 [45].

2.2. Wymiar Hausdorffa

W celu właściwego zrozumienia formalnej definicji wymiaru pudełkowego należy najpierw przytoczyć definicję wymiaru Hausdorffa. Ma ona duże znaczenie teoretyczne, a jednocześnie niewielkie zastosowanie w praktyce, ze względu na swoją złożoność i trudność w zastosowaniu, nawet do elementarnych przykładów.

Niech A będzie podzbiorem n -wymiarowej przestrzeni euklidesowej. Podzbiór U zawarty w tej przestrzeni nazywa się *otwarty*, jeżeli dla dowolnego $x \in U$ istnieje kula $B_\varepsilon = \{y \in \mathbf{R}^n \mid d(x, y) < \varepsilon\}$ o promieniu $\varepsilon > 0$, o środku w punkcie x , zawarta całkowicie w U . Rodzina zbiorów otwartych $\{U_1, U_2, U_3, \dots\}$ nazywa się *pokryciem otwartym* zbioru A , jeżeli ich suma zawiera w sobie zbiór A . Niech s i ε będą dodatnimi liczbami rzeczywistymi.

Określamy

$$h_\varepsilon^s(A) = \inf \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \text{diam}(U_i)^s \right\} \quad (2.1)$$

gdzie U_i jest pokryciem otwartym zbioru A takim, że $\text{diam}(U_i) < \varepsilon$. Suma, jaką otrzymujemy, może być skończona, albo nieskończona. W miarę zmniejszania ε klasa dopuszczalnych pokryć maleje, zatem infimum rośnie, podczas gdy $\varepsilon \rightarrow 0$ i dąży do granicy, która może być nieskończonością albo skończoną liczbą rzeczywistą. Oznaczamy

$$h^s(A) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} h_\varepsilon^s(A) \quad (2.2)$$

Granica ta zawsze istnieje i jest nazywana *s-wymiarową miarą Hausdorffa* zbioru A . Dla dowolnego zbioru A istnieje dokładnie jedna taka liczba $D_H(A)$, że

$$h^s(A) = \begin{cases} \infty & s < D_H(A) \\ 0 & s > D_H(A) \end{cases} \quad (2.3)$$

Liczbę tę nazywamy *wymiarem Hausdorffa*, czyli

$$D_H(A) = \inf \{s \mid h^s(A) = 0\} = \sup \{s \mid h^s(A) = \infty\} \quad (2.4)$$

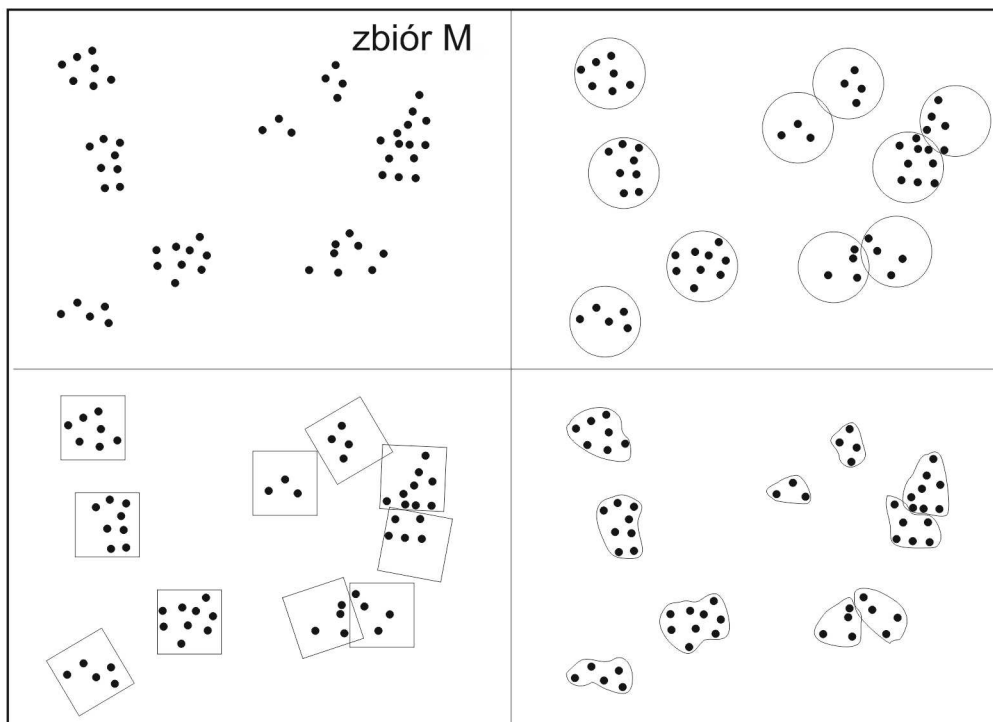
[11, 28, 45].

Trudność w oszacowaniu wielkości

$$\sum_{i=0}^{\infty} \text{diam}(U_i)^s \quad (2.5)$$

sprawia, że numeryczne obliczenia oparte na definicji są praktycznie niewykonalne. Należałoby pokrywać cały zbiór elementami różnego kształtu i wielkości (rys. 2.1), przechodząc w granicy z ich rozmiarami do wartości nieskończenie małych, co w przypadku dyskretnej reprezentacji numerycznej powoduje duże trudności [41].

W literaturze wymiar Hausdorffa bywa czasem nazywany wymiarem Hausdorffa-Besicovitcha [1, 11].



Rysunek 2.1: Zbiór M i trzy możliwe jego pokrycia (na podstawie [11])

2.3. Wymiar pudełkowy

Jednym ze sposobów pomiaru wymiaru fraktalnego jest metoda pudełkowa. Pozwala ona w prosty sposób obliczyć wartość wymiaru dla dowolnej struktury, zarówno w przestrzeni dwu- jak i trójwymiarowej (rys. 2.2). Mierzony obiekt nie musi posiadać żadnych cech fraktalnych, w szczególności samopodobieństwa.

2.3.1. Definicja formalna

Bazując na definicji wymiaru Hausdorffa możemy otrzymać sformalizowaną definicję wymiaru pudełkowego.

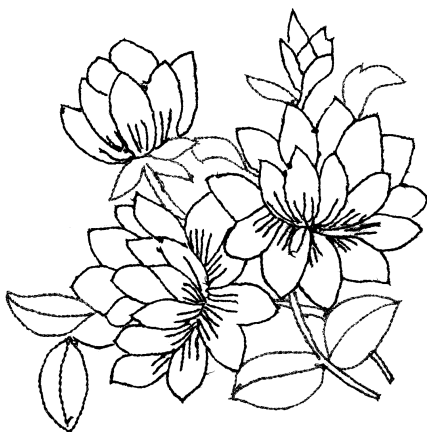
Niech będzie dany dowolny ograniczony podzbiór F przestrzeni R^n .

Wymiar pudełkowy definiujemy jako

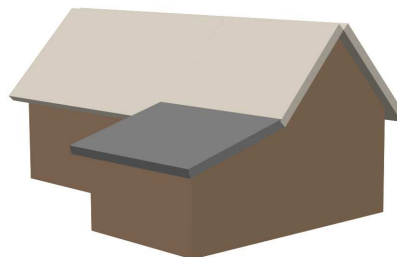
$$D_b(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{\log \frac{1}{\delta}} \quad (2.6)$$

przy założeniu, że ta granica istnieje, gdzie $N_\delta(F)$ jest jednym z następujących:

- najmniejsza liczba zamkniętych kul o promieniu δ pokrywających F ;
- najmniejsza liczba sześcianów o krawędzi δ pokrywających F ;



(a) Struktura dwuwymiarowa



(b) Struktura trójwymiarowa

Rysunek 2.2: Przykładowe obiekty, dla których obliczany będzie wymiar pudełkowy

- liczba sześciątów powstałych z siatek o wielkości oczek δ przecinających F ;
- najmniejsza liczba zbiorów o średnicy nie większej niż δ pokrywających F ;
- największa liczba rozłącznych kul o promieniu δ o środkach w F .

Wyrażenie (2.6) oznacza, że $N_\delta \propto \delta^{-s}$ dla małych δ , gdzie $s = D_b(F)$. Dokładniej można to zapisać jako

$$N_\delta(F)\delta^s \rightarrow \begin{cases} \infty & s < D_b(F) \\ 0 & s > D_b(F) \end{cases} \quad (2.7)$$

uwzględniając, że

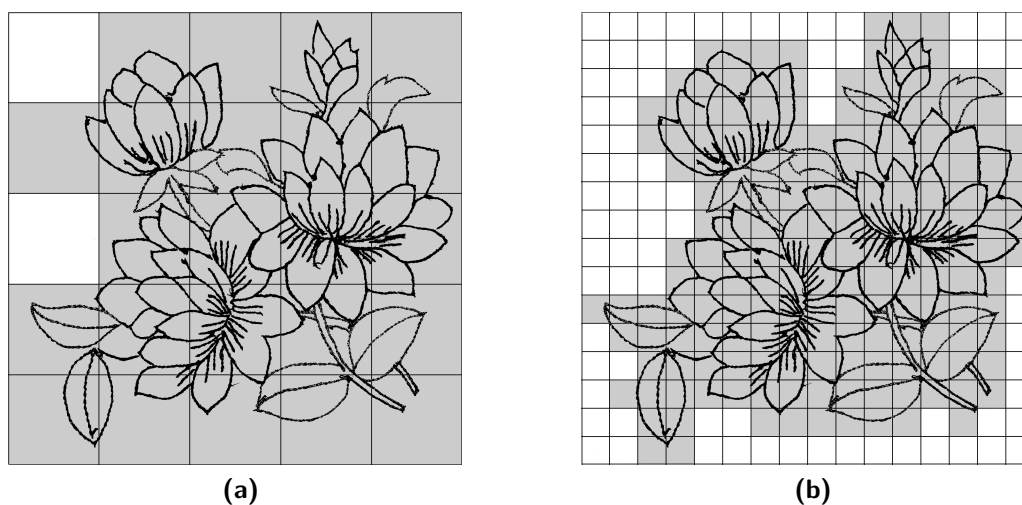
$$N_\delta(F)\delta^s = \inf \left\{ \sum_i \delta^s \right\} \quad (2.8)$$

Powyższą definicję można porównać z definicją wymiaru Hausdorffa (2.1), z tą różnicą, że wyrażenie U_i^s zastępujemy δ^s . Wymiar pudełkowy jest zatem swego rodzaju uproszczeniem wymiaru Hausdorffa. Wymiary te jednak nie zawsze się pokrywają [11].

2.3.2. Sposób pomiaru wymiaru pudełkowego

Algorytm pomiaru wymiaru pudełkowego bazuje na przytoczonej definicji formalnej. W celu jego wyznaczenia dla dowolnej struktury dwuwymiarowej, umieszczamy ją na regularnej siatce o znanej wielkości oczek s , a następnie obliczamy liczbę oczek zapełnionych, czyli takich, które zawierają w sobie

fragment analizowanego obiektu. Obowiązuje przy tym założenie, że aby dane oczko (pudełko) mogło zostać uwzględnione w obliczeniach, powinno zawierać dowolny, nawet najmniejszy fragment analizowanej struktury, jak również nie musi sąsiadować z żadnym innym zajęтым pudełkiem. Liczba zapełnionych oczek siatki N , którą otrzymamy w ten sposób, jest w sposób ścisły związana z ich wielkością, zatem określamy ją jako $N(s)$. Procedura jest następnie powtarzana dla innej (zasadniczo mniejszej) wielkości s (rys. 2.3).

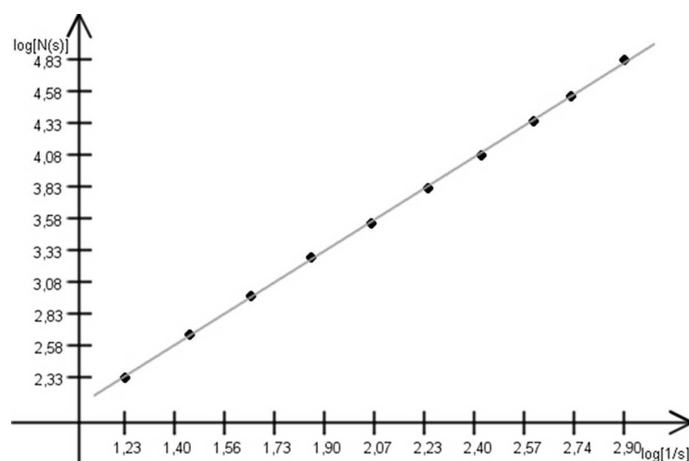


Rysunek 2.3: Pokrycie struktury siatką o wielkości oczek (a) $s = \frac{1}{5}$ całości, oraz (b) $s = \frac{1}{16}$ wraz z zaznaczonymi zliczanymi oczkami [30]

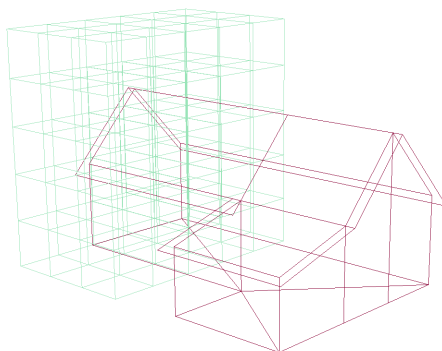
Kolejne iteracje możemy przeprowadzać w praktyce dotąd, aż zostaniemy ograniczeni rozdzielczością urządzenia. Otrzymujemy w ten sposób zestaw par s i $N(s)$, które możemy przedstawić na wykresie zależności logarytmicznych $\log(N(s))$ od $\log(s)$ (rys. 2.4). Okazuje się, że do danych można w łatwy sposób dopasować prostą regresji, co sugeruje istnienie liniowej zależności pomiędzy danymi [28].

Wymiar pudełkowy D_b definiowany jest jako współczynnik nachylenia prostej regresji na wykresie zależności logarytmów liczby zapełnionych pudełek (oczek siatki) od ich wielkości [45].

Przedstawiony algorytm pomiaru można również zaadaptować do analizy obiektów trójwymiarowych (rys. 2.5). W tym przypadku „oczkami siatki” będą sześciany (ang. *box* - pudełko). Nawiązuje również do tego samo określenie *wymiar pudełkowy*, pochodzące od angielskiego sformułowania *box-counting dimension*.



Rysunek 2.4: Zależność logarytmiczna dla struktury pokazanej na rysunku 2.3 [30]



Rysunek 2.5: Trójwymiarowy obiekt, wraz z fragmentem pokrycia jednorodną siatką pudełek

2.4. Analizy krajobrazowe

Każde przekształcenie krajobrazu powinno zostać, w interesie społecznym, poprzedzone przeprowadzeniem dogłębnego studium, uwzględniającego jego wpływ na późniejszy odbiór danego miejsca czy okolicy, które są możliwe do obserwacji zarówno z miejsc o naturalnych właściwościach widokowych, jak i sztucznie do tego celu przystosowanych, nazywanych *miejscami* lub *punktami widokowymi* [9]. Punkty te oraz drogi powinny stanowić kluczowe miejsca analiz wizualnych, gdyż w ten sposób większość ludzi użytkuje i widzi krajobraz [57]. W architekturze krajobrazu funkcjonuje pojęcie *panoramy*, rozumianej jako rozległy widok, ukazujący krajobraz obserwowany z pewnej odległości. Widok ten jest związany z percepcją *wnętrza* krajobrazowego - rozległego, zawartego w szerokim kącie patrzenia, zwykle wieloplanowego, o dużym stopniu skomplikowania. W skład wspomnianych analiz wchodzi m.in. badanie zakresu widoczności czynników podnoszących oraz obniża-

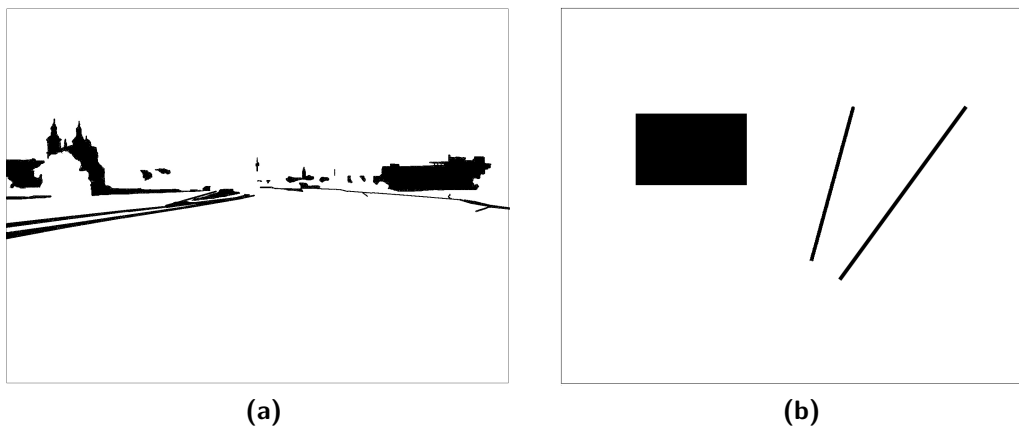
jących atrakcyjność krajobrazu, które mają wpływ na charakter otoczenia. Definiowany on jest przede wszystkim poprzez obiekty eksponowane, takie jak panujące nad całością *dominanty*, czy *akcenty*, zauważalne lecz niezbyt wyróżniające się [9]. W panoramie będą się one znajdować w kontekście tła - kulturowego oraz przyrodniczego, które jest do pewnego stopnia typowe dla danego obszaru. W przypadku decyzji dopuszczającej ingerencję w krajobraz najczęściej korzystne będzie dostosowanie formy nowego obiektu do kształtów i gabarytów form typowych [42]. Wspomaganie podejmowania takich decyzji możliwe jest obecnie przy użyciu technik cyfrowych oraz obiektywnych wskaźników. Jednym z nich jest omawiany w niniejszej pracy wymiar pudełkowy, przydatny w przypadku oceny zmian zachodzących lub planowanych w krajobrazie, czy też wyboru najlepszego wariantu jego rozwoju. Ocena taka może się odbywać na podstawie obliczonej *różnicy* wymiaru pudełkowego między stanem istniejącym, a tym, wynikającym z planowania. Może ona zostać odczytana zarówno w sensie negatywnym, w przypadku chęci zachowania charakteru danego krajobrazu lub w sensie pozytywnym, przykładowo podczas próby wprowadzenia dominanty.

Rozdział 3

Badania wstępne wymiaru pudełkowego w analizie obrazów dwuwymiarowych

Dwuwymiarowe obrazy cyfrowe w przestrzeni roboczej komputera najczęściej reprezentowane są w postaci macierzy. Jest to typ danych, do którego relatywnie łatwo zastosować algorytm obliczania liczby „pudełek”. Jak zaznaczono we wstępie, niniejsza praca nie ma na celu opracowania algorytmu, określającego dokładną wartość wymiaru pudełkowego analizowanego obrazu. Spowodowane jest to kilkoma czynnikami. Sama procedura pomiaru jest obciążona pewnym błędem z uwagi na zastosowanie metody regresji liniowej w końcowym wyniku. Pewne niewielkie różnice mogą również generować warunki początkowe procedury, czyli dobór wielkości pudełek używanych w poszczególnych krokach iteracji. Dodatkowe ograniczenia wynikają z samej konstrukcji przedmiotu badań, czyli cyfrowego obrazu rastrowego, który posiada dyskretną strukturę. Skutkuje to trudnością w osiągnięciu dużej dokładności obliczeń. Kolejnym bardzo istotnym czynnikiem jest fakt, iż dwa zupełnie różne obiekty mogą posiadać bardzo podobny wymiar fraktalny (rys. 3.1).

Mając na uwadze przytoczone uwarunkowania, bardziej użytecznym narzędziem podczas analizy obrazu z zastosowaniem wymiaru pudełkowego jest



Rysunek 3.1: Zmierzony wymiar fraktalny obu obiektów wynosi 1,622 [31]

wcielenie go w rolę wskaźnika zmian, jakie zachodzą na obrazie podczas jego modyfikacji. Analiza taka obejmuje porównanie ze sobą kilku różnych stanów danego obiektu i oszacowanie stopnia zmian pomiędzy nimi, na podstawie różnic w otrzymanych wartościach wymiaru pudełkowego. Z uwagi na ścisłą współpracę autora ze środowiskiem architektów krajobrazu, przytoczone w pracy przykłady będą dotyczyły głównie tego obszaru. Analogiczne podejście można jednak znaleźć również między innymi w literaturze medycznej, gdzie różnica w wymiarze fraktalnym pomiędzy dwoma obrazami pochodzącymi z tomografii komputerowej, bądź też rezonansu magnetycznego, wspomaga odróżnianie stanu zdrowego od stanu chorobowego. Jest to zatem bardzo pomocne narzędzie w dziedzinie diagnostyki obrazowej, zmniejszające liczbę zdjęć koniecznych do obejrzenia przez radiologów w celu postawienia trafnej diagnozy [27]. W przypadku fotografii krajobrazowej analizowane obrazy mogą przedstawiać np. stan obecny oraz stan przyszły, uzyskany w wyniku wizualizacji, a przedstawiający krajobraz po zmianach zaistniałych w wyniku realizacji planowanej inwestycji. Ze względu na swój matematyczny obiektywizm, otrzymana wartość liczbowa (różnica wymiarów fraktalnych) może posłużyć jako wskaźnik wspomagający ocenę stopnia wprowadzanych zmian.

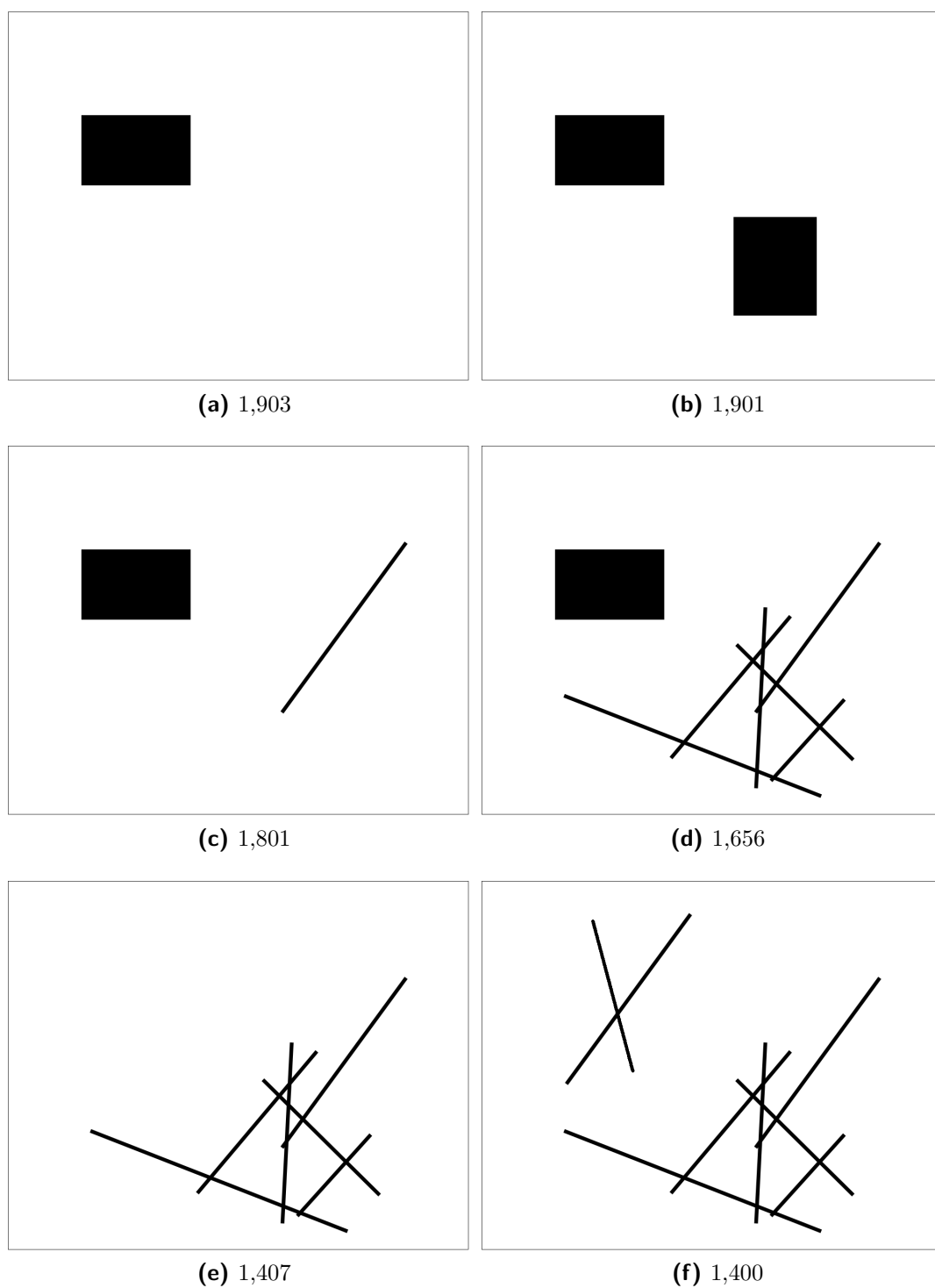
Należy także wspomnieć o dwóch istotnych kwestiach dotyczących sposobu przedstawiania wyników. Jak już wspomniano, dla przedstawionych w pracy przykładów analiz prowadzonych na dwuwymiarowych obrazach wartości wymiaru pudełkowego będą się zawierać w domkniętym przedziale pomiędzy 1.0 a 2.0, natomiast dla obiektów w przestrzeni trójwymiarowej - pomiędzy 2.0 a 3.0. Przedziały te stanowią jedyne możliwe do osiągnięcia wartości wymiaru w danej przestrzeni, zatem w każdej z nich maksymalna różnica pomiędzy badanymi stanami może wynieść 1. We wszystkich analizowanych przykładach różnica ta jest mniejsza, zatem stanowi pewien ułamek odpowiedniego przedziału, a co za tym idzie - ułamek liczby 1. Z tego powodu różnice pomiędzy badanymi przypadkami można podawać używając liczby rzeczywistej lub zapisu procentowego. Przykładowo, różnica w wartościach równa 0,176 stanowi 17,6% dostępnego przedziału. W dalszej części pracy zapis liczbowy i procentowy będzie stosowany zamiennie, należy zatem mieć na uwadze przytoczoną zależność.

Kolejnym elementem jest szacowanie błędów pomiarowych, wynikających głównie z zastosowania metody regresji. Podczas prowadzenia pomiarów zdecydowano się na 10 kroków pomiarowych. Jest to wielkość, która powoduje generowanie błędu regresji w wysokości około 3%, czyli 0,03 dla wartości

wymiaru pudełkowego, który mieści się w domkniętym przedziale o szerokości 1. Przykładowy rozrzut wartości pomiarowych wraz z prostą regresji został przedstawiony na rys. 2.4. W przypadku analiz obrazów dwuwymiarowych, liczba kroków pomiarowych jest ograniczana przez dyskretną strukturę rastra. Inaczej jest w przypadku przestrzeni trójwymiarowej, w której krawędzie pudełek mogą osiągać długości niecałkowite. Przy takim założeniu liczba kroków pomiarowych może zostać znacznie zwiększona. Testy wykazały, iż już przy 100 krokach w modelu uproszczonym błąd maleje poniżej 1%. Należy jednak mieć na uwadze, że zwiększanie liczby pomiarów powoduje również znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Z tego względu, oraz w celu zachowania ciągłości z przestrzenią dwuwymiarową zdecydowano się na pozostanie przy liczbie 10 kroków pomiarowych, czyli wysokości błędu równej około 3%. W zastosowaniach do rzeczywistych analiz należy jednak używać możliwie największej liczby kroków.

Początkowa weryfikacja użyteczności zastosowania wymiaru pudełkowego w analizach rzeczywistych przypadków została przeprowadzona na obrazach wygenerowanych sztucznie, składających się z prostych figur geometrycznych o zróżnicowanych parametrach (rys. 3.2). Na początku zostanie zatem wzięte pod uwagę białe tło, na którym został umieszczony czarny prostokąt. Jego wymiary zostały przyjęte dowolnie, zakładając jednak pozostawienie znacznej części obrazu pustej, w celu późniejszego dodawania kolejnych elementów (rys. 3.2a). Po przeprowadzeniu procedury pomiaru dla tak skonstruowanego obrazu otrzymany wynik jest równy 1,903. Gdyby prostokąt wypełnił całą dostępną mu przestrzeń, wtedy wymiar ten zgodnie z teorią byłby równy 2,0. Można teraz przeprowadzić analizę kolejnych przypadków, dodając do istniejącego prostokąta różnorodne obiekty. Pierwszym z nich niech będzie kolejny prostokąt o wymiarach zbliżonych do już istniejącego, który nie będzie powodował zmiany w charakterze obrazu (rys. 3.2b). Różnica pomiędzy zmierzonymi wartościami wymiarów pudełkowych dla tych obrazów wynosi 0,002, zatem jest mniejsza niż 1% przedziału, w którym mogą zmieniać się opisywane wartości.

Jeśli jednak obiekt, który zostanie dodany do obrazu odbiega znacznie od już istniejącego, możemy zaobserwować znaczące obniżenie się mierzonej wartości wymiaru pudełkowego. Tak dzieje się chociażby w przypadku dodania do pierwotnego rysunku linii prostej (rys. 3.2c), co powoduje spadek wymiaru o 0,1. Kolejne znaczące obniżenie wartości otrzymywane jest poprzez zwielokrotnienie obiektów o odrębnym charakterze (rys. 3.2d). W tym przypadku spadek ten wynosi aż 25% dostępnego przedziału. Przedstawiony



Rysunek 3.2: Obiekty i ich zmierzone wymiary pudełkowe [31]

tok rozumowania może również zostać powtórzony w przypadku innego obrazu pierwotnego, np. składającego się z grupy prostych linii (rys. 3.2e). Również dla takiego układu dodanie obiektów spójnych z już istniejącymi powoduje marginalną zmianę mierzonej wartości wymiaru pudełkowego (rys. 3.2f), natomiast dodanie obiektu zupełnie od nich odmiennego ma na tę wartość wpływ bardzo znaczący (rys. 3.2d) [31].

Rozdział 4

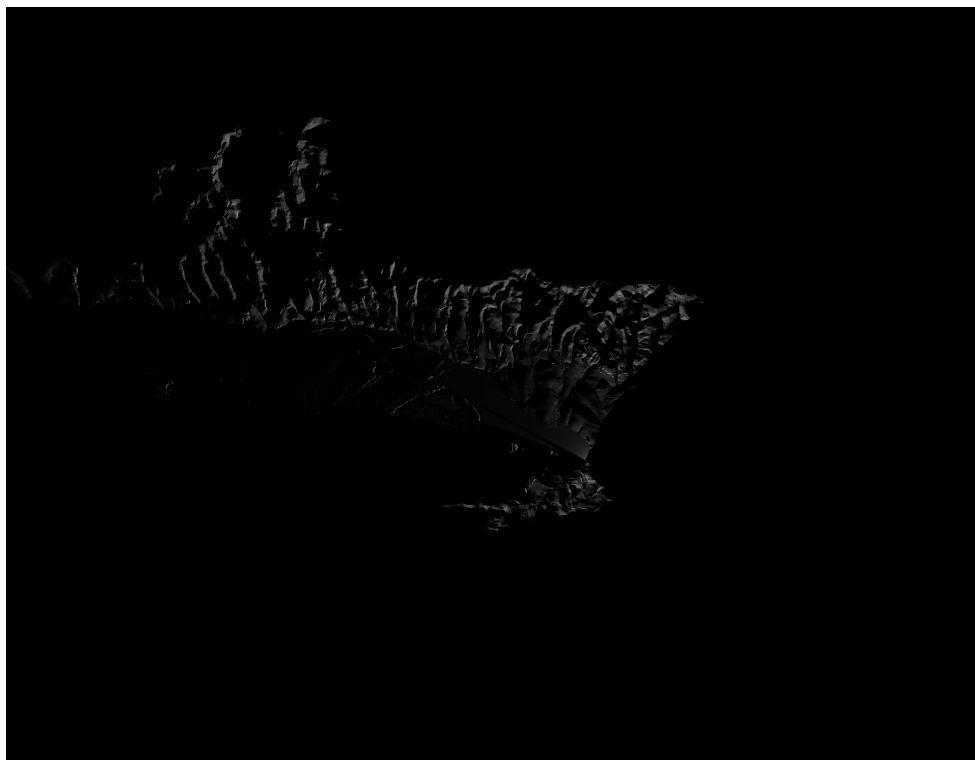
Fotografia krajobrazowa

Na podstawie analiz przeprowadzonych przy użyciu wygenerowanych obrazów można postawić tezę o istnieniu zależności pomiędzy charakterem zmian, którym został poddany obraz, a odpowiadającym im mierzonym wartościom wymiaru pudełkowego. Wskazuje to na potencjalną użyteczność miary fraktalnej w analizach krajobrazowych, jako obiektywnego wskaźnika mogącego wspomagać opinie eksperckie. W trakcie badań przeprowadzony został szereg pomiarów dotyczących rzeczywistych przypadków planowanych inwestycji oraz ich ingerencji w krajobraz. Większość z nich została następnie przedstawiona ekspertom z dziedziny architektury krajobrazu, oraz stanowiła istotną część opracowań przygotowywanych na zlecenie przedsiębiorstw realizujących wspomniane inwestycje.

4.1. Akwizycja obrazu

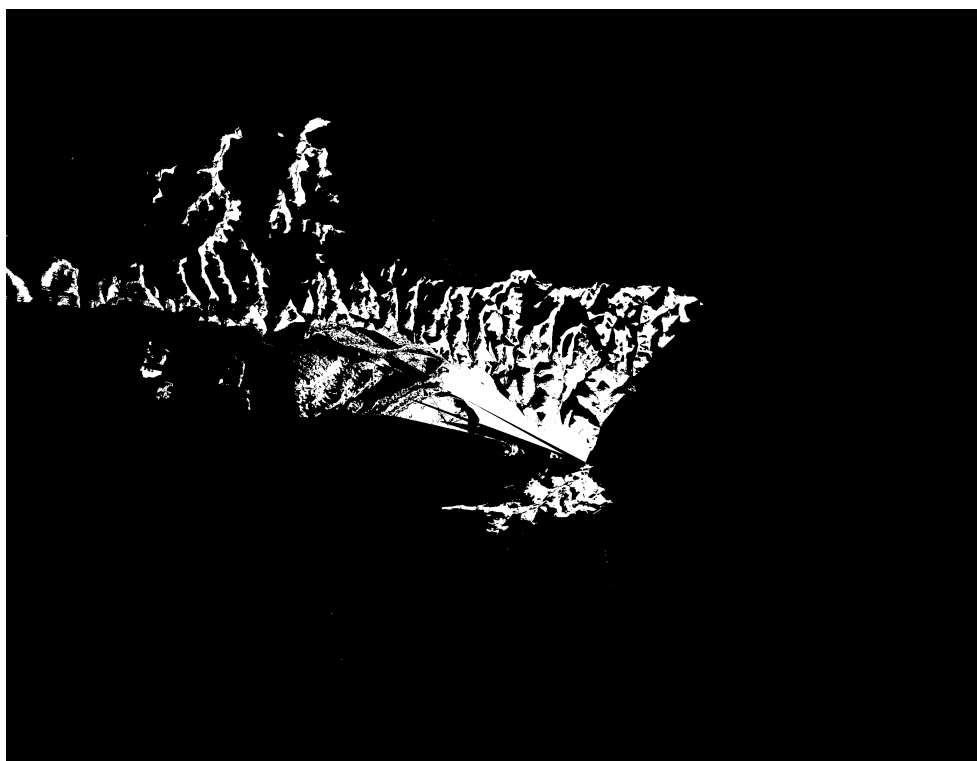
Wygenerowane komputerowo obrazy służące do testów użyteczności wymiaru pudełkowego nie wymagały przed rozpoczęciem obliczeń żadnego wstępnego przygotowania. Inaczej rzecz się ma podczas analizy przypadków rzeczywistych. Aby otrzymać obraz, na którym można przeprowadzić odpowiednie kalkulacje, należy najpierw wykonać zdjęcie interesującego fragmentu krajobrazu. Wbrew pozorom nie jest to zadanie trywialne. Wyznaczenie odpowiedniego zestawu punktów widokowych można wykonać na podstawie cyfrowego modelu terenu [44]. Posiadając odpowiednie dane geograficzne, przy użyciu technik cyfrowych wykonuje się siatkę wielokątową przedstawiającą analizowany teren, uwzględniając zróżnicowanie jego ukształtowania, a także elementy jego pokrycia. Na tej podstawie można wyznaczyć ekspozycję czynną z wybranego miejsca, czyli zakres terenu, który można z niego obserwować. Zastosowano przy tym model propagacji światła w scenie, przy założeniu, że światło, jako nośnik widoku, rozchodzi się w środowiskach jednorodnych po liniach prostych. W modelu cyfrowym jest ono przesłaniane

przez obiekty geometryczne w wyniku działania algorytmów wyznaczających powierzchnie widoczne [43]. Umieszczenie takiego modelu światła w wybranym punkcie modelu terenu skutkuje (po przeprowadzeniu renderingu) otrzymaniem wykresu widoczności, na którym oznaczone są miejsca widoczne i niewidoczne z danego miejsca w terenie (rys. 4.1).

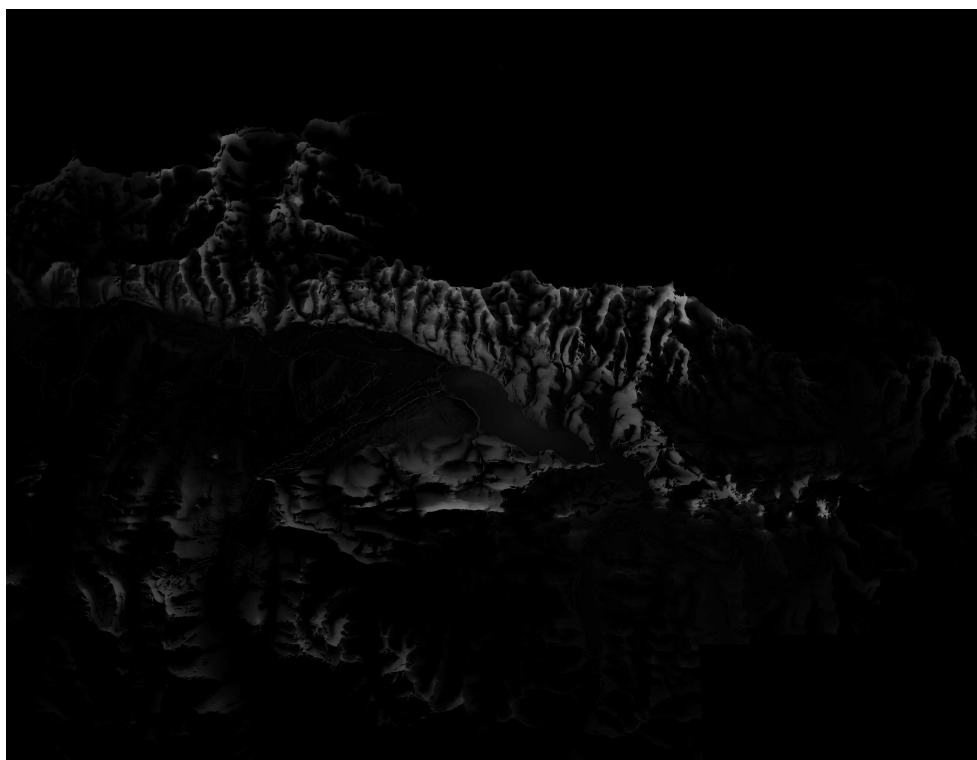


Rysunek 4.1: Przykładowy wykres widoczności dla pojedynczego punktu terenu

Używając metody systematycznego próbkowania otrzymuje się zbiór danych, składający się z wykresów widoczności dla każdego punktu terenu. Na tym etapie konieczna jest selekcja wykresów, skutkująca odrzuceniem tych, które przedstawiają widoczność z miejsc osłoniętych, czyli przykładowo z lasów. Po przeprowadzeniu binaryzacji każdego wykresu w otrzymanym w ten sposób zbiorze (rys. 4.2), uśrednia się wszystkie jego elementy łącząc je w monochromatyczną mapę widoczności, przedstawiającą skumulowaną informację na temat całego analizowanego obszaru [59, 42]. Im jaśniejszy jest dany piksel na mapie, z tym większej liczby miejsc dany punkt terenu jest widoczny (rys. 4.3). Wykresy i mapy widoczności utworzone dla terenu, w którym ma zostać zlokalizowana potencjalna inwestycja są zatem bardzo pomocne w wyznaczeniu punktów, z których należy wykonać fotografie krajobrazowe [42].



Rysunek 4.2: Zbinaryzowany wykres widoczności



Rysunek 4.3: Przykładowa mapa widoczności

Kolejnym nie mniej istotnym aspektem jest prawidłowa rejestracja fotografii. Zagadnienie to obejmuje przede wszystkim wystarczającą rozdzielczość przestrzenną, która powinna co najmniej dorównywać kątowej rozdzielczości widzenia. Przy maksymalnym kontraście pomiędzy danym obiektem i jego otoczeniem rozdzielczość ta wynosi 1' [2]. Korzystając z zależności określającej kąt widzenia aparatu

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d}{2f} \quad (4.1)$$

gdzie d jest wymiarem matrycy, dla którego poszukujemy kąta, a f jest długością ogniskowej, można w łatwy sposób znaleźć minimalną rozdzielczość przestrzenną wykonywanej fotografii, spełniającą wspomniany warunek [36]. Większość fotografii użytych do zaprezentowanych analiz została wykonana przy użyciu pełnoklatkowego aparatu DSLR Nikon D700 z zamocowanym zmienneogniskowym obiektywem. Fotografie zapisywano w rozdzielczości 4256 x 2832, przy minimalnej ogniskowej równej 70 mm. Jest to rejestracja nadmiarowa względem ludzkiej percepcji, zatem rozdzielczość była ograniczana do wartości 1600 x 1200 pikseli. Poprawna rejestracja obrazu obejmuje również odpowiedni dobór parametrów takich jak ostrość, balans bieli czy czas ekspozycji.

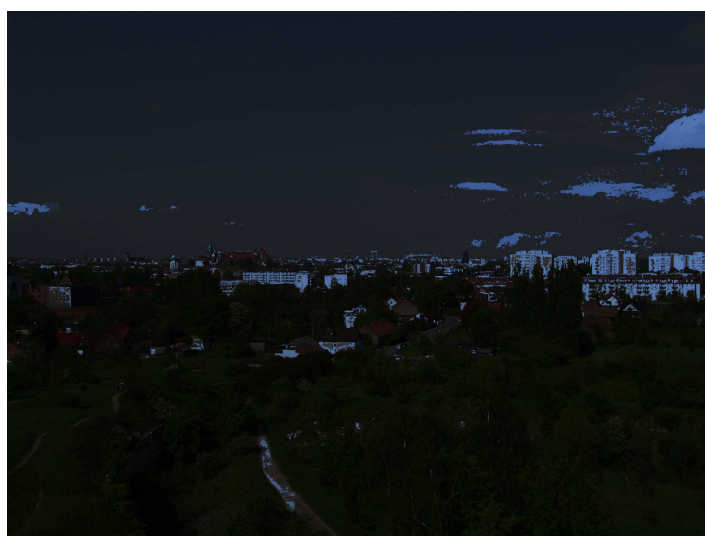
4.2. Segmentacja obrazu

Równie ważnym etapem przygotowania obrazu do przeprowadzenia pomiaru wymiaru pudełkowego jest jego segmentacja. W przypadku procesu przygotowującego fotografię krajobrazową do analiz segmentacja polega na wyróżnieniu obiektów pochodzenia antropogenicznego, które zazwyczaj ogranicza się do samych budynków. Ich automatyczna selekcja jest jednak bardzo kłopotliwa i jako taka nie stanowi przedmiotu rozważań w niniejszej pracy. Związane jest to z wieloma różnymi czynnikami. Proces segmentacji oparty na analizie barw w świetle widzialnym może generować błędne wyniki ze względu na ich ogromną różnorodność występującą zarówno w przyrodzie, jak i w obiektach wytworzonych przez człowieka (rys. 4.4).

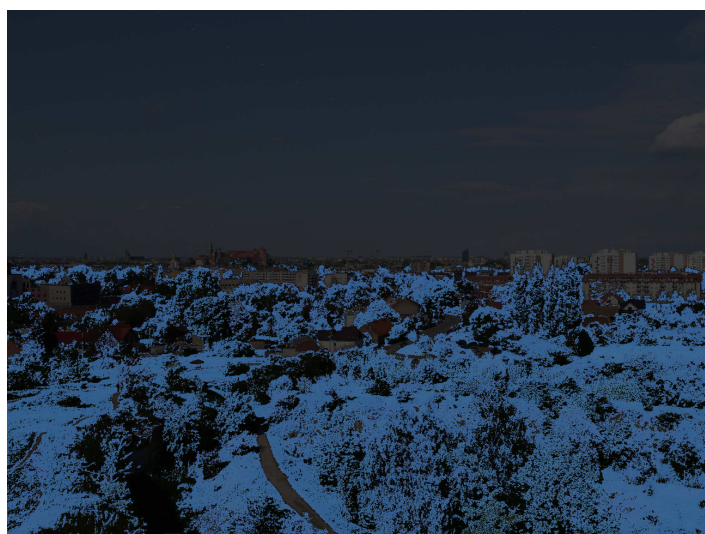
Podjęta została również próba segmentacji oparta na metodach znanych z teledetekcji [51, 58], a bazująca na fotografiach wykonanych w zakresach poza spektrum światła widzialnego. Do tego celu został użyty specjalnie przystosowany aparat DSLR Nikon D90, z którego matrycy zostały usunięte filtry blokujące promieniowanie UV oraz IR, wraz z obiektywem przepuszczającym wspomniane zakresy fal. Dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów



(a) Oryginalna fotografia



(b) Segmentacja automatyczna oparta na barwie budynków

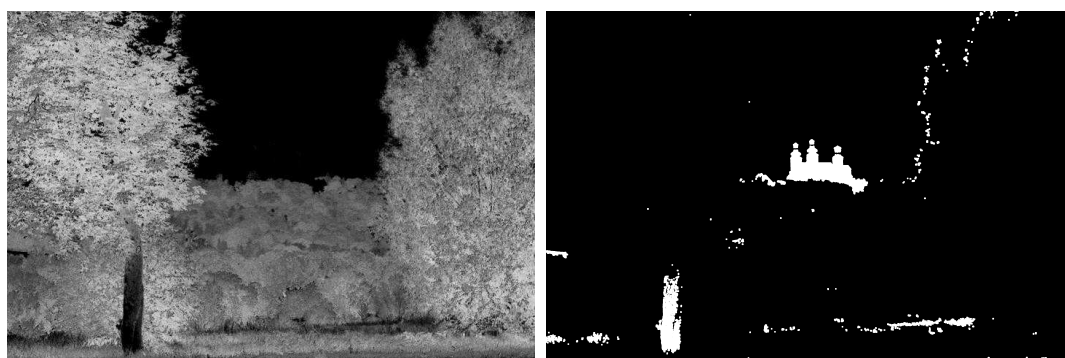


(c) Segmentacja automatyczna oparta na barwie zieleni

Rysunek 4.4: Fotografia krajobrazowa i próby automatycznej segmentacji opartej na barwie rejestrowanej w świetle widzialnym



(a) Fotografia wykonana w świetle widzialnym (b) Fotografia uwzględniająca bliską podczerwień

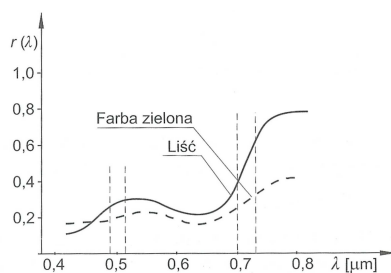


(c) Wskaźnik wegetacji NDVI

(d) Odfiltrowanie tła i elementów roślinnych

Rysunek 4.5: Segmentacja automatyczna bazująca na fotografiach wykonanych w zakresie poza spektrum światła widzialnego [32]

absorpcyjnych nakładanych na obiektyw możliwe było zarejestrowanie na fotografiach światła o różnych długościach fali, z których najbardziej istotna była bliska podczerwień. Zabieg ten pozwolił na zastosowanie wskaźników wegetacji NDVI oraz EVI pozwalających na wyróżnianie roślin, stosowanych w rozpoznaniu satelitarnym [51]. Odpowiednie połączenie kanałów spektrum światła widzialnego i podczerwieni wraz z zastosowaniem operacji morfologicznych pozwoliło na odfiltrowanie z obrazu elementów roślinnych (rys. 4.5) [32].



Rysunek 4.6: Widmowy współczynnik odbicia dla liścia zielonego i farby ciemnozielonej [51]

Metoda ta pozwala na odróżnienie barwy zielonej występującej naturalnie w przyrodzie od analogicznej barwy wytworzonej przez człowieka, stosowanej przykładowo w celu pokrycia dachów (rys. 4.6). Jednak ze względu na fakt, iż bazuje głównie na odbiciu światła od zielonych części roślin, fragmenty pni, kwiatostanów czy też suchych traw nie są właściwie wykrywane (rys. 4.5d).

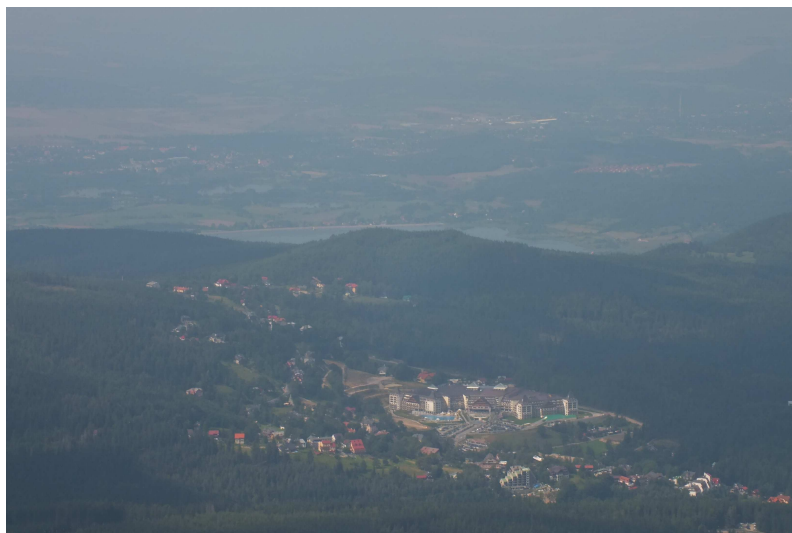
Ze względu na opisane trudności, podczas prac nad analizą fotografii krajobrazowych stosowana była metoda segmentacji manualnej, polegająca na ręcznym wyróżnianiu obiektów pochodzenia antropogenicznego. Po zakończonym procesie segmentacji otrzymywany jest obraz podzielony na dwie rozłączne klasy. W przedstawionych przypadkach będą to fragmenty zajmowane przez budynki (czarne) oraz białe tło (rys. 4.8).

Nie bez znaczenia jest również zapewnienie odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej analizowanych obrazów rozumianej zarówno jako rozmiar tegoż obrazu, jak i zagęszczenie jego pikseli. Istotnym warunkiem poprawności otrzymywanych wyników jest dbałość o to, aby analizowane obrazy przedstawiające różne stany miały jednakowy rozmiar przestrzenny. Wymagane jest również odpowiednie zagęszczenie pikseli na jednostkę obrazu, konieczne do odpowiedniej reprezentacji jego szczegółów (rys. 4.7).



Rysunek 4.7: Jakość reprezentacji obrazu w zależności od zagęszczenia pikseli, przy tym samym rozmiarze obrazu

Ograniczenia powodowane przez dyskretną reprezentację rastra, jak i sama procedura obliczania prostej regresji implikują możliwość występowania drobnych różnic w końcowym wyniku w zależności od warunków przeprowadzania pomiarów, czyli doboru odpowiednich wielkości w algorytmie. Niemniej ważna jest zatem konieczność przeprowadzania obliczeń dla różnych stanów przy tej samej liczbie kroków procedury pomiarowej (liczba punktów, z jakich obliczana jest prosta regresji), jak i przy zastosowaniu tych samych wielkości pudełek. Z powodu wspomnianych ograniczeń trudno jest, na obecnym etapie prac, wskazać jednoznacznie konkretną wartość liczbową, czy też procentową, przy której zmiana wartości wymiaru pudełkowego będzie uważana za istotną.



(a) Oryginalna fotografia



(b) Manualna selekcja budynków na wybranym fragmencie



(c) Segmentowany obraz przygotowany do analizy

Rysunek 4.8: Etapy przygotowania fotografii do analizy [30]

Analizy prowadzone na potrzeby architektury krajobrazu posiadają również pewne własne ograniczenia, wynikające ze specyfiki fotografii krajobrazowej. Na pierwszy plan wysuwa się tutaj duża trudność w przeprowadzeniu automatycznej segmentacji. W wielu przypadkach przeprowadzenie takiej procedury dyskwalifikuje dany obraz czyniąc go zupełnie bezużytecznym do pomiarów. Nie mniej istotny aspekt wynika z czynników zupełnie niezależnych od badaczy, czyli zmienności pór roku (rys. 4.9). Sezon zimowy charakteryzuje się (czy może raczej charakteryzować powinien) zaśnieżeniem obniżającym kontrast fotografii oraz utrudniającym rozpoznanie obiektów pochodzenia antropogenicznego. Z kolei w sezonie letnim, czynnikiem mogącym wpływać na otrzymywane wyniki jest roślinność, stanowiąca naturalne bariery przysłaniające niektóre elementy widoku. Potencjalnym rozwiązaniem jest tu wprowadzenie pewnej sezonowości analiz, co jednak nie we wszystkich przypadkach jest możliwe.



Rysunek 4.9: Utrudniona analiza krajobrazowa w sezonie zimowym

Rozdział 5

Badania wymiaru pudełkowego w analizie krajobrazowej 2D dla wybranych obiektów

Przedstawiona metoda została zastosowana w wielu analizach krajobrazowych, z których większość została opracowana na zlecenie przemysłu. Podczas obliczeń wymiaru pudełkowego na segmentowanych obrazach została wykorzystana zarówno autorska aplikacja, opracowana jako wtyczka do popularnego edytora grafiki rastrowej, programu GIMP, jak i funkcja biblioteczna wbudowana w środowisko obliczeniowo-programistyczne Matlab.

5.1. Apartamentowiec w miejsce istniejącego hotelu

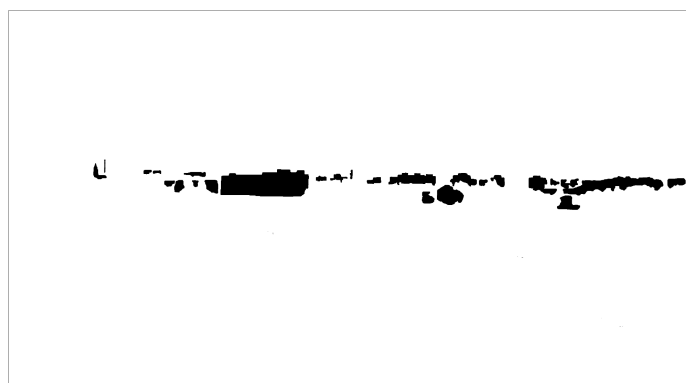


Rysunek 5.1: Widok na hotel - stan obecny

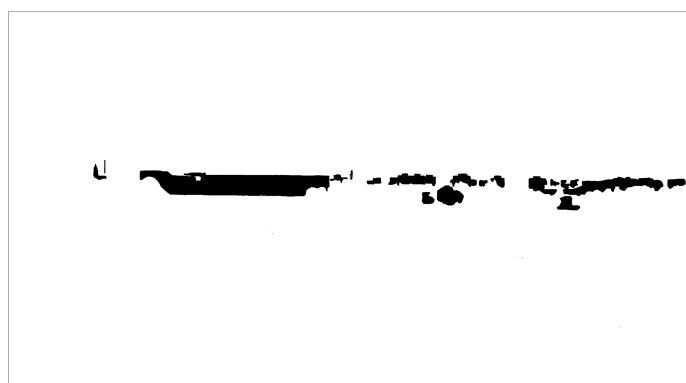
Jako pierwsze studium przypadku zostanie rozważona inwestycja, planowana w miejscu istniejącego hotelu, stojącego nad brzegiem rzeki (rys. 5.1). Hotel ten, oddany do użytku w końcu lat 80., jest od kilkunastu lat zamknięty z powodu złego stanu technicznego. Działka, na której się znajduje, posiada wysoce atrakcyjną lokalizację, zatem inwestor chciałby, po jego ewentualnym

wyburzeniu, wykorzystać jej potencjał do maksimum, równocześnie zwiększając swoje zyski z przedsięwzięcia. Jako przedmiot analizy przedstawione zostały trzy warianty zabudowy, porównane ze stanem istniejącym (rys. 5.2).

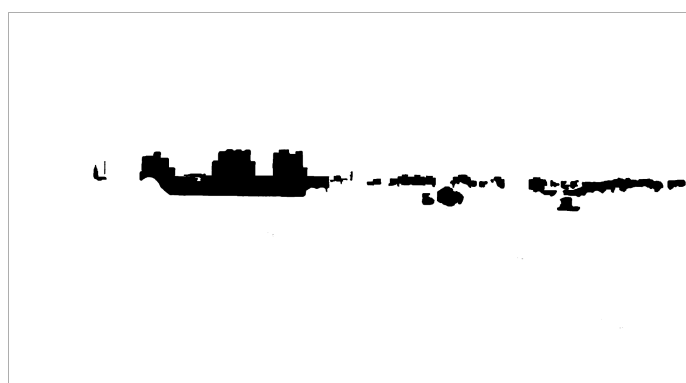
Punktem wyjścia do przeprowadzenia analiz był widok stanu obecnego (rys. 5.1, 5.2a). Na przedstawionych obrazach można zauważyć dominującą zwartą bryłę hotelu, oraz nieco bardziej rozproszone budynki okolicznej zabudowy. Zaznaczyć przy tym należy, iż bryła ta nie harmonizuje zbyt dobrze z otoczeniem, jakkolwiek po kilkudziesięciu latach stała się społecznie akceptowalna, dopóki nie została zamieniona w gigantyczną powierzchnię reklamową. Dla takiego widoku, zmierzony wymiar pudełkowy wynosi 1,664. Pierwsza zaprezentowana propozycja przyjmuje zabudowanie całej dostępnej działki pojedynczą budowlą o wysokości odpowiadającej istniejącemu hotelowi (rys. 5.2b). Przy tak określonych warunkach odnotowany zostaje wzrost wartości wymiaru pudełkowego do 1,705 (przyrost o 0,041). Jeszcze większy przyrost powoduje koncepcja, zakładająca wybudowanie zespołu wysokich budynków (rys. 5.2c). Z powodu bliskiej odległości do punktu widokowego powodują one zupełne zdominowanie panoramy miasta w tym miejscu, a tym samym wymiar pudełkowy osiąga wartość 1,738 (przyrost o 0,074). Ostatnią rozważaną wersją możliwości zabudowy jest wybudowanie na całej działce szeregu budynków o wysokości porównywalnej do istniejącego otoczenia. Obowiązuje przy tym założenie, iż inaczej niż w wariantcie pierwszym, budynki te nie będą tworzyły zwartej bryły lecz kilka oddzielnych (rys. 5.2d). Dla tak zdefiniowanej zabudowy otrzymana wartość wymiaru pudełkowego wynosi 1,647 (spadek o 0,017). Jest to zatem nie tylko najmniejsza różnica ze stanem istniejącym, ale również niewielkie obniżenie wartości mierzonego wymiaru. Wynik ten wskazuje, że ostatni przedstawiony wariant harmonizuje najlepiej z otoczeniem oraz zmiana charakteru krajobrazu (widzianego z tego konkretnego punktu widokowego) będzie najmniejsza [31]. Otrzymane wartości liczbowe potwierdzają intuicyjne odczucia wobec zaprezentowanych propozycji, jak również ocenę ekspercką, której zostały poddane.



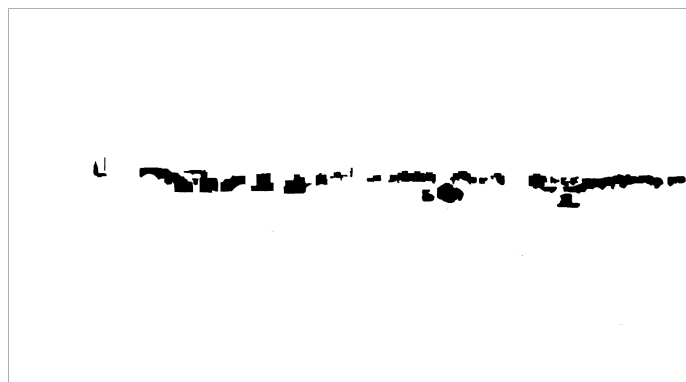
(a) Stan obecny



(b) Zwarta bryła o wysokości podobnej do istniejącego hotelu



(c) Wysokie budynki, dominujące w panoramie



(d) Kilka zgrupowanych budynków o wysokości nawiązującej do otoczenia

Rysunek 5.2: Różne propozycje zagospodarowania terenu w miejscu obecnego hotelu [31]

5.2. Hotel pośród gór

Krajobraz miejski, opisany w poprzedniej sekcji charakteryzuje się mniejszym lub większym stopniem zurbanizowania. Budowa rozległego obiektu w postaci hotelu czy galerii handlowej zazwyczaj budzi mniej kontrowersji pod względem środowiskowym niż konstrukcja podobnego obiektu w krajobrazie górskim. Podczas wędrowki szczytami Karkonoszy z wielu miejsc, zwłaszcza z tłumnie uczęszczanego szlaku na Śnieżkę, spoglądając w dół w stronę Karpacza na pierwszym planie daje się zauważyć masywna bryła niedawno powstałego hotelu (rys. 5.3). W tym przypadku analiza zostanie przeprowadzona w podobny sposób, jednak z uwagi na fakt, iż rzetelność przeprowadzania porównań wymaga, aby zostały one wykonane na fotografiach przedstawiających to samo ujęcie, nie zostały użyte fotografie archiwalne (bez bryły hotelu) lecz została przeprowadzona cyfrowa obróbka fotografii w celu usunięcia tejże bryły.



Rysunek 5.3: Widok ze szlaku na Śnieżkę w stronę Karpacza

Jako punkt bazowy, względem którego będą obliczane różnice w wymiarze pudełkowym, została przyjęta niska zabudowa w okolicy istniejącego hotelu, stanowiąca kontekst otoczenia (rys. 5.4a). Dla tak prezentującego się widoku obliczona wartość wymiaru pudełkowego wynosi 1,497. Analizując obraz reprezentujący stan istniejący można zauważyć masywną bryłę hotelu,



(a) Kontekst otoczenia bez bryły hotelu



(b) Stan istniejący z hotelem i przyległym parkingiem

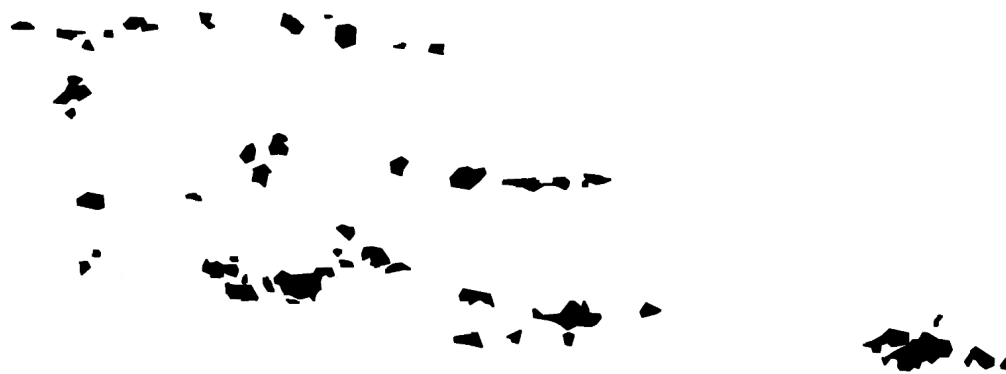


(c) Niska zabudowa w miejscu hotelu

Rysunek 5.4: Scenariusze zagospodarowania terenu [30]

mocno wybijającą się na pierwszy plan (rys. 5.4b). Znajduje to również odzwierciedlenie w wartości wymiaru pudełkowego, która to wzrasta do 1,605. Przyrost stanowi zatem ponad 10% całego przedziału, w jakim mogą się zawierać wartości wspomnianego wymiaru. Można to odnieść do sytuacji zaprezentowanej w badaniach wstępnych, gdzie zamiana cienkiej linii prostej na masywny prostokąt również pociągała za sobą podobny wzrost. Skłania to do wyciągnięcia wniosku, iż różnica pomiędzy obrazem 5.4a a 5.4b jest dość znacząca, co pociąga za sobą wniosek o równie znaczącej zmianie w charakterze krajobrazu. Gdyby jednak zamiast masywnego budynku w tym samym miejscu powstała grupa niskiej zabudowy wpisująca się niejako w kontekst otoczenia, spowodowałoby to przyrost wymiaru pudełkowego do 1,506 czyli o niecały 1% możliwych do osiągnięcia wartości, co można uznać za wielkość mało znaczącą [30].

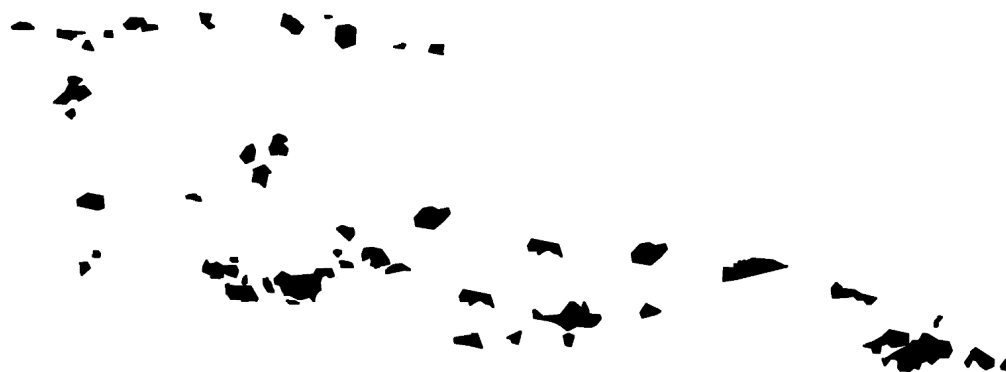
Warto również w tym kontekście rozważyć przypadek, przy nieco zmienionych warunkach początkowych (rys. 5.5). Scenariusze te zakładają mniejszą ilość zabudowy w kontekście otoczenia, co skutkuje mniejszą wartością wymiaru pudełkowego dla obrazu przedstawiającego ten właśnie kontekst (rys. 5.5a). Wspomniana wartość jest równa w tym przypadku 1,419. Dodanie bryły hotelu powoduje większy przyrost wymiaru pudełkowego niż dla wariantu z większą ilością zabudowy. Wzrost ten sięga 16% dostępnego przedziału, do wartości 1,578 (rys. 5.5b). Analogicznie jak w omawianym wcześniej przypadku, wstawienie w miejsce hotelu zabudowy zbliżonej charakterem do obecnie istniejącej powoduje marginalny wzrost wartości wymiaru pudełkowego do 1,429 (rys. 5.5c) [30].



(a) Kontekst otoczenia bez bryły hotelu



(b) Otoczenie wraz z bryłą hotelu



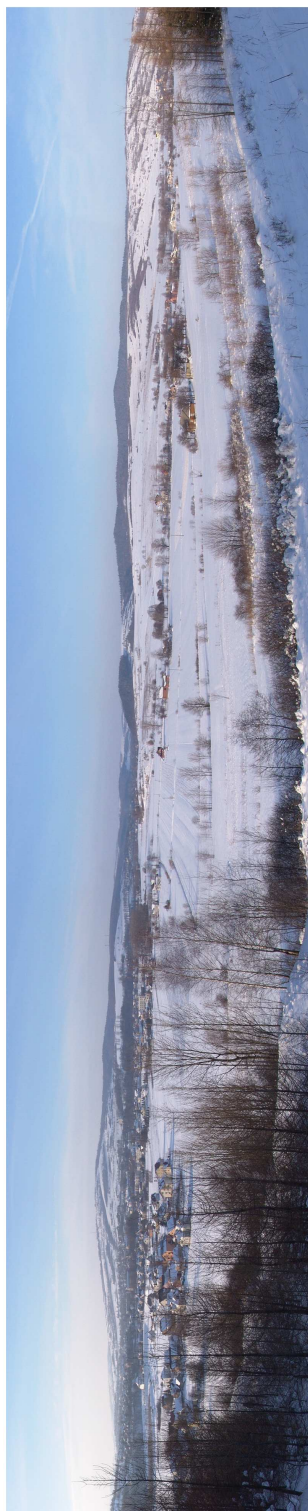
(c) Niska zabudowa w miejscu hotelu

Rysunek 5.5: Scenariusze przy innych warunkach początkowych

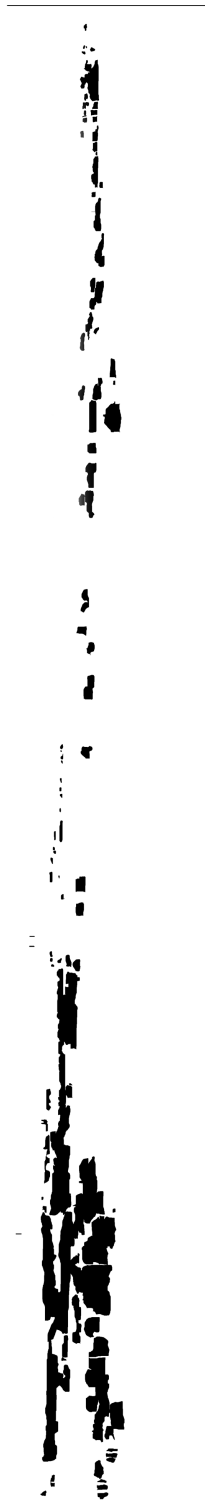
5.3. Farmy wiatrowe

Budowa elektrowni wiatrowych w naszym kraju, choć staje się coraz bardziej popularna, nadal wzbudza niekiedy wiele emocji. Wynikają one zarówno z niedostatecznego zrozumienia efektów inwestycji, jak i z rzeczowych tez dotyczących jej wpływu na środowisko. Poza argumentami podnoszonymi przez ekologów, dotyczącymi wpływu na żyjącą w okolicy faunę, równie często można spotkać się z dyskusją na temat wpływu farm wiatrowych na krajobraz. Z tego względu, firmy realizujące takie inwestycje potrzebują analiz eksperckich pozwalających ocenić ów wpływ. Autor pracy był w kilku przypadkach członkiem zespołu przeprowadzającego ekspertyzę dla planowanego przedsięwzięcia budowy farm wiatrowych w województwie podkarpackim. Opracowania takie powinny się opierać w jak największym stopniu na obiektywnych przesłankach, z tego też powodu jako jeden ze wskaźników uwzględnianych w prowadzonej analizie zastosowany został wymiar pudełkowy.

Miejsca przeprowadzenia wizji lokalnej zostały wyznaczone na podstawie metody opisanej w podrozdziale 4.1. Były one zlokalizowane w większości przypadków na uczęszczanych szlakach turystycznych lub w granicach istniejących rezerwatów przyrody. Z każdego wyznaczonego punktu zostało następnie wykonane ujęcie panoramiczne, obrazujące teren planowanej inwestycji wraz z kontekstem otoczenia (rys. 5.6, 5.7). Po wyróżnieniu elementów kulturowych oraz przeprowadzeniu wizualizacji farmy wiatrowej możliwe było obliczenie wymiaru pudełkowego dla każdego z punktów widokowych. W przypadku farmy zlokalizowanej w okolicach Dukli (rys. 5.6) jego wartości osiągały 1,646 dla stanu „przed” i 1,631 „po” realizacji inwestycji. Dla drugiej inwestycji zlokalizowanej w pobliżu Iwonicza (rys. 5.7) wynosiły one odpowiednio 1,526 oraz 1,548. W obu przypadkach można zatem mówić o niewielkiej różnicy, a co za tym idzie o niewielkim wpływie na badany krajobraz. Wnioski te zostały potwierdzone poprzez analizę innych wskaźników oraz ocenę ekspercką. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż w kontekście otoczenia oprócz zabudowań, rozumianych jako budynki, zostały również uwzględnione takie elementy jak maszty linii wysokiego napięcia oraz przebiegów telefonii komórkowej.



(a) Oryginalna panorama

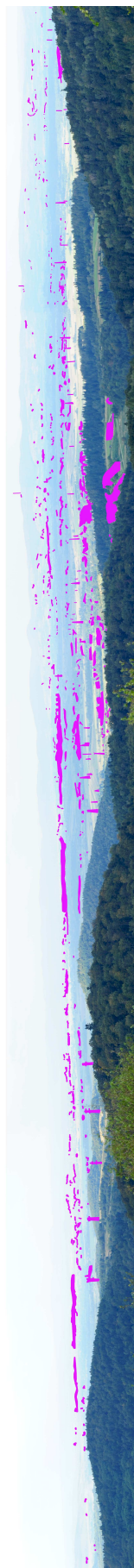


(b) Kontekst otoczenia z wyróżnionymi elementami pochodzenia antropogenicznego



(c) Otoczenie wraz z projektowaną farmą wiatrową

Rysunek 5.6: Panorama doliny rzeki Jasionka ze stoku Małej Góry



(a) Panorama z zaznaczonymi elementami kulturowymi



(b) Panorama z uwzględnieniem projektowanej farmy wiatrowej



(c) Rysunek (a) zbinaryzowany



(d) Rysunek (b) zbinaryzowany

Rysunek 5.7: Panorama z Przymiarek

5.4. Podsumowanie

Zaprezentowane badania przeprowadzone zarówno na obrazach wygenerowanych sztucznie jak i podczas rzeczywistych analiz fotografii potwierdzają użyteczność wymiaru pudełkowego w różnych aspektach analizy obrazu. Eksperymenty wstępne, zaprezentowane w rozdziale 3 wykazują istnienie zależności pomiędzy charakterem zmiany wprowadzanej do obrazu, a zmierzoną wartością wymiaru pudełkowego. Odzwierciedlają to również testy empiryczne, opracowane podczas prac nad różnorodnymi ekspertyzami opracowywanymi na potrzeby przemysłu. Otrzymane wyniki, stojące w zgodzie zarówno z intuicją, jak i z oceną ekspercką, są rezultatami bazującymi na obiektywnym aparacie matematycznym i pozwalają traktować wymiar pudełkowy jako jeden ze wskaźników wspomagających wydawanie obiektywnych opinii. Zastosowanie opisywanej metody może dotyczyć każdego przypadku, w którym konieczne jest porównanie ze sobą obrazów przedstawiających kilka różnych stanów, czy to w architekturze krajobrazu, medycynie czy teledetekcji. Zwraca jednak uwagę fakt, iż każda z analiz powinna być rozpatrywana osobno, we własnym kontekście. Jak bowiem zostało podkreślone, zupełnie różne obiekty mogą posiadać bardzo zbliżony wymiar pudełkowy. Na obecnym etapie badań nie jest zatem możliwe wyznaczenie wartości granicznej, odpowiedniej dla każdego przypadku. Nie można jednak bez dyskusji pozostawić pewnych problemów dotyczących zarówno samej metody jak, i jej zastosowania w dziedzinie architektury krajobrazu.

Bardzo istotne z punktu widzenia poprawności otrzymywanych wyników wydaje się być odpowiednie przygotowanie obrazu do analizy. Aspekt ten obejmuje zarówno odpowiednią rejestrację (podrozdział 4.1) jak i segmentację (podrozdział 4.2). Nie bez znaczenia jest również miejsce wykonywania fotografii. Choć sposób wyznaczania odpowiednich punktów jest poparty solidną podbudową naukową (podrozdział 4.1), aby zminimalizować ryzyko ewentualnego błędu w interpretacji wyników należałoby wykonać analizy z jak największej liczby takich punktów, co nie zawsze jest fizycznie możliwe. Z pomocą przychodzi tu kolejna opracowana metoda, opisana w następnej części.

Rozdział 6

Badania wstępne wymiaru pudełkowego w analizie obiektów trójwymiarowych

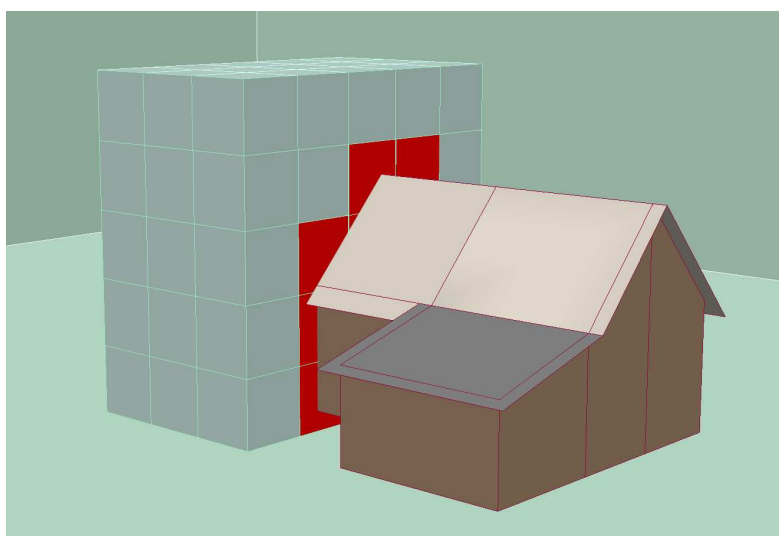
6.1. Wprowadzenie

Pomiar wymiaru pudełkowego na obrazach cyfrowych jest zadaniem relatywnie łatwym, z uwagi na ich reprezentację. Istnieje wprawdzie wiele różnych formatów plików graficznych, w których te obrazy mogą być zapisywane, jednak ostatecznie w środowisku obliczeniowym w pamięci komputera przyjmują one zazwyczaj postać macierzy dwu- lub trójwymiarowej. Do jednoznacznego opisu punktów danego obrazu wystarczy znać współrzędne danego piksela i jego barwę. Może ona być zadeklarowana przykładowo odcieniami szarości w obrazach monochromatycznych, trójką RGB w obrazach barwnych lub jedną z liczb 0 lub 1 dla obrazów binarnych. W przypadku scen trójwymiarowych sytuacja znacznie się komplikuje. Istnieją wprawdzie metody ich opisu przeniesione z dwuwymiarowych odpowiedników, bazujące na wkselach, jednak są używane do specyficznych zastosowań. Można wśród nich wymienić chociażby analizę modeli otrzymanych ze skanera MRI. Dla takiego typu danych istnieją też algorytmy pozwalające na pomiar wartości wymiaru pudełkowego [49]. Podejście przedstawione w niniejszej pracy odbiega znacznie od tego rozwiązania, bazując na obiektowym opisie sceny trójwymiarowej. Obiektem w tym przypadku może być jednak zarówno bryła CSG, jak i siatka wielokątowa czy też zamknięta powierzchnia. Opis każdego z tych obiektów jest nieco inny, co pociąga za sobą konieczność zmian w konstrukcji algorytmu. Istnieje oczywiście możliwość konwersji pomiędzy poszczególnymi typami danych, jakkolwiek ze względu na ich specyfikę nie zawsze jest to korzystne. Należy również wspomnieć o dodatkowej różnicy względem istniejących rozwiązań. Opracowane do tej pory algorytmy skupiały się głównie na obliczeniu wymiaru pudełkowego dla konkretnego **obektu**. Takim obiektem mógł być fraktal klasyczny (np. gąbka Menger), obiekt posiadający cechy fraktalne (np. model kalafiora), czy też dowolny inny (np. ludzki mózg w obrazowaniu MRI). Rozwiązanie przedstawione w niniejszej pracy skupia się na pomiarze wymiaru pudełkowego dla dowolnej

grupy obiektów, znajdujących się w określonej **przestrzeni**. Takie podejście posiada szersze możliwości zastosowania, zwłaszcza w architekturze krajo-
brazu.

Jako środowisko przetwarzania scen trójwymiarowych został wybrany program Autodesk 3ds Max. Za pomocą dołączonego edytora programistycznego MaxScript zostały stworzone aplikacje eksportujące dane z obiektów zawartych w scenie do plików zewnętrznych. Dane te są następnie przekazywane do wykorzystywanego już podczas obliczeń 2D pakietu Matlab, w którym zostały również stworzone odpowiednie aplikacje, umożliwiające ich przetworzenie oraz obliczenie wymiaru pudełkowego.

Procedura pomiaru wymiaru pudełkowego w środowisku trójwymiarowym jest analogiczna do tej stosowanej dla obrazów dwuwymiarowych, opisanej w punkcie 2.3.2. Występuje w niej jednak pewna istotna różnica. Podczas analizy struktur dwuwymiarowych przestrzeni, w której odbywały się obliczenia była płaszczyzna obrazu. Scena trójwymiarowa może być natomiast bardzo rozległa, dlatego też jest ona limitowana do pewnego rozmiaru w taki sposób, aby w ograniczonej przestrzeni znalazły się wszystkie istniejące w scenie obiekty. Następnie dzielona jest na „oczka siatki” czyli sześciany (pudełka) o określonej długości krawędzi (rys. 2.5). Każdy z sześcianów jest sprawdzany pod kątem zawierania w sobie fragmentów obiektów znajdujących się w scenie. Sześcian, w którym znajduje się choć fragment obiektu, lub który w całości zawiera się w obiekcie jest zliczany jako wypełniony (rys. 6.1).



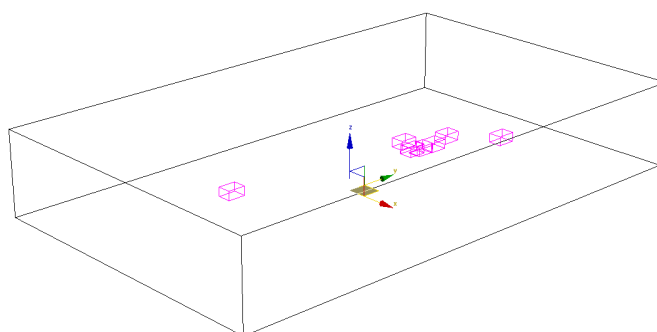
Rysunek 6.1: Fragment pokrycia przestrzeni jednakowej wielkości pudełkami. Elementy zawierające obiekt zaznaczone są na czerwono

W kolejnym kroku pudełka te są zmniejszane i znów znajdowana jest liczba pudełek wypełnionych. Dolna granica wielkości pudełka nie jest tu wyznaczona przez zdolność rozdzielczą urządzenia. Dla obrazów dwuwymiarowych granicą tą był jeden piksel. W scenie trójwymiarowej pudełka mogą osiągać wielkości poniżej jednej jednostki (wymiarowej lub bezwymiarowej), dlatego też dolna granica została ustalona na 1 metr, co odpowiada dokładności w skali urbanistycznej [7]. Zgodnie z opisaną teorią pomiaru, ostatnim krokiem jest obliczenie wartości wymiaru pudełkowego na podstawie współczynnika kierunkowego prostej regresji, otrzymanej z wykresu logarytmicznego. Wymiar ten w przestrzeni trójwymiarowej może osiągać wartości pomiędzy 2.0 a 3.0.

6.2. Algorytm brutalny

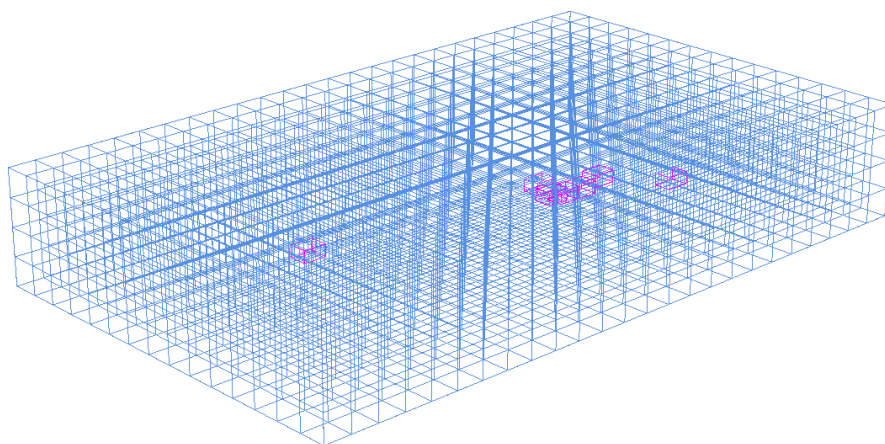
Pierwszy etap badań polegał na skonstruowaniu algorytmu, liczącego wymiar pudełkowy wprost z definicji. Tak przygotowany algorytm, zwany brutalnym, nie bierze pod uwagę specyfiki danego zadania, lecz w sposób „bezmyślny” przeszukuje wszystkie dostępne możliwości [63].

Scena testowa została wykonana jako grupa obiektów typu *box* (prostopadłościan) wraz z przestrzenią ograniczającą (rys. 6.2). Algorytm wypełnia wspomnianą przestrzeń pudełkami (sześcianami) o jednakowych wymiarach, tworząc regularną, przestrzenną siatkę, która zawiera w sobie wszystkie istotne obiekty w scenie (rys. 6.3).



Rysunek 6.2: Przykładowa scena z kilkoma obiektami i przestrzenią ograniczającą

Każde z pudełek jest następnie poddawane działaniu wewnętrznej funkcji programu 3ds Max o nazwie *intersects*, która sprawdza kolizję dwóch węzłów



Rysunek 6.3: Przykładowe wypełnienie przestrzeni jednorodnymi pudełkami

sceny. Przez węzły rozumiane są w tym przypadku obiekty typu box (elementy sceny lub pudełka), natomiast sprawdzenie kolizji jest rozumiane jako określenie czy dwa dane węzły w jakiś sposób zajmują ten sam fragment przestrzeni. Najmniejszy krok algorytmu polega zatem na sprawdzeniu przecięcia pojedynczego pudełka z każdym występującym w scenie obiektem. Jest to zatem algorytm bardzo nieefektywny obliczeniowo, którego czas działania zależy zarówno od liczby obiektów w scenie, jak i od wielkości przestrzeni ograniczającej. Jest on jednak łatwy w implementacji i stanowi dobrą bazę do przeprowadzenia testów numerycznych, jak również podłoże do wygenerowania wzorcowych wyników, które następnie będą porównywane z efektami działania algorytmów bardziej złożonych.

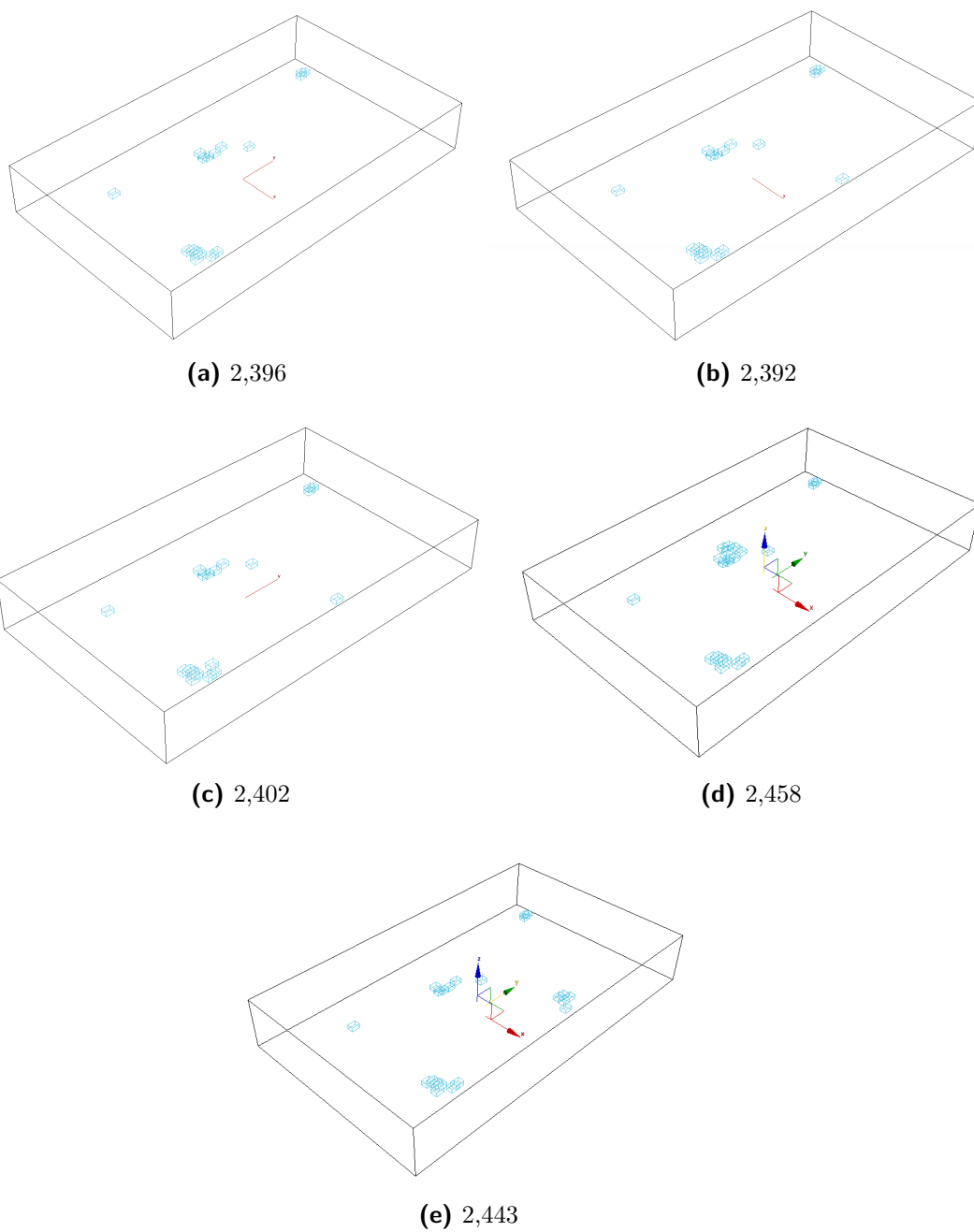
Należy mieć na uwadze, iż przestrzeń ograniczająca jest również reprezentowana jako obiekt sceny, typu prostopadłościan. Została ona jednak wyłączona z obliczeń przez mechanizmy zabezpieczające. Mechanizmy takie zostały również zastosowane w celu eliminacji zduplikowanych obliczeń liczby pudełek wypełnionych. Może się bowiem zdarzyć, iż do danego pudełka będą należeć fragmenty dwóch obiektów. Ponieważ dla każdego oczka siatki analizowane jest przecięcie z każdym obiektem, zatem w tego typu sytuacjach może wystąpić duplikacja - pudełko będzie uznane za wypełnione raz przez jeden obiekt, raz przez drugi. Z uwagi na fakt, iż każdy obiekt w scenie, a więc również każde pudełko, może zostać jednoznacznie zidentyfikowane,

pudełko raz przyporządkowane do jednego obiektu jest oznaczane odpowiednią flagą i nie jest brane pod uwagę w kroku algorytmu analizującego kolizję z kolejnymi obiektami.

6.3. Testy numeryczne

W celu sprawdzenia użyteczności pomiaru wymiaru pudełkowego w przestrzeni trójwymiarowej zostało przeprowadzone wiele testów, analogicznych do zaprezentowanych dla obliczania wymiaru pudełkowego w analizie obrazów 2D. W celu zapewnienia wiarygodności wyników, podczas prowadzenia badań nie zmieniał się zarówno rozmiar przestrzeni ograniczającej, jak i położenie obiektów względem tej przestrzeni. Niezmienne pozostały również wielkości niezbędne do prawidłowego prowadzenia obliczeń w dwóch wymiarach, czyli liczba kroków procedury oraz rozmiary pudełek w poszczególnych krokach. Zostały one ustalone na 10 kroków oraz wielkość zmieniającą się od 10 jednostek do 1 z krokiem co 1.

Scena testowa została utworzona na podstawie fragmentów rzeczywistej zabudowy wiejskiej zlokalizowanej w województwie małopolskim. Poddana jednak została pewnym modyfikacjom, polegającym na ujednoczeniu występujących w niej obiektów w celu łatwiejszego przeprowadzenia testów (rys. 6.4). Sceną odniesienia będzie układ składający się z trzech grup obiektów, odpowiadających istniejącej zabudowie zwartej oraz kilku odseparowanych, jak w zabudowie rozproszonej (rys. 6.4a). Dla tak skonstruowanego układu wymiar pudełkowy osiąga wartość równą 2,396. Do tej sceny zostały następnie dołożone obiekty w różnych konfiguracjach i dla każdej z nich obliczona nowa wartość wymiaru pudełkowego. Pierwszy testowany scenariusz polegał na utworzeniu dodatkowego obiektu o takich samych wymiarach w pewnej odległości od obiektów już istniejących (rys. 6.4b). Nie wpłynął on w znaczący sposób na charakter badanej sceny, co znalazło również potwierdzenie w wartości wymiaru pudełkowego, która zmniejszyła się o 0,004. Podobnie rzecz się ma w przypadku wykreowania dodatkowego obiektu, który nie zostanie odseparowany, lecz umiejscowiony w grupie już istniejących (rys. 6.4c). Różnica w wartości wymiaru od sceny odniesienia również jest w tym przypadku niewielka i wynosi 0,006. Nieco inaczej wygląda sytuacja podczas tworzenia dodatkowych obiektów, o tych samych wymiarach, lecz w nieco większej liczbie. Skutkuje to powstaniem grupy, dla której można również rozważyć dwie lokalizacje - w grupie już istniejących, bądź też odseparowane (rys. 6.4d, 6.4e). W obu scenariuszach wartość wymiaru pudełkowego jest

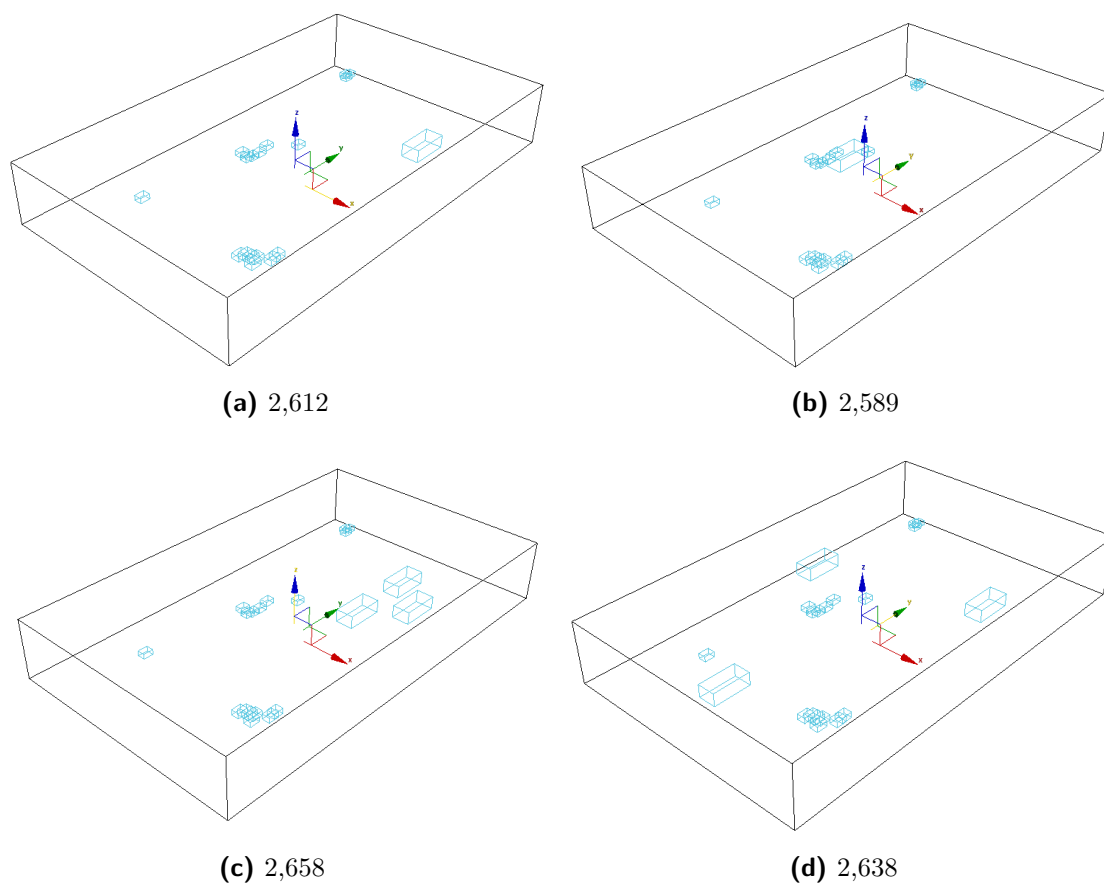


Rysunek 6.4: Sceny testowe wraz z wymiarami pudełkowymi

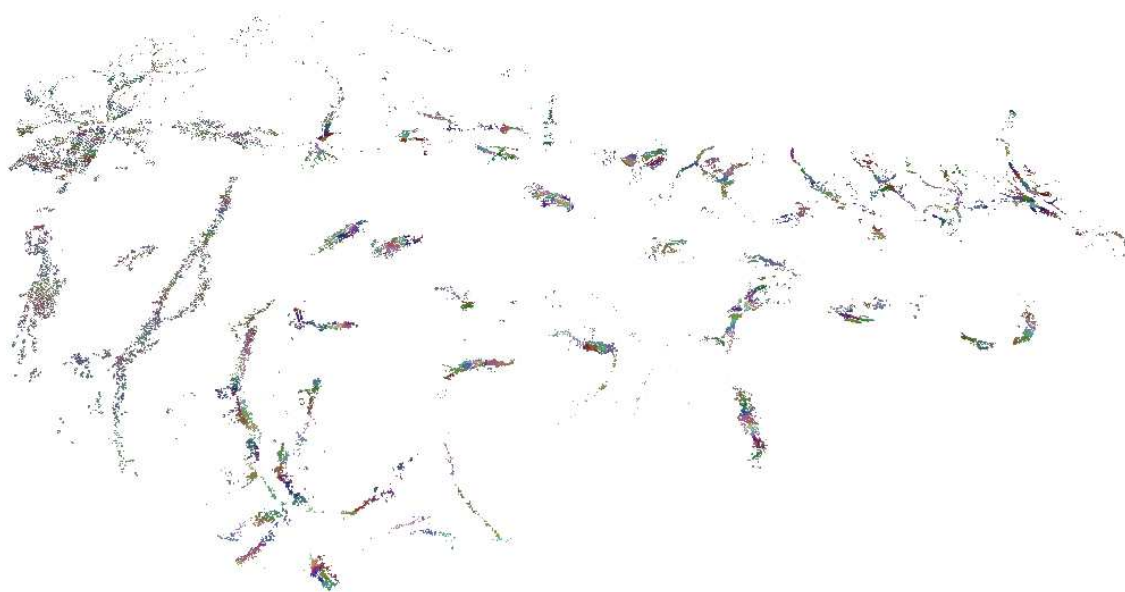
większa niż w przypadku sceny odniesienia i jednocześnie większa niż w scenach z dołożonym jednym obiektem. Wynosi ona odpowiednio 2,458 (wzrost o 0,062) i 2,443 (wzrost o 0,047).

Podobnie jak w przypadku dwuwymiarowym, warto również rozważyć scenariusze, w których nowy obiekt, dokładany do sceny odniesienia różni się od tych już istniejących. W opisywanym przykładzie testowym różnica ta będzie polegać na zmianie jego wymiarów. Pierwszym rozważanym scenariuszem z tej grupy będzie utworzenie wspomnianego większego obiektu w miejscu odseparowanym od pozostałych istniejących (rys. 6.5a). Obiekt ten wyraźnie wyróżnia się spośród innych, powodując zmianę charakteru rozważanego otoczenia. Znajduje to odzwierciedlenie w zmierzonej wartości wymiaru pudełkowego, która rośnie do 2,612. Stanowi to przyrost o 21,6% przedziału [2.0 3.0], w jakim mogą się zawierać te wartości, a zatem jest to różnica istotna. Dodanie takiego obiektu do grupy już istniejących powoduje przyrost nieco mniejszy, jednak w dalszym ciągu dużo bardziej znaczący niż podczas tworzenia obiektów o wymiarach podobnych do już istniejących (rys. 6.5b). Kolejne rozważane scenariusze zakładały utworzenie kilku obiektów o większych rozmiarach, zarówno zgrupowanych, jak i w układzie rozproszonym (rys. 6.5c, 6.5d). Zmierzone dla nich wartości wymiaru pudełkowego to odpowiednio 2,658 oraz 2,638 (przyrosty o 0,262 oraz 0,242). Można zatem zaobserwować analogiczną prawidłowość, jak dla przykładów dwuwymiarowych - zwiększanie liczby obiektów o podobnym charakterze do już istniejących nie prowadzi do dużych modyfikacji wartości wymiaru pudełkowego, natomiast dodanie obiektów odmiennych zmianę taką powoduje.

Przedstawione testy, przeprowadzone na przykładowych scenach wykazały użyteczność wymiaru pudełkowego jako wskaźnika służącego do szacowania wpływu przekształceń, wprowadzanych do danego modelu, a co za tym idzie również zmian dotyczących rzeczywistej sytuacji, do której odnosi się dany model. Spory problem stanowi jednak czas działania algorytmu, który jest zależny od rozmiaru analizowanej przestrzeni. Dla scen testowych, których rozmiar był rzędu $1,5 \cdot 10^7$ jednostek, czas ten liczony był w godzinach. Dla dużych zadań, rzędu $1,2 \cdot 10^{11}$ (rys. 6.6) byłyby on zatem całkowicie nieakceptowalny.



Rysunek 6.5: Sceny testowe wraz z wymiarami pudełkowymi



Rysunek 6.6: Model zabudowań w dolinie, przykład dużego zadania obliczeniowego

Rozdział 7

Model AABB

Algorytm brutalny został stworzony jako baza do testów numerycznych, mających wykazać zasadność (bądź jej brak) stosowania wymiaru pudełkowego w zadaniach analizy przestrzeni trójwymiarowej. Jego największą wadą była zależność czasu działania od rozmiaru przestrzeni, w jakiej był wykonywany. Środowisko programistyczne MaxScript nie pozwalało na łatwe jego zrównoleżenie, jak i na bardziej skomplikowane operacje na złożonych strukturach danych. Zostało ono bowiem stworzone głównie na potrzeby ułatwiania pracy modelerom oraz animatorom [40]. Z tego też względu program 3ds Max, w którym odczytywane były przestrzenne modele scen, został podczas tworzenia nowego algorytmu potraktowany jako element pośredni, służący eksportowi danych do środowiska obliczeniowego Matlab. Stworzony algorytm oraz prowadzone obliczenia dostosowane zostały do specyfiki danego modelu. W niniejszym rozdziale zaprezentowany zostanie sposób prowadzenia tych obliczeń oparty na modelu **AABB** (akronim ang. *Axis Aligned Bounding Box*), który oznacza najmniejszy prostopadłościan kompletnie otaczający dany obiekt, ułożony równolegle z osiami układu współrzędnych [33, 65].

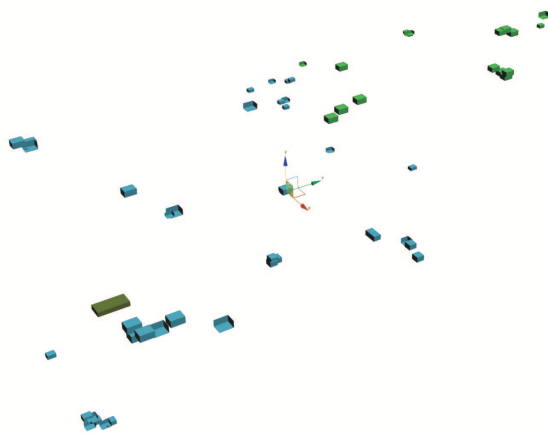
7.1. Konstrukcja modelu

Każda scena trójwymiarowa składa się z pewnej liczby obiektów o mniejszym lub większym stopniu złożoności. Każdy taki obiekt posiada swoje unikatowe właściwości, które są zależne od jego typu. W najprostszym przypadku obiektami tymi są bryły typu sześcian lub prostopadłościan. Taka konstrukcja ma swoje zalety, z których na pierwsze miejsce wysuwa się łatwość opisu. Każdy prostopadłościan jest jednoznacznie wyznaczony przez 8 swoich wierzchołków. W celu zmniejszenia liczby przechowywanych danych można jednak opis ten uprościć, podając jedynie współrzędne punktu centralnego (stanowiące jednocześnie wektor przesunięcia punktu centralnego względem środka układu współrzędnych świata) oraz długości trzech krawędzi, rów-

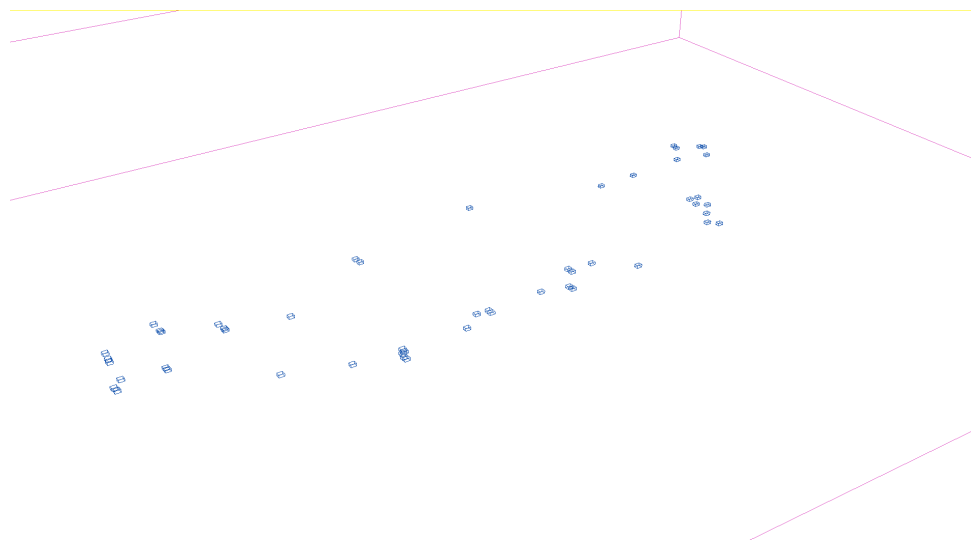
noległych do lokalnego układu współrzędnych [40]. W przypadku bardziej ogólnym do parametrów tych dochodzi jeszcze macierz obrotu. W prezentowanym w tej części modelu nie będzie jednak ona brana pod uwagę, gdyż wszystkie obiekty będą ułożone równoległe do globalnego układu współrzędnych. Użycie prostopadłościanów związane jest z możliwością uogólnienia takiego układu na przypadki bardziej złożone, mogą one bowiem stanowić tzw. bounding box. Jest to szczególny przypadek bryły brzegowej (ang. *bounding volume* - objętość ograniczająca), czyli bryły przedstawiającej w uproszczony sposób jak najmniejszą przestrzeń, w której całkowicie mieści się dany obiekt (obiekty) [64]. Połączenie wspomnianych cech prowadzi do definicji używanych w tej części obiektów.

7.2. Konstrukcja algorytmu

W odróżnieniu od algorytmu brutalnego, algorytm stworzony na potrzeby modelu AABB uwzględnia już specyfikę danego zadania. W środowisku programu 3ds Max konieczne jest stworzenie modelu odpowiadającego założeniom, tzn. zawierającego obiekty typu AABB (rys. 7.1) oraz dodatkowy element, stanowiący przestrzeń ograniczającą (rys. 7.2). Cały model jest następnie eksportowany do pliku tekstowego, za pomocą stworzonego do tego celu skryptu i odczytywany odpowiednim skrypcem przez środowisko Matlab. Zgodnie z konstrukcją opisaną w poprzednim akapicie, na dane te składają się współrzędne X, Y, Z punktu centralnego danego obiektu, oraz długości krawędzi w kierunku osi X, Y i Z (Listing 7.1).



Rysunek 7.1: Przykładowa scena składająca się z obiektów typu AABB



Rysunek 7.2: Fragment modelu z obiektami AABB (kolor niebieski) oraz bryłą stanowiącą przestrzeń ograniczającą (kolor magenta)

Listing 7.1: Fragment pliku zawierającego dane o modelu AABB

```
[ -190 ,293.984 ,433.709] 15.0 20.0 10.0
[ 0.125 ,24.6719 ,451.541] 46.23 63.22 20.0
[110.813 ,367.281 ,439.208] 15.0 41.6 10.0
```

Opracowane rozwiązanie opiera się nie na przeszukiwaniu przestrzeni, jak w algorytmie brutalnym, lecz na analizie każdego znajdującego się w scenie obiektu. Metoda ta nie może być zastosowana w przypadku rastrowych obrazów dwuwymiarowych, gdyż składają się one z niezależnych od siebie pikseli. Dopiero zgrupowanie pewnej liczby pikseli może zostać uznane za obiekt, jednak jego opis często bywa operacją skomplikowaną. Również przestrzeń trójwymiarowa opisana za pomocą voxeli nie może być polem działań przedstawionej metody z analogicznego powodu.

Podobnie jak w testach numerycznych (opisanych w podrozdziale 6.3), liczba kroków procedury pomiarowej została ustalona na 10, natomiast wielkości pudełek zmieniały się od 10 do 1 z krokiem co 1. Przyjęty przelicznik zakładał, że jedna jednostka odpowiadała jednemu metrowi. W każdym kroku procedury algorytm wykonuje szereg następujących po sobie operacji.

Lokalizacja obiektu

Każdy z opisanych w scenie obiektów jest lokalizowany w przestrzeni ograniczającej, a zatem znajdowana jest jego odległość od narożnika tej przestrzeni, stanowiącej obszar obliczeń (rys. 7.3), zgodnie z ogólnym wzorem

$$d_{xyz} = |init_{xyz} - (ob_{center} \pm 0.5 \cdot ob_{sizexyz})| \quad (7.1)$$

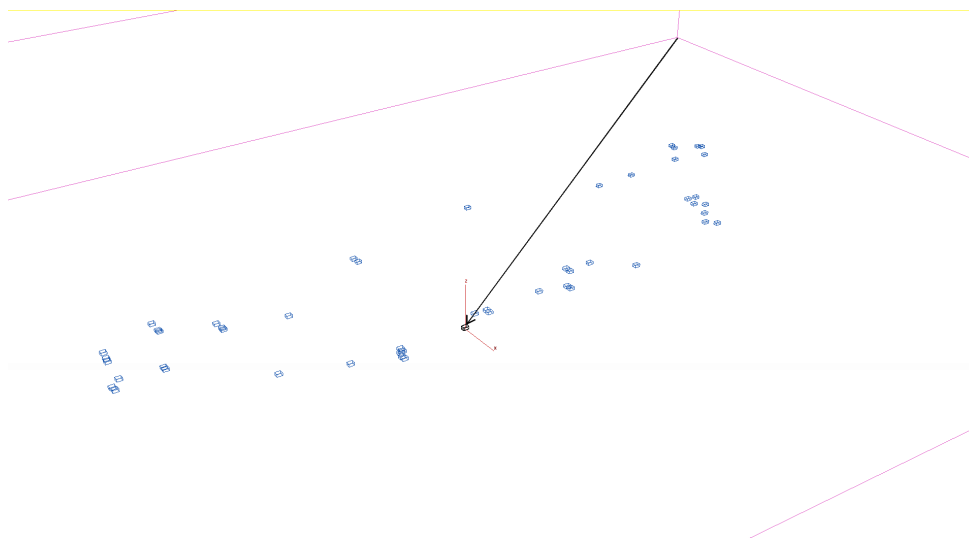
gdzie:

d_{xyz} - odległość obiektu od narożnika obszaru obliczeń,

$init_{xyz}$ - współrzędne narożnika obszaru obliczeń,

ob_{center} - współrzędne centrum obiektu,

$ob_{size_{xyz}}$ - długość krawędzi obiektu po danej osi.



Rysunek 7.3: Lokalizacja obiektu w przestrzeni ograniczającej

Utworzenie podprzestrzeni obiektu

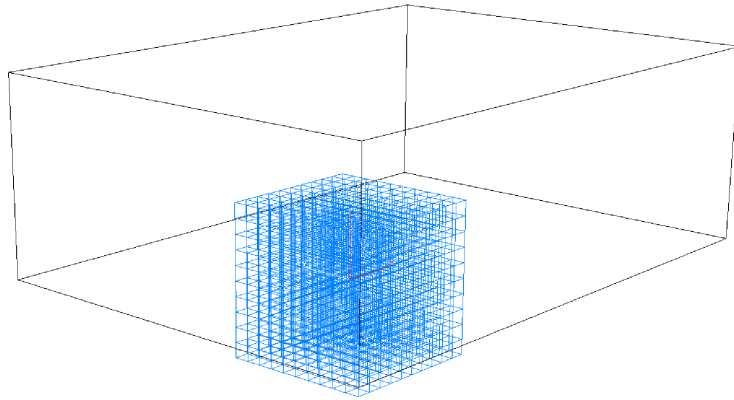
Na podstawie obliczonej lokalizacji algorytm tworzy podprzestrzeń dla danego obiektu, w zależności od danego kroku procedury, czyli od rozpatrywanej w danym momencie wielkości pudełka. W pierwszym kroku odległość w jednostkach przeliczana jest na odległość w pudełkach o zadanej wielkości. Skrajne narożniki obiektu - prawy-przedni-dolny oraz lewy-tylny-górny przyjmowane są jako podstawa do wyliczeń wielkości podprzestrzeni. Jest ona następnie dzielona na regularną siatkę o wielkości pudełek zgodnych z aktualnym krokiem procedury (rys. 7.4).

Test kolizji AABB

W tak przygotowanej podprzestrzeni w łatwy sposób można obliczyć liczbę pudełek zajętych, czyli takich, które przecinają się z obiektem

$$box_{count} = box_x \cdot box_y \cdot box_z \quad (7.2)$$

W celu uniknięcia błędów, dla skrajnych pudełek został dodatkowo zastosowany test kolizji (rys. 7.5).



Rysunek 7.4: Pokrycie podprzestrzeni obiektu regularną siatką pudełek

Dwa obiekty są rozłączne, jeśli choć dla jednej osi spełniony jest warunek

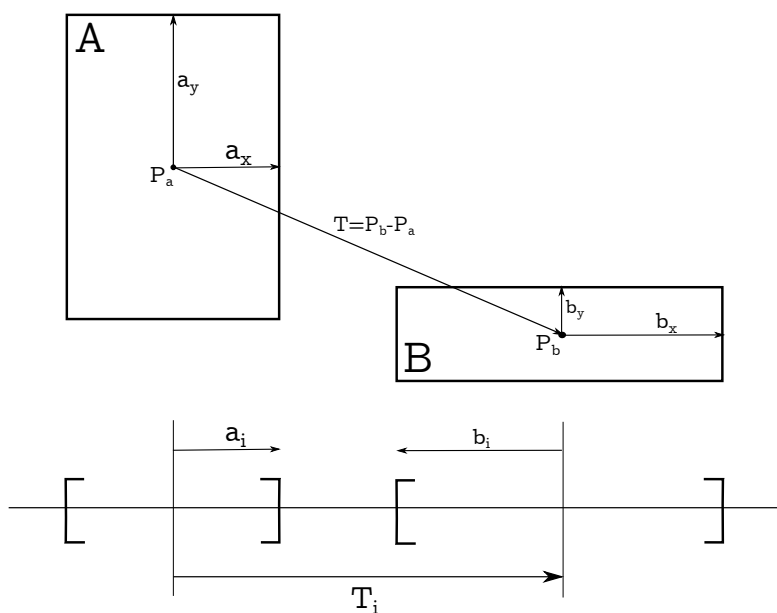
$$|T_i| > a_i + b_i \quad (7.3)$$

gdzie:

T - wektor łączący środki testowanych obiektów,

a_i, b_i - połowy długości boków/krawędzi wzdłuż zadanej osi.

Test jest przeprowadzany dla każdej z możliwych osi, na której może wystąpić kolizja, czyli X, Y i Z. Poprawny rezultat otrzymywany jest nawet wtedy, gdy jeden z obiektów jest całkowicie zawarty w drugim [17].



Rysunek 7.5: Test kolizji AABB w przestrzeni dwuwymiarowej [17]

Eliminacja duplikatów

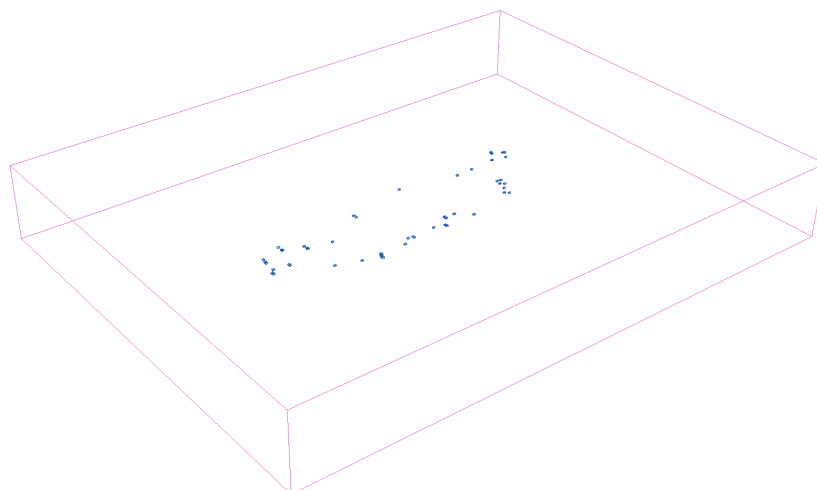
Po przeprowadzeniu testu kolizji otrzymywana jest liczba pudełek wypełnionych, zgromadzonych wokół każdego z obiektów. Ponieważ konstrukcja modelu dopuszcza możliwość kolizji obiektów, a więc ich przecinania, a nawet fragmentarycznego pokrywania, istnieje duże prawdopodobieństwo kilkukrotnego zakwalifikowania tego samego wypełnionego pudełka, ale istniejącego w różnej podprzestrzeni. Ze względu na sposób tworzenia podprzestrzeni, który jest uzależniony od umiejscowienia przestrzeni ograniczającej, dla każdego z obiektów, w którym występuje potencjalny duplikat, jest on zlokalizowany w tym samym miejscu. Skutkuje to łatwością w procedurze eliminacji takich duplikatów, wystarczy jedynie przechowywać unikalne identyfikatory wypełnionych pudełek i usuwać ich wielokrotne wystąpienia po zakończeniu jednego kroku procedury.

Eliminacja duplikatów kończy pojedynczy krok procedury pomiaru dla konkretnej wielkości pudełka. Opisana sekwencja jest następnie powtarzana, zgodnie z opisem przedstawionym w punkcie 2.3.2, aż do uzyskania wartości wymiaru pudełkowego.

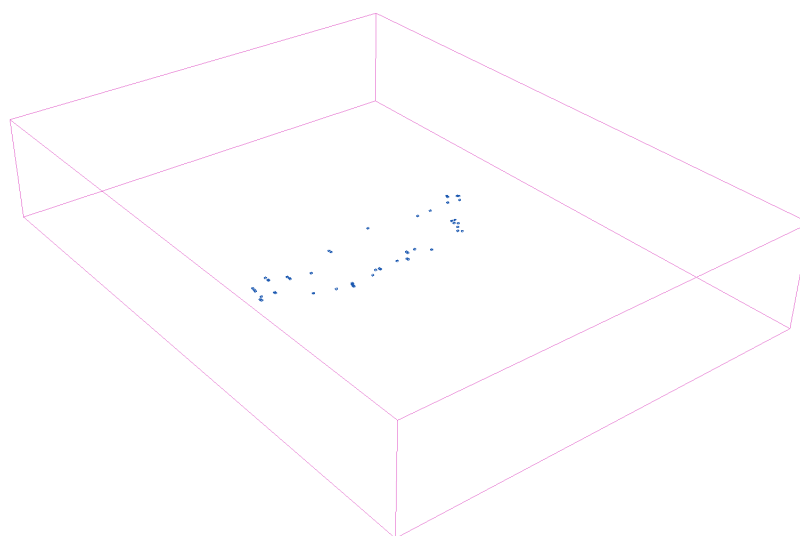
7.3. Eksperymenty numeryczne

Z uwagi na fakt, iż liczba wypełnionych pudełek jest w bezpośredni sposób związana z umiejscowieniem obiektów w przestrzeni ograniczającej, przed przystąpieniem do właściwych badań zostało przeprowadzone wiele testów, mających na celu ocenę wpływu konstrukcji przestrzeni ograniczającej na mierzoną wartość wymiaru pudełkowego.

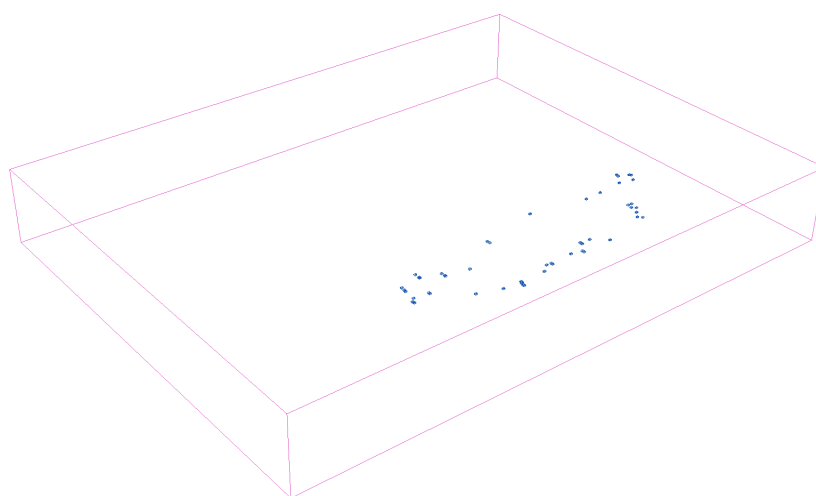
Pierwszy test polegał na badaniu wpływu zmiany rozmiaru przestrzeni ograniczającej. Utworzona w losowy sposób przestrzeń została przyjęta jako punkt odniesienia wraz z obliczonym wymiarem pudełkowym (rys. 7.6a). Przestrzeń ta była następnie modyfikowana w sposób losowy i ponownie obliczana była wartość wymiaru pudełkowego (rys. 7.6b). Różnica pomiędzy zmierzonymi wartościami stanowiła parametr Δ_{size} . W drugim teście, przeprowadzona została analiza zależności wpływu zmiany położenia obiektów, przy ustalonym rozmiarze przestrzeni ograniczającej. W tym przypadku modyfikacja przestrzeni polegała na jej przesunięciu względem grupy analizowanych obiektów (rys. 7.6c). Różnica pomiędzy zmierzonymi wartościami wymiaru pudełkowego dla przestrzeni zmodyfikowanej i wzorcowej stanowiła parametr Δ_{move} . Oba testy były powtarzane kilkudziesięciokrotnie, po czym dla każdego z nich została obliczona wartość maksymalnego odchylenia mię-



(a) Przestrzeń wzorcowa



(b) Zmiana rozmiaru



(c) Zmiana położenia

Rysunek 7.6: Przykładowy test modyfikacji przestrzeni

dzy wartością wzorcową, a wartością zmierzoną. Dla przykładu przedstawionego na rys. 7.6 wartości te wynosiły odpowiednio:

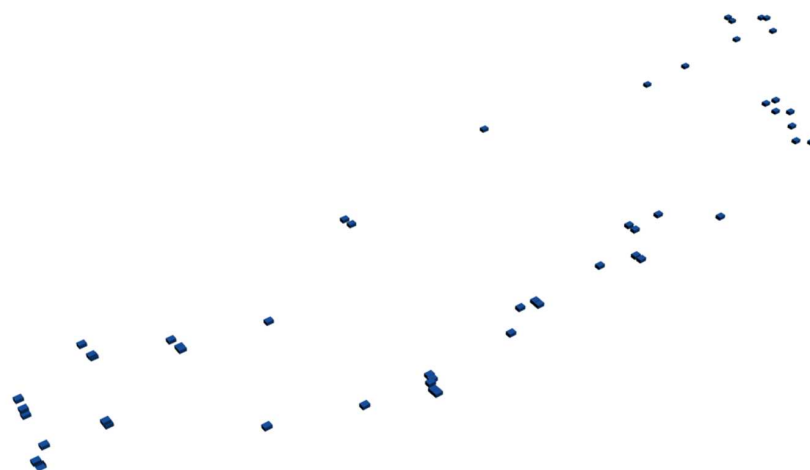
$$\max(\Delta_{size}) = 0,0025$$

$$\max(\Delta_{move}) = 0,0035$$

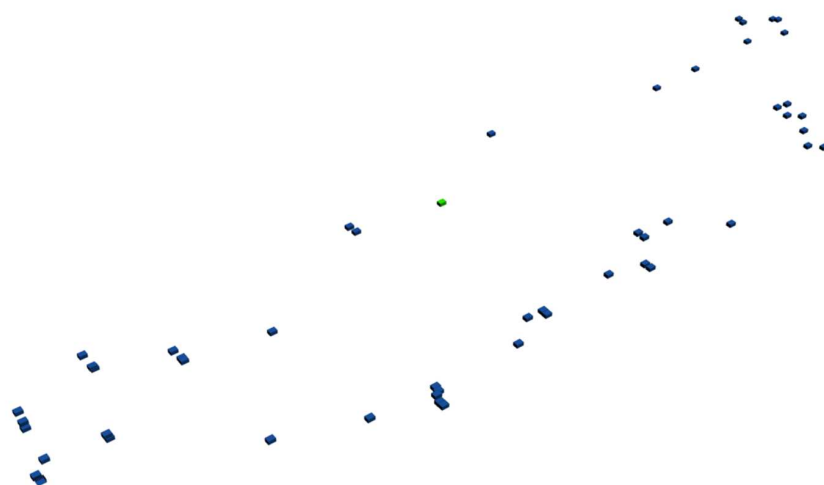
co można uznać za wartości bardzo znikome. Testy zostały również powtórzone dla innych grup obiektów, za każdym razem wartości parametrów $\max(\Delta)$ pozostawały mniejsze niż 0,01. Na tej podstawie można zatem wyciągnąć wniosek, iż zarówno ułożenie obiektów w przestrzeni ograniczającej, jak i jej wielkość nie są parametrami znacząco wpływającymi na wynik pomiaru wymiaru pudełkowego i jako takie mogą być dobierane w sposób zupełnie dowolny.

Najważniejszym przeprowadzonym badaniem doświadczalnym było przeprowadzenie analiz na fragmencie modelu, odwzorowującego rzeczywisty fragment zabudowy rozproszonej w jednej ze wsi województwa małopolskiego. Fragment ten został dostosowany do założeń modelu uproszczonego, czyli wszystkie występujące w nim obiekty spełniają założenia AABB. Rozmiary obiektów zostały dobrane w taki sposób, aby odwzorowywały bryły brzegowe otaczające typowe zabudowania małych miejscowości. Stan wzorcowy modelu, względem którego obliczane były różnice w wymiarze pudełkowym został przedstawiony na rys. 7.7a. W kolejnych krokach model ten był modyfikowany w znany już sposób, przy jednoczesnym obliczaniu nowej wartości wymiaru pudełkowego. Przeprowadzone pomiary potwierdzają wnioski zawarte w podrozdziale 6.3 opisującej wstępne testy numeryczne. Przy rozbudowie modelu o pojedynczy obiekt zgodny z już istniejącymi (rys. 7.7b) różnica w wymiarze pudełkowym była praktycznie niezauważalna. Podobnie rzecz się miała w przypadku dodania grupy kilku obiektów o jednakowych parametrach (rys. 7.7c).

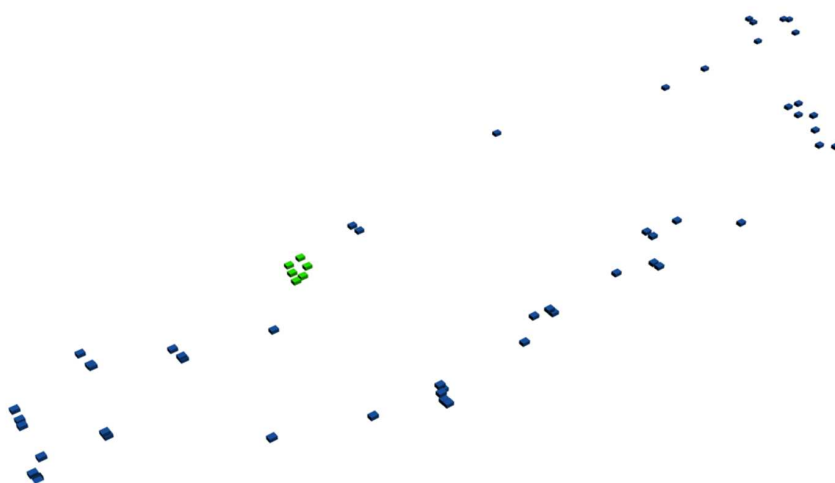
Podczas rozbudowy modelu o obiekty odmienne od znajdujących się w nim, wyniki również potwierdziły wcześniejsze ustalenia. Dodanie pojedynczego obiektu, którego wymiary były około trzykrotnie większe, wymiar pudełkowy wzrastał o około 4% możliwych do osiągnięcia wartości (rys. 7.8a). Jeśli takich obiektów było kilka (rys. 7.8b), przyrost wartości stanowił już 9%. Największy wzrost wartości wymiaru pudełkowego odnotowany został podczas dodania do modelu obiektu o wymiarach zdecydowanie odmiennych od wszystkich w nim istniejących (rys. 7.8c). Model takiego obiektu może



(a) Stan obecny $D_b = 2,409$

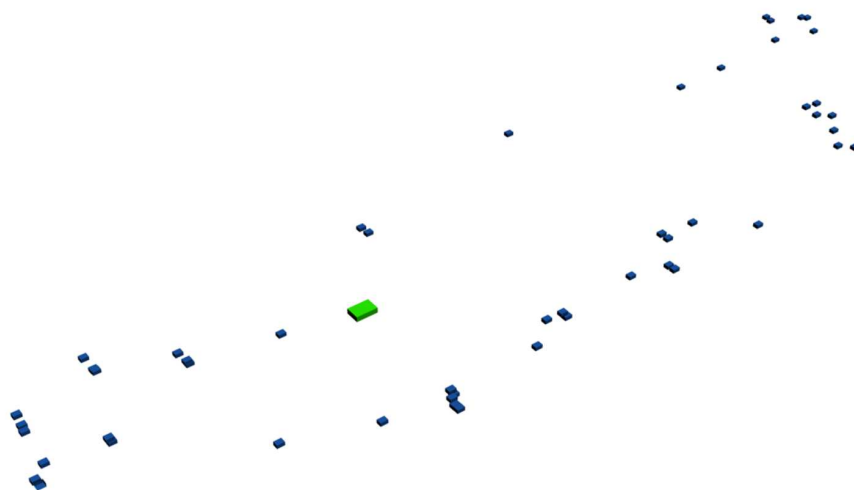


(b) Dodatkowy obiekt (kolor zielony) $D_b = 2,408$



(c) Dodatkowa grupa obiektów $D_b = 2,406$

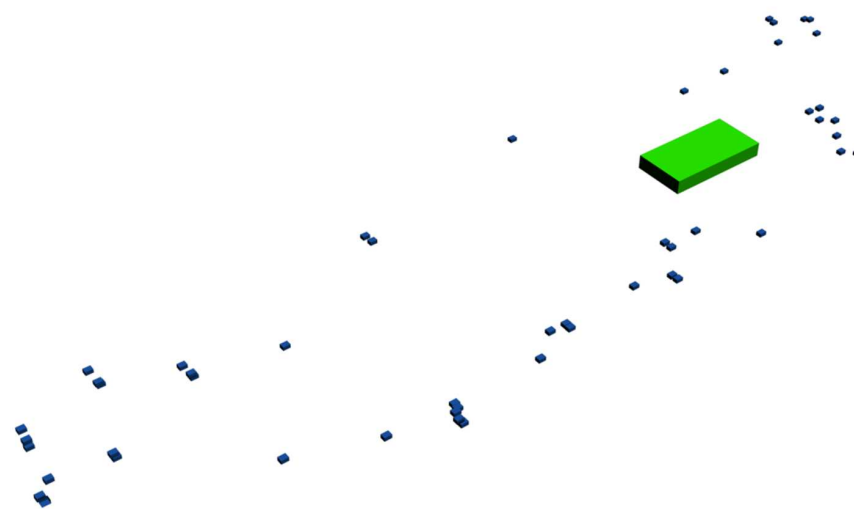
Rysunek 7.7: Modele testowe wraz z wymiarami pudełkowymi



(a) Dodatkowy obiekt o większych rozmiarach $D_b = 2,449$



(b) Dodatkowa grupa większych obiektów $D_b = 2,494$



(c) Dodatkowy obiekt znacznie większy $D_b = 2,811$

Rysunek 7.8: Modele testowe wraz z wymiarami pudełkowymi

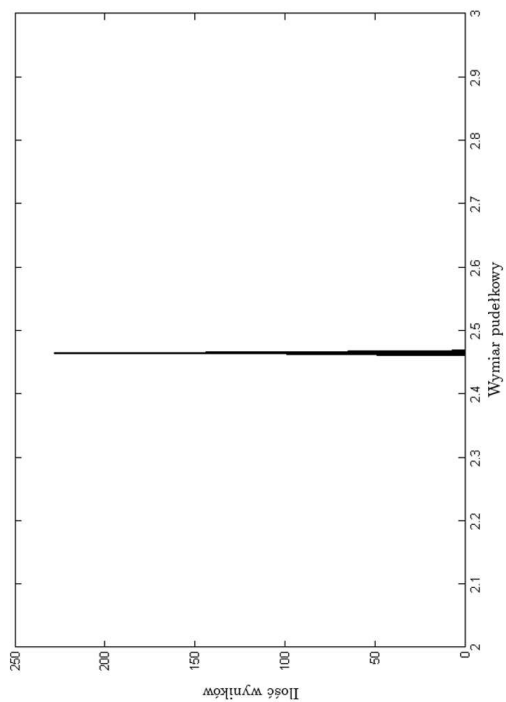
przedstawiać przykładowo dużą halę fabryczną, czy też mocno rozbudowany hotel. Liczbowe wyniki potwierdzają zatem intuicyjny odbiór obiektu, który mówiąc potocznie „nie pasuje” do otoczenia, w którym się znalazł, a co za tym idzie - zmienia jego charakter. Warty odnotowania jest fakt, iż dodanie kolejnego obiektu o zbliżonych gabarytach nie miało już tak dużego wpływu na zmierzoną wartość wymiaru pudełkowego, która wynosiła 2,855 (dodatkowy przyrost o 0,044). Może to zostać odniesione do sytuacji, gdy w otoczeniu niskiej zabudowy i istniejącej jednej fabrycy pojawia się przykładowo rozbudowany magazyn. Gdyby ten magazyn znajdował się w otoczeniu bez fabryki wybijałby się na pierwszy plan i zwracał uwagę swoją obecnością. Jednak położenie w pobliżu fabryki o podobnych gabarytach powoduje, że jego obecność nie rzuca się tak bardzo w oczy.

7.3.1. Test stabilności wyników

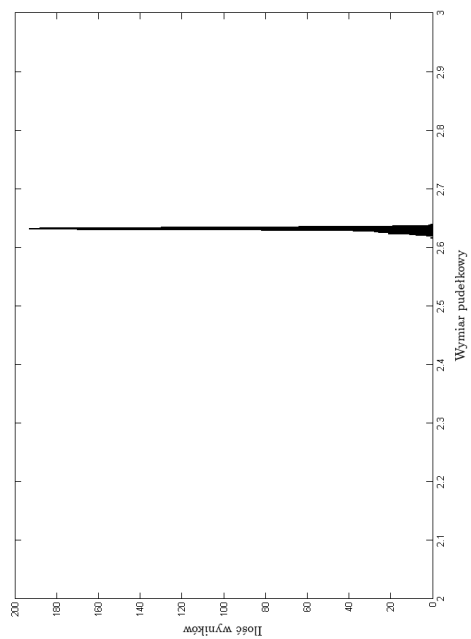
Dla każdego algorytmu bardzo istotną cechą jest stabilność otrzymywanych wyników. W prezentowanych badaniach doświadczalnych stabilność wyników może być rozumiana jako otrzymywanie zbliżonych rezultatów dla modeli o zbliżonej konstrukcji. W tym celu przetestowane zostały cztery scenariusze:

1. rozmieszczenie 1000 jednakowych obiektów w losowych miejscach przestrzeni ograniczającej,
2. rozmieszczenie 1000 obiektów w losowych miejscach przestrzeni ograniczającej, spośród których **1%** ma większe wymiary,
3. rozmieszczenie 1000 obiektów w losowych miejscach przestrzeni ograniczającej, spośród których **10%** ma większe wymiary,
4. rozmieszczenie 1000 obiektów w losowych miejscach przestrzeni ograniczającej, spośród których **20%** ma większe wymiary.

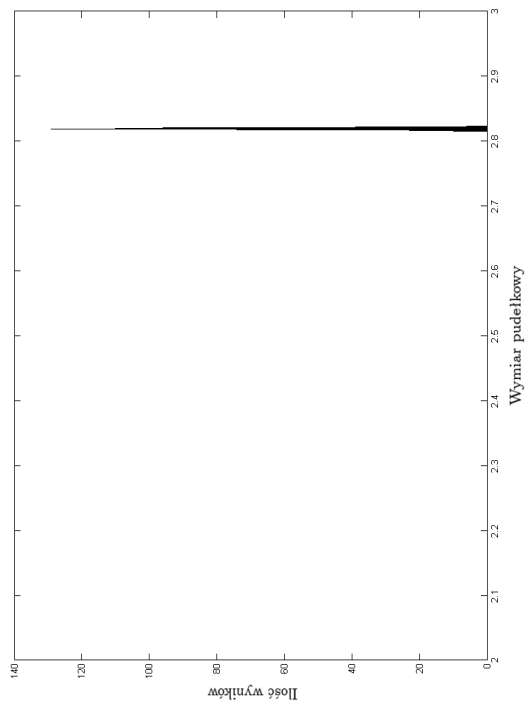
W każdym ze scenariuszy przestrzeń ograniczająca miała jednakowe, odgórnie ustalone wymiary wynoszące 10000 x 6000 x 2500 jednostek, które pozostawały niezmiennie podczas każdej fazy testu. Obiekty bazowe miały wymiary 20 x 30 x 10 jednostek i mogły znajdować się w dowolnym miejscu przestrzeni, również gromadząc się w grupy. Jedynym ograniczeniem położenia obiektów było kryterium minimalnej odległości od przestrzeni ograniczającej, wynoszącej 10 jednostek. W scenariuszach 2 - 4 długość każdej krawędzi obiektu większego została zwielokrotniona 5 razy, zatem wspomniane obiekty miały wymiary 100 x 150 x 50 jednostek. Właściwy test polegał na 1000-krotnym powtórzeniu danego scenariusza przy jednoczesnym obliczeniu wartości wymiaru pudełkowego dla każdego pojedynczego ułożenia obiektów.



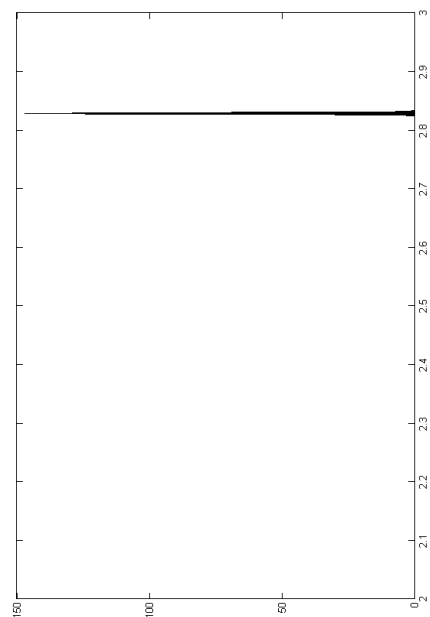
(a) Scenariusz 1



(b) Scenariusz 2



(c) Scenariusz 3



(d) Scenariusz 4

Rysunek 7.9: Histogramy dla poszczególnych scenariuszy testowych

Tabela 7.1: Wyniki testów stabilności

Scenariusz	Średni wymiar pudełkowy	Odchylenie standardowe
1	2,464	0,001
2	2,631	0,003
3	2,819	0,001
4	2,829	0,001

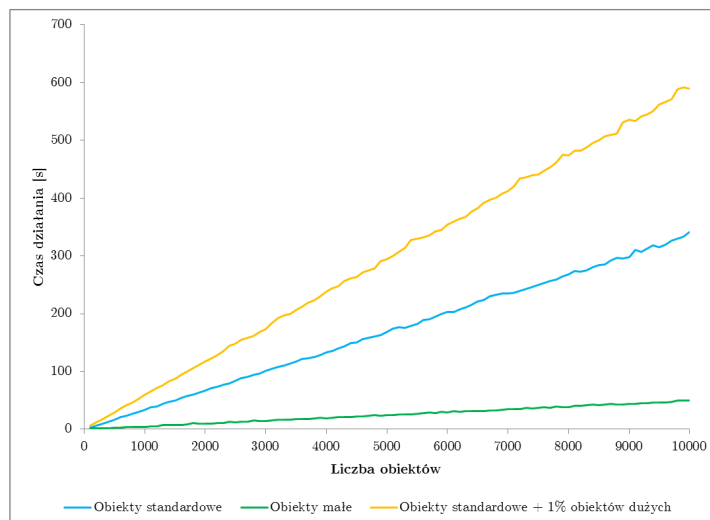
Otrzymane wyniki, przedstawione w tabeli 7.1 oraz na rys 7.9 dowodzą wysokiej stabilności otrzymywanych wartości. Histogramy są bardzo wąskie, a wartość odchylenia standardowego bardzo niska, co świadczy o niewielkim rozrzucie wyników. Dodatkowym wnioskiem z przeprowadzonych testów jest potwierdzenie omawianych wcześniej wyników, w których można było dostrzec zależność pomiędzy charakterem (rozumianym w tym przypadku jako wielkość), a zmierzoną wartością wymiaru pudełkowego. Dodawanie obiektów większych powodowało przyrost wartości tego wymiaru. Można też zaobserwować pewne wysycenie wartości - przy zwiększeniu udziału dużych obiektów z 10% do 20% przyrost wartości był znikomy (0,01) w porównaniu do przyrostu przy zwiększeniu udziału z 1% do 10% (0,188).

7.3.2. Czas działania algorytmu

Opisywany algorytm brutalny działał w czasie, który dyskwalifikował jego użyteczność w zastosowaniach do poważnych analiz. Spowodowane było to faktem, iż czas ten zależał od rozmiaru przestrzeni ograniczającej. Przedstawiony algorytm jest pozbawiony tej wady, a czas jego działania w głównej mierze zależy od dwóch czynników - liczby obiektów znajdujących się w modelu oraz ich wielkości.

Test pozwalający na oszacowanie czasu działania algorytmu dla dużych zbiorów danych został przeprowadzony w warunkach analogicznych do testu stabilności działania. W określonej przestrzeni ograniczającej generowane były obiekty w liczbie od 100 do 10000 z krokiem co 100. Dla każdego z testów obiekty te miały określone rozmiary (rys. 7.10), które pozostawały stałe w czasie trwania testu. W każdym pojedynczym kroku testu obliczana była wartość wymiaru pudełkowego dla danego układu obiektów i jednocześnie mierzony był czas działania takich obliczeń, nie uwzględniający operacji wejścia-wyjścia.

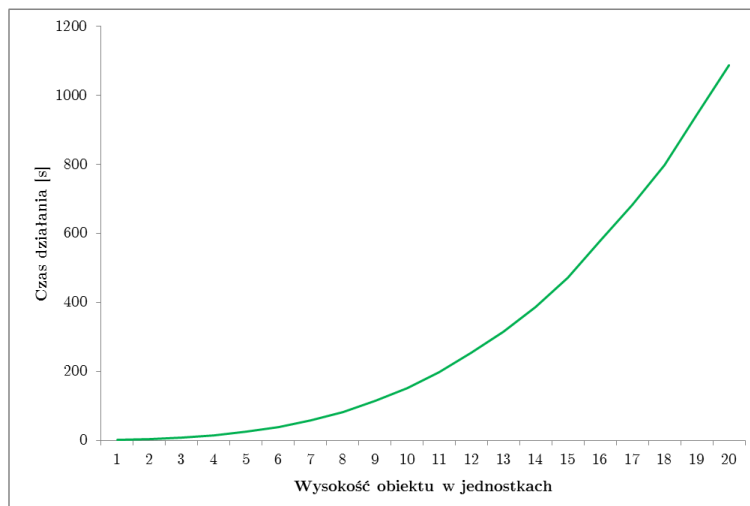
Obiekty oznaczone na wykresie jako „standardowe” (linia niebieska) miały rozmiary równe bazowym, dla których zostały przeprowadzone testy stabilności, czyli 20 x 30 x 10 jednostek. Obiekty „małe” oznaczały wielkość



Rysunek 7.10: Czas działania algorytmu dla różnych typów i liczby obiektów

dwukrotnie mniejszą - 10 x 15 x 5 jednostek. „Obiekty standardowe + 1% obiektów dużych” odpowiadało scenariuszowi nr 2 z zaprezentowanych testów stabilności wyników. Maksymalna liczba obiektów w modelu wynosiła 10000, co jest wartością dużą, odpowiadającą kilku - kilkunastu miejscowościom. W modelu przedstawionym na rys. 6.6 znajduje się nieco ponad 50000 obiektów. Maksymalny czas działania dla obiektów małych wynosił 50 sekund, dla obiektów standardowych 341 sekund, natomiast przy zawartości 1% obiektów dużych, czas ten wynosił niecałe 600 sekund. Średnio czas działania dla obiektów standardowych był dłuższy 6,8-krotnie od czasu dla obiektów małych. Jeśli w modelu występowały również obiekty duże, czas wydłużał się jeszcze 1,7-krotnie. Przyjmując, iż obiekt standardowy odpowiada w przybliżeniu bryle ograniczającej, mieszczącej w sobie typowe zabudowania małego miasteczka, czas działania na poziomie kilku- kilkunastu minut można uznać za całkowicie akceptowalny.

Zwraca uwagę również fakt, iż zależność czasu działania od liczby obiektów w scenie jest zależnością liniową. Nieco inne wnioski można wyciągnąć podczas badania wpływu wielkości użytych obiektów na czas wykonania algorytmu. Rozważania teoretyczne sugerują, iż powinna to być zależność rzędu n^3 z uwagi na stosowanie trójwymiarowych obiektów w trójwymiarowej przestrzeni. Potwierdzają to również badania empiryczne (rys. 7.11). Przeprowadzony test polegał na generowaniu 5000 obiektów w losowych miejscach przestrzeni ograniczającej, każdego o wielkości $2n \times 3n \times n$ jednostek. Liczba n zmieniała się w zakresie 1 - 20, zatem maksymalna wielkość obiektu wynosiła 40 x 60 x 20 jednostek.



Rysunek 7.11: Zależność czasu działania algorytmu od rozmiaru obiektów istniejących w modelu

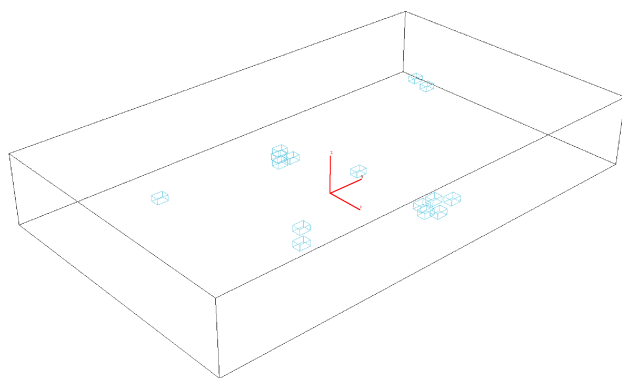
Warto również porównać czas działania opracowanego rozwiązania z algorytmem brutalnym. W tym celu przygotowane zostały 4 modele testowe, które następnie zostały poddane działaniu obu algorytmów:

1. model zawierający 15 obiektów wielkości standardowej (rys. 7.12a),
2. model zawierający 14 obiektów wielkości standardowej oraz 1 obiekt większy (rys. 7.12b),
3. model zawierający 18 obiektów wielkości standardowej oraz 3 obiekty większe (rys. 7.12c),
4. model 3 w powiększonej przestrzeni ograniczającej (rys. 7.12d).

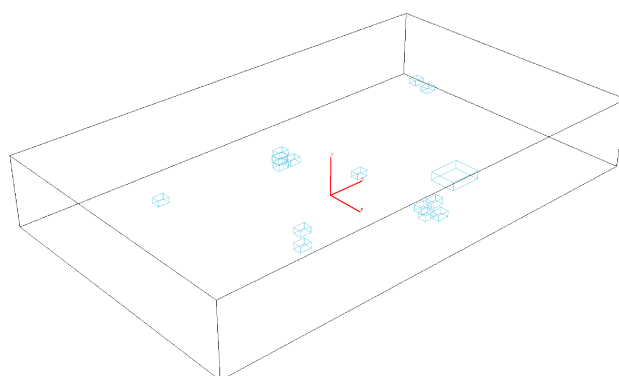
Wyniki przeprowadzonych testów przedstawia tabela 7.2. Korzyść czasowa wynikająca z zastosowania opracowanej metody nie podlega wątpliwości. Dla algorytmu brutalnego wyraźnie widoczny jest znaczny przyrost czasu podczas zwiększenia przestrzeni ograniczającej przy tej samej liczbie obiektów (model 4). Opracowany algorytm nie wykazuje żadnego przyrostu czasowego podczas zmiany rozmiaru tej przestrzeni, a jedynie (co zostało już wykazane) podczas zwiększania liczby obiektów zawartych w danym modelu.

Tabela 7.2: Czas (sek.) wykonania poszczególnych algorytmów dla porównywanych modeli

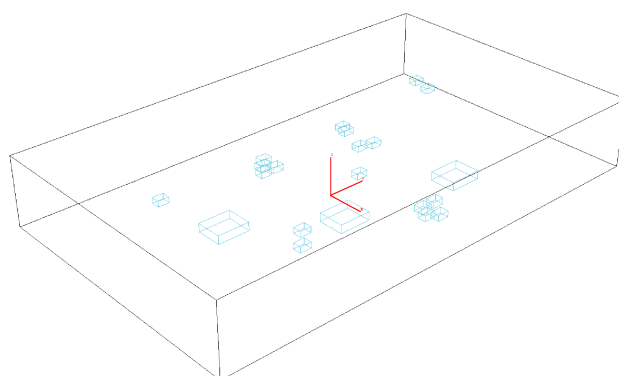
	Opracowana metoda	Algorytm brutalny
Model 1	0,39	1043
Model 2	0,38	1037
Model 3	0,69	1368
Model 4	0,68	2063



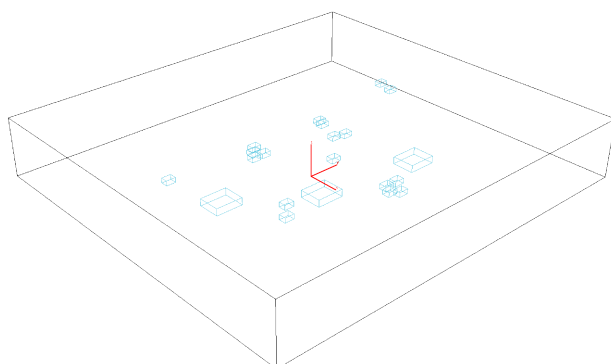
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3



(d) Model 4

Rysunek 7.12: Przykładowe modele, użyte w testach porównawczych czasu działania algorytmów

7.4. Podsumowanie

Zaprezentowany model AABB stanowił pierwszy etap prac nad algorytmem pomiaru wymiaru pudełkowego w przestrzeni trójwymiarowej, pracującym w określonej przestrzeni ograniczającej. Pomimo zastosowania w modelu obiektów typu AABB, co stanowiło znaczne uproszczenie jego konstrukcji, może on stanowić dobry punkt wyjścia do tworzenia bardziej złożonych konstrukcji. Obiekty typu AABB mogą bowiem w dużej skali stanowić uproszczoną reprezentację obiektów skomplikowanych. Dużą zaletą opracowanego rozwiązania jest stabilność otrzymywanych wyników, niezależność od rozmiaru przestrzeni ograniczającej oraz od położenia obiektów w tej przestrzeni. Przeprowadzone testy użyteczności potwierdziły możliwość jego stosowania w zadaniach, w których istotne jest znalezienie obiektywnej wartości liczbowej umożliwiającej oszacowanie różnicy pomiędzy różnymi stanami, zaprezentowanymi w różnych modelach. Otrzymane wyniki były zgodne z intuicją - dodanie do modelu obiektów odbiegających rozmiarami od już istniejących powodowało przyrost mierzonej wartości wymiaru pudełkowego. Dodatkową zaletą względem algorytmu brutalnego jest znacznie krótszy czas działania, niezależny od rozmiaru przestrzeni ograniczającej, lecz od liczby i rozmiaru obiektów w niej się znajdujących. W prostych zadaniach testowych czas ten był krótszy kilka tysięcy razy. Nawet dla dużej liczby obiektów w scenie, sięgającej 10000 zamykał się on w obrębie kilku- kilkunastu minut. Pewną niedogodność może jednak stanowić fakt dość szybkiego przyrostu czasu działania w zależności od rozmiaru użytych obiektów. Przy dwukrotnym zwiększeniu ich rozmiaru, czas wydłużył się prawie siedmiokrotnie, co przy większych wartościach może stanowić pewien problem. Rozwiązaniem mogłoby tu być zastosowanie skalowania modelu, jednak należy mieć na uwadze rozmiary używanych podczas obliczeń pudełek. W prezentowanych zadaniach ich parametry zostały tak dobrane, aby dobrze odwzorowywać skalę urbanistyczną. Zaburzenie tego warunku, poprzez przeskalowanie modelu i/lub użytych do obliczeń pudełek wymagałoby właściwego uzasadnienia oraz przeprowadzenia odpowiednich badań.

Rozdział 8

Model OBB

Model AABB, zaprezentowany w poprzednim rozdziale, przedstawiał sytuację w pewien sposób wyidealizowaną. W rzeczywistych przypadkach budowli występujących w krajobrazie, praktycznie nigdy nie natrafi się na sytuację, w której wszystkie budynki na dużym obszarze będą ułożone w jednym kierunku. Dotyczy to przede wszystkim zabudowy rozproszonej, która na obszarach uznawanych za chronione występuje najczęściej. Dobre odwzorowanie takiej sytuacji wymaga zatem pewnej zmiany podejścia, a co za tym idzie - zmiany zastosowanego modelu. W niniejszym rozdziale zaprezentowany zostanie zatem model oparty na koncepcji **OBB** (ang. *Oriented Bounding Box*), który to akronim oznacza najmniejszy prostopadłościan kompletnie otaczający dany obiekt, którego osie nie są równoległe do globalnego układu współrzędnych sceny.

8.1. Konstrukcja modelu

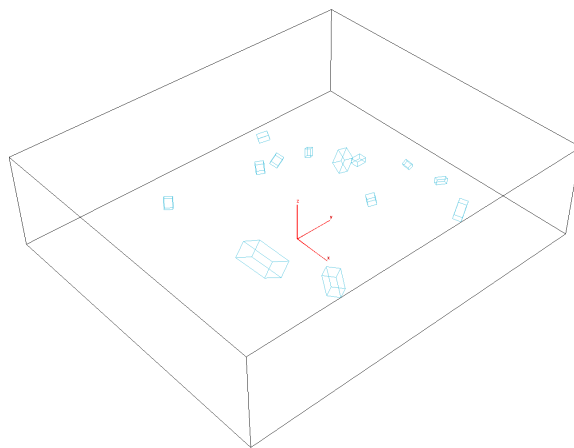
Zasadniczą zmianą, pomiędzy modelem reprezentowanym poprzez obiekty typu OBB oraz AABB jest uwzględnienie dodatkowego parametru, jakim jest obrót danego obiektu w przestrzeni (rys. 8.1).

Ułożenie OBB w przestrzeni może być zdefiniowane za pomocą kątów obrotu względem osi układu współrzędnych. Znając owe kąty, można otrzymać nowe współrzędne punktów obiektu, używając macierzy transformacji:

$$\mathbf{A}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

$$\mathbf{A}_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.3)$$



Rysunek 8.1: Przykładowa scena, zawierająca obiekty typu OBB

Generalna macierz obrotu, uwzględniająca obrót wokół dowolnej osi o dowolny kąt, powstaje poprzez złożenie wszystkich trzech obrotów, czyli pomnożenie przez siebie macierzy $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z$ [53]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta \sin \gamma & \cos \phi \sin \gamma + \sin \phi \sin \theta \cos \gamma & \sin \phi \sin \gamma - \cos \phi \sin \theta \cos \gamma \\ -\cos \theta \sin \gamma & \cos \phi \cos \gamma - \sin \phi \sin \theta \sin \gamma & \sin \phi \cos \gamma + \cos \phi \sin \theta \sin \gamma \\ \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Macierz transformacji \mathbf{A} może zostać również zastosowana do obliczenia ortonormalnej bazy danego obiektu. Dzięki temu obiekt typu OBB może zostać określony za pomocą trzech parametrów:

- środka \mathbf{C} , którego współrzędne określają również współrzędne wektora przesunięcia, względem początku układu współrzędnych świata;
- ortonormalnej, prawoskrętnej bazy $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z$ uzyskanej poprzez przekształcenie bazy

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

za pomocą macierzy transformacji, tworzącej lokalny układ współrzędnych;

- trzech długości krawędzi a_x, a_y, a_z , których kierunek jest zgodny z lokalnym układem współrzędnych [10].

8.2. Konstrukcja algorytmu

Ze względu na zmianę konstrukcji modelu, również i algorytm liczący wymiar pudełkowy musiał ulec pewnym modyfikacjom. Pierwszej koniecznej zmianie poddany został moduł odpowiedzialny za eksport danych z programu 3ds Max. Niezbędne stało się bowiem również odczytanie lokalnej bazy ortonormalnej dla każdego istniejącego w scenie obiektu. Inaczej wygląda zatem plik tekstowy z zawartymi w nim danymi (Listing 8.1), który oprócz znanych już elementów (Listing 7.1) składa się z dodatkowych wierszy opisujących wspomnianą bazę.

Listing 8.1: Fragment pliku zawierającego dane o modelu OBB

```
Box: [411.795 , 798.425 , 427.274] 15.0 20.0 10.0
(matrix3 [-0.483787, 0.440128, 0.756464]
[0.798126, -0.132769, 0.587679]
[0.359089, 0.888065, -0.287046])
```

```
Box: [595.114 , 537.226 , 448.044] 46.23 63.22 30.0
(matrix3 [-0.831865, -0.0455358, -0.553106]
[-0.443174, -0.545404, 0.71143]
[-0.334062, 0.836936, 0.433522])
```

```
Box: [708.985 , 869.891 , 438.061] 15.0 41.6 10.0
(matrix3 [0.924292, 0.301335, 0.23427]
[-0.109943, 0.79795, -0.592611]
[-0.36551, 0.52199, 0.770668])
```

Zasadnicze kroki opisywanego algorytmu, opisane w sekcji 7.2, pozostają niezmiennione:

1. Lokalizacja obiektu.
2. Utworzenie podprzestrzeni obiektu.
3. Test kolizji.
4. Eliminacja duplikatów.

Zmiana dotyczy jedynie mechanizmów odpowiedzialnych za rozwiązania w poszczególnych krokach.

8.2.1. Tworzenie podprzestrzeni obiektu

Dla algorytmu działającego na obiektach typu AABB, podprzestrzeń obiektu mogła zostać otrzymana w łatwy sposób wprost z pozycji obiektu w przestrzeni ograniczającej. W przypadku obiektów typu OBB, dla każdego z nich

musi zostać najpierw obliczony AABB, na podstawie którego zostanie utworzona podprzestrzeń ograniczająca. W tym celu należy najpierw wykonać transformację każdego obiektu w taki sposób, aby jego krawędzie ułożyły się równoległe do globalnego układu współrzędnych

$$Obj_{loc} = Obj \cdot inv(World_{transform}) \quad (8.5)$$

Następnie w układzie Obj_{loc} można w łatwy sposób obliczyć współrzędne wszystkich wierzchołków obiektu, mając dany punkt centralny oraz długości poszczególnych krawędzi. Kolejny krok to przetransformowanie ich według $World_{transform}$ oraz znalezienie skrajnych wartości dla każdej współrzędnej:

$$\begin{aligned} X_{min}, Y_{min}, Z_{min} \\ X_{max}, Y_{max}, Z_{max} \end{aligned} \quad (8.6)$$

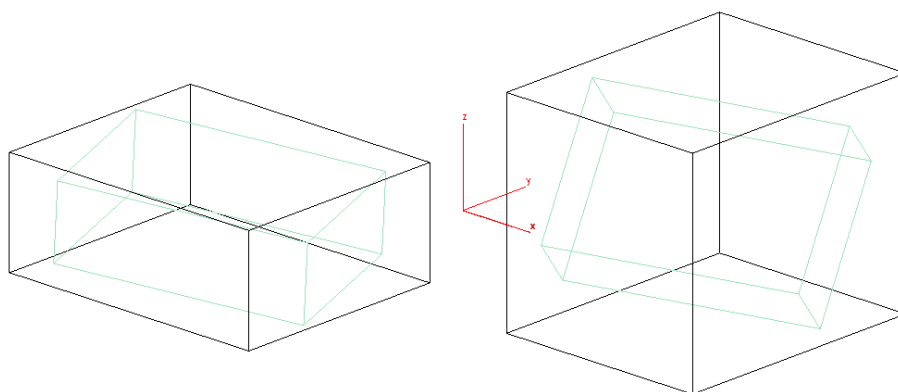
Pogrupowanie ich w zbiory:

$$\begin{aligned} X_{val} &= [X_{min}, X_{max}] \\ Y_{val} &= [Y_{min}, Y_{max}] \\ Z_{val} &= [Z_{min}, Z_{max}] \end{aligned} \quad (8.7)$$

oraz przeprowadzenie operacji iloczynu kartezjańskiego

$$X_{val} \times Y_{val} \times Z_{val} \quad (8.8)$$

pozwole na znalezienie współrzędnych AABB dla danego obiektu OBB [29], a tym samym znalezienie podprzestrzeni ograniczającej, w której będą prowadzone obliczenia (rys. 8.2).



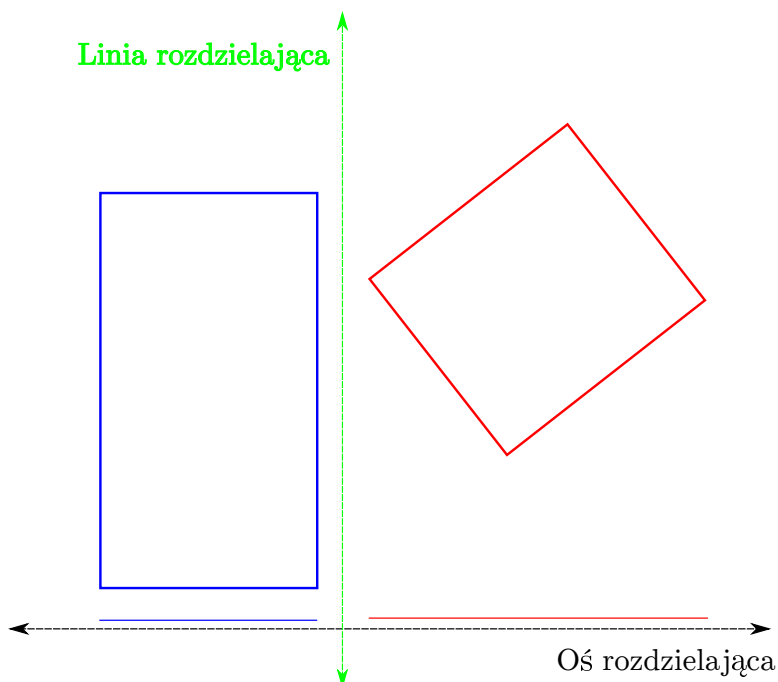
Rysunek 8.2: Przykładowe obiekty typu OBB (kolor zielony), wraz z odpowiadającymi im obiektami AABB (kolor czarny)

8.2.2. Test kolizji

Największa zmiana fragmentu algorytmu została przeprowadzona w module odpowiedzialnym za test kolizji, czyli wykrywającym liczbę zapelnionych pudełek. Prosty test zastosowany dla obiektów typu AABB (rys. 7.5) jest niestety w tym przypadku zupełnie nieodpowiedni.

W celu dokładnego zrozumienia struktury problemu, w pierwszej kolejności zostanie zaprezentowane ujęcie teoretyczne dla obiektów typu OBB znajdujących się na płaszczyźnie dwuwymiarowej.

Zgodnie z twierdzeniem o osiach rozdzielających (*Separating Axis Theorem*), dwa wielokąty wypukłe nie przecinają się wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje prosta taka, że rzuty wielokątów na tę prostą nie przecinają się. Prosta ta jest nazywana *osią rozdzielającą* (*separating axis*) [19]. Istnieje również alternatywna definicja tego twierdzenia, mówiąca iż dwa wielokąty wypukłe nie przecinają się wtedy i tylko wtedy, gdy pomiędzy nimi można narysować prostą w taki sposób, aby jeden z nich znalazł się w całości po jednej stronie, a drugi w całości po drugiej stronie tej prostej. W nomenklaturze prosta ta nazywana jest *prostą (linią) rozdzielającą* (*separating line*) i jest ona prostopadła do osi rozdzielającej (rys. 8.3).

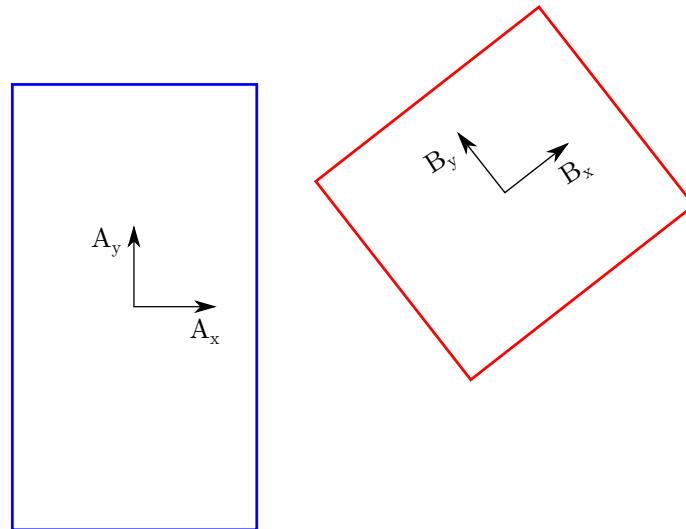


Rysunek 8.3: Ilustracja twierdzenia o osiach rozdzielających w przestrzeni dwuwymiarowej

Należy zauważyć, iż linii rozdzielających może istnieć kilka, równoległych do siebie. Jeśli taka linia istnieje, to jest ona równoległa do jednego z bo-

ków rozważanych wielokątów i jednocześnie prostopadła do osi rozdzielającej. Na potrzeby opracowania zostało przyjęte, iż badanymi wielokątami są dwa prostokąty, co odpowiada „pudełku” w przestrzeni dwuwymiarowej. Każdy z nich posiada dwie lokalne osie, równoległe do swoich boków, reprezentowane przez wektory jednostkowe (rys. 8.4). Zatem w celu znalezienia osi rozdzielających należy rozważyć istnienie linii rozdzielających, równoległych do boków prostokątów, a więc równoległych do ich lokalnych osi. Linie te będą równocześnie prostopadłe do osi rozdzielających, istnieją zatem cztery możliwe przypadki potencjalnych osi rozdzielających:

$$\begin{aligned} L &= A_x & L &= A_y \\ L &= B_x & L &= B_y \end{aligned} \quad (8.9)$$



Rysunek 8.4: Prostokąty i ich lokalne osie

W celu sprawdzenia kolizji pomiędzy dwoma obiektami OBB w przestrzeni dwuwymiarowej należy rzutować na daną oś L wektor T łączący środki obu prostokątów oraz ich połówki. Jeśli suma długości rzutów połówek jest mniejsza niż rzut wektora T , wtedy obiekty te są rozłączne (rys. 8.5) [19]

Warunek na rozłączność (7.3) przyjmuje zatem postać nieco bardziej skomplikowaną

$$\begin{aligned} |T \circ L| &> |(W_A \cdot A_x) \circ L| + |(H_A \cdot A_y) \circ L| \\ &+ |(W_B \cdot B_x) \circ L| + |(H_B \cdot B_y) \circ L| \end{aligned} \quad (8.10)$$

gdzie:

$$T = |P_B - P_A|;$$

P_A, P_B - współrzędne środków obiektów;

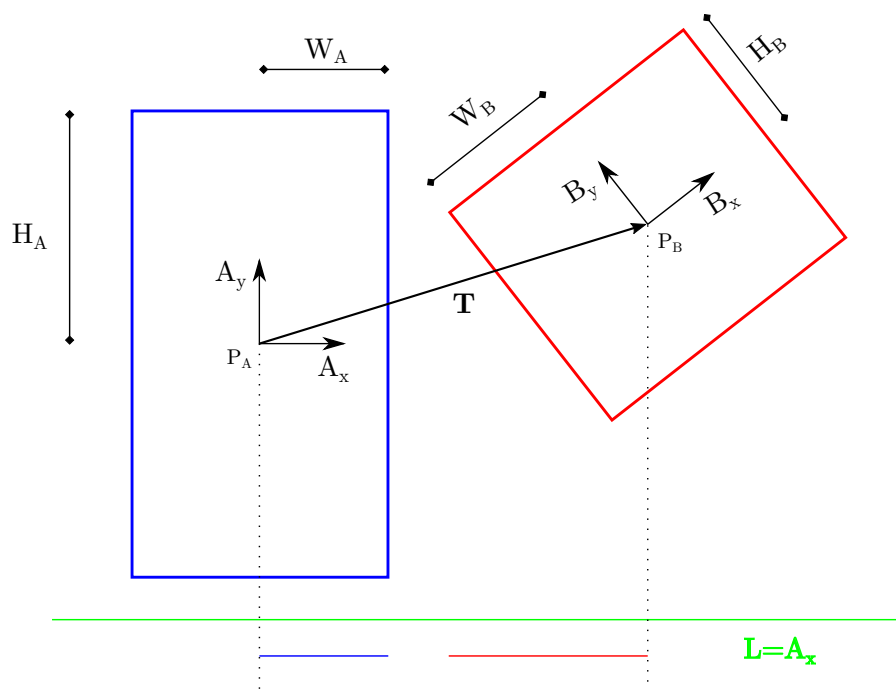
A_x, B_x - wektory jednostkowe reprezentujące lokalne osie X;

A_y, B_y - wektory jednostkowe reprezentujące lokalne osie Y;

W_A, W_B - połowa szerokości obiektu, zgodna z lokalną osią X;

H_A, H_B - połowa szerokości obiektu, zgodna z lokalną osią Y.

Jeśli dla którejś z osi (8.9) warunek (8.10) jest prawdziwy, wtedy L jest osią rozdzielającą (*separating axis*) i analizowane obiekty są **rozłączne** [17, 18, 19].



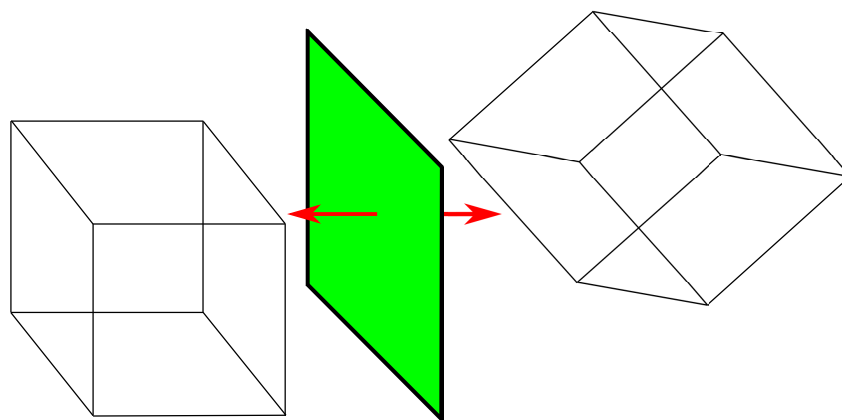
Rysunek 8.5: Rzutowanie wektora T oraz połówek prostokątów na oś $L = A_x$

Przedstawione rozważania mogą zostać przeniesione w przestrzeń trójwymiarową, jednak w tym przypadku sytuacja nieco się komplikuje:

- należy uwzględnić dodatkową, trzecią oś obiektu;
- zamiast *prostych* rozdzielających, w tej przestrzeni istnieją rozdzielające *plaszczyny*, oraz prostopadłe do nich rozdzielające osie;
- w przypadku dwuwymiarowym, jeśli istniała oś rozdzielająca, to była równoległa do którejś z lokalnych osi obiektu (4 przypadki), w trzech wymiarach możliwych osi rozdzielających jest znacznie więcej.

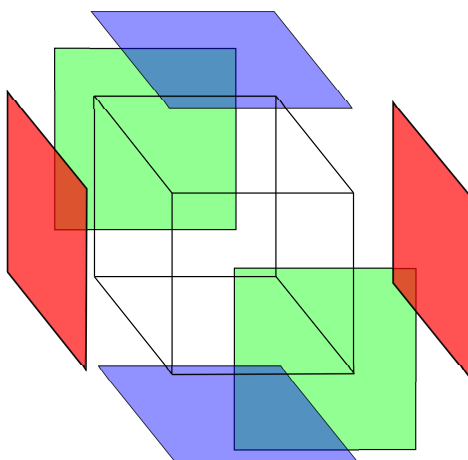
W przestrzeni dwuwymiarowej twierdzenie o osiach rozdzielających opisywało istnienie linii rozdzielających, oraz prostopadłych do nich osi rozdzielających (rys. 8.3). Przy przejściu do trzeciego wymiaru w miejsce linii poja-

wiają się płaszczyzny, wraz z prostopadłymi do siebie osiami rozdzielającymi (rys. 8.6).



Rysunek 8.6: Dwa prostopadłościany w przestrzeni trójwymiarowej wraz z płaszczyzną rozdzielającą (kolor zielony) i prostopadłą do niej osią rozdzielającą (kolor czerwony)

W dwóch wymiarach linie rozdzielające były równoległe do boków prostokątów, co generowało cztery możliwe przypadki osi rozdzielających. W trzecim wymiarze jako odpowiednik boków można traktować ściany bryły przestrzennej. Dlatego też dla każdej ze ścian może istnieć równoległa do niej płaszczyzna rozdzielająca (rys. 8.7). Z uwagi na fakt, iż ściany te są parami do siebie równoległe (na rysunku oznaczone odpowiednimi kolorami), zatem dla jednego prostopadłościanu mogą istnieć trzy potencjalne osie rozdzielające prostopadłe do poszczególnych ścian, a zarazem zgodne z lokalnym układem współrzędnych danego obiektu.

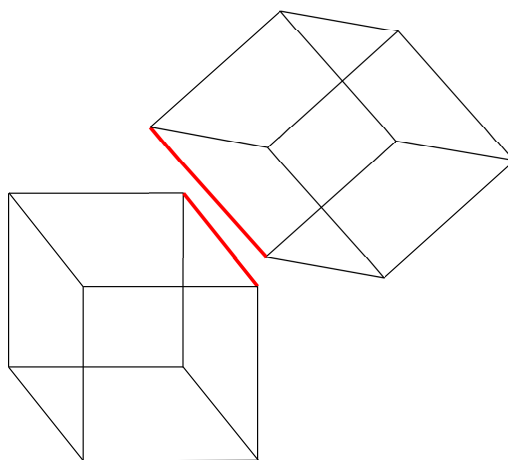


Rysunek 8.7: Możliwe płaszczyzny rozdzielające, równoległe do poszczególnych ścian prostopadłościanu

Ponieważ podczas analizy potencjalnej kolizji zawsze uczestniczą dwa obiekty, można wyprowadzić 6 możliwych osi rozdzielających, równoległych do lokalnych układów obu obiektów:

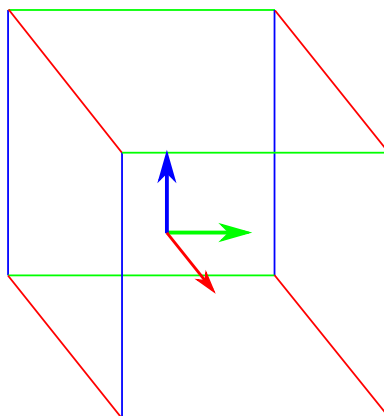
$$\begin{aligned} L &= A_x L = A_y L = A_z \\ L &= B_x L = B_y L = B_z \end{aligned} \quad (8.11)$$

Możliwość ułożenia obiektów w przestrzeni trójwymiarowej powoduje, iż potencjalna kolizja jest możliwa również pomiędzy dwiema krawędziami (rys. 8.8).



Rysunek 8.8: Możliwa kolizja pomiędzy krawędziami obiektów przestrzennych

Każdy prostopadłościan składa się z 12 krawędzi, które czwórkami są do siebie równoległe i jednocześnie są równoległe do osi lokalnego układu współrzędnych prostopadłościanu (rys. 8.9).



Rysunek 8.9: Krawędzie prostopadłościanu, równoległe do osi lokalnego układu współrzędnych

Jeśli pomiędzy krawędziami istnieje płaszczyzna rozdzielająca, wtedy jest ona równoległa do płaszczyzny rozpiętej na wektorach reprezentujących te krawędzie. Wektory te są równoległe do osi lokalnych układów współrzędnych, zatem za pomocą iloczynu wektorowego łatwo obliczyć wektor prostopadły do potencjalnej płaszczyzny rozdzielającej. Wektor ten będzie równocześnie równoległy do szukanej osi rozdzielającej [4]. Rozważając krawędzie prostopadłością otrzymujemy zatem po 3 unikalne osie dla każdego z nich, co daje 9 potencjalnych osi rozdzielających, utworzonych z iloczynów wektorowych (8.13).

Nierówność pozwalająca na przeprowadzenie testu kolizji obiektów typu OBB w przestrzeni trójwymiarowej przybiera zatem postać

$$\begin{aligned} |T \circ L| > & |(W_A \cdot A_x) \circ L| + |(H_A \cdot A_y) \circ L| \\ & + |(D_A \cdot A_z) \circ L| + |(W_B \cdot B_x) \circ L| \\ & + |(H_B \cdot B_y) \circ L| + |(D_B \cdot B_z) \circ L| \end{aligned} \quad (8.12)$$

gdzie:

$$T = |P_B - P_A|;$$

P_A, P_B - współrzędne środków obiektów;

A_x, B_x - wektory jednostkowe reprezentujące lokalne osie X;

A_y, B_y - wektory jednostkowe reprezentujące lokalne osie Y;

A_z, B_z - wektory jednostkowe reprezentujące lokalne osie Z;

W_A, W_B - połowa szerokości obiektu, zgodna z lokalną osią X;

H_A, H_B - połowa szerokości obiektu, zgodna z lokalną osią Y;

D_A, D_B - połowa szerokości obiektu, zgodna z lokalną osią Z;

L - jedna z 15 potencjalnych osi rozdzielających:

$$\begin{array}{lll} L = A_x & L = A_y & L = A_z \\ L = B_x & L = B_y & L = B_z \\ L = A_x \times B_x & L = A_x \times B_y & L = A_x \times B_z \\ L = A_y \times B_x & L = A_y \times B_y & L = A_y \times B_z \\ L = A_z \times B_x & L = A_z \times B_y & L = A_z \times B_z \end{array} \quad (8.13)$$

Jeśli choć dla jednej z osi (8.13) warunek (8.12) jest spełniony, oznacza to znalezienie osi rozdzielającej - obiekty się nie przecinają.

Jeśli wszystkie warunki są fałszywe, oznacza to, że pomiędzy obiektami występuje kolizja [18, 19].

Powoduje to znaczące komplikacje obliczeniowe, gdyż w przypadku występowania kolizji pomiędzy obiektami konieczne jest przetestowanie wszystkich 15 możliwych osi rozdzielających.

Przedstawiona nierówność (8.12) zawiera dużą liczbę operacji matematycznych, które muszą zostać wykonane w celu uzgodnienia jej stron. Część z tych operacji można wyeliminować uwzględniając własności iloczynu skalarnego i wektorowego [4, 18], kolejna część może zostać wyeliminowana dzięki uwzględnieniu specyfiki zadania. Testowanie kolizji pomiędzy dwoma obiektami typu OBB w przedstawionym algorytmie sprowadza się do przetestowania przecięcia pomiędzy obiektem, należącym do modelu oraz „pudełkiem” pochodzącym z procedury pomiaru wymiaru pudełkowego. Owo pudełko posiada jednak pewną specyficzną cechę - jest zawsze ułożone zgodnie z globalnym układem współrzędnych. Oznaczając zatem pudełko jako A można otrzymać współrzędne wektorów:

$$A_x = [1, 0, 0] \quad A_y = [0, 1, 0] \quad A_z = [0, 0, 1] \quad (8.14)$$

Prawe strony nierówności (8.12) przy uwzględnieniu rozpisania warunków (8.13) z zastosowaniem (8.14) oraz własności iloczynu skalarnego i wektorowego przedstawione w (8.15), mogą zostać zatem rozpisane z równania ogólnego na poszczególne przypadki. Wydłuża to kod programu, jednak może zaowocować skróceniem czasu jego wykonania. Prawe strony dla poszczególnych przypadków wyglądają zatem następująco:

$$\begin{array}{ll}
L = A_x & W_A + |W_B \cdot B_{xx}| + |H_B \cdot B_{yx}| + |D_B \cdot B_{zx}| \\
L = A_y & H_A + |W_B \cdot B_{xy}| + |H_B \cdot B_{yy}| + |D_B \cdot B_{zy}| \\
L = A_z & D_A + |W_B \cdot B_{xz}| + |H_B \cdot B_{yz}| + |D_B \cdot B_{zz}| \\
L = B_x & W_B + |W_A \cdot B_{xx}| + |H_A \cdot B_{xy}| + |D_A \cdot B_{xz}| \\
L = B_y & H_B + |W_A \cdot B_{yx}| + |H_A \cdot B_{yy}| + |D_A \cdot B_{yz}| \\
L = B_z & D_B + |W_A \cdot B_{zx}| + |H_A \cdot B_{zy}| + |D_A \cdot B_{zz}| \\
L = A_x \times B_x & |H_A \cdot B_{xz}| + |D_A \cdot B_{xy}| + |H_B \cdot B_{zx}| + |D_B \cdot B_{yx}| \\
L = A_x \times B_y & |H_A \cdot B_{yz}| + |D_A \cdot B_{yy}| + |W_B \cdot B_{zx}| + |D_B \cdot B_{xx}| \\
L = A_x \times B_z & |H_A \cdot B_{zz}| + |D_A \cdot B_{zy}| + |W_B \cdot B_{yx}| + |H_B \cdot B_{yx}| \\
L = A_y \times B_x & |W_A \cdot B_{xz}| + |D_A \cdot B_{xx}| + |H_B \cdot B_{zy}| + |D_B \cdot B_{yy}| \\
L = A_y \times B_y & |W_A \cdot B_{yz}| + |D_A \cdot B_{yx}| + |W_B \cdot B_{zy}| + |D_B \cdot B_{xy}| \\
L = A_y \times B_z & |W_A \cdot B_{zz}| + |D_A \cdot B_{zx}| + |W_B \cdot B_{yy}| + |H_B \cdot B_{xy}| \\
L = A_z \times B_x & |W_A \cdot B_{xy}| + |H_A \cdot B_{xx}| + |H_B \cdot B_{zz}| + |D_B \cdot B_{yz}| \\
L = A_z \times B_y & |W_A \cdot B_{yy}| + |H_A \cdot B_{yx}| + |W_B \cdot B_{zz}| + |D_B \cdot B_{xz}| \\
L = A_z \times B_z & |W_A \cdot B_{zy}| + |H_A \cdot B_{zx}| + |W_B \cdot B_{yy}| + |H_B \cdot B_{zz}|
\end{array} \quad (8.15)$$

gdzie:

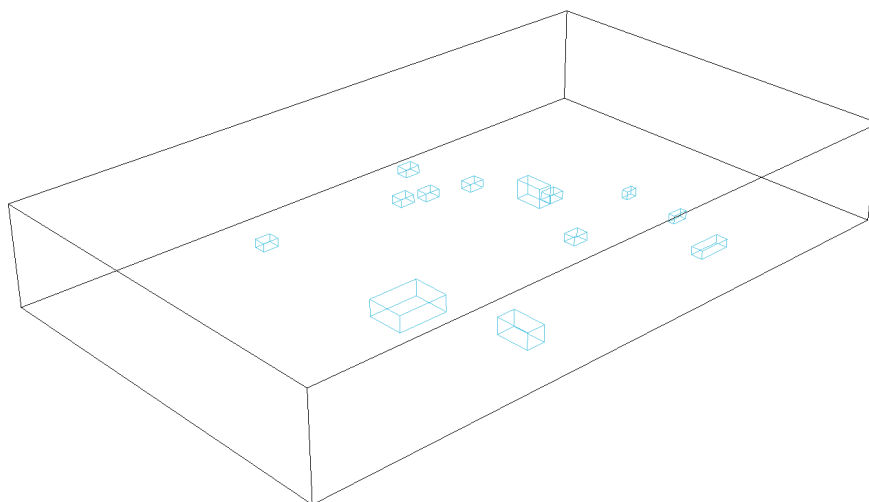
B_{i_j} - j -ta współrzędna wektora jednostkowego obiektu B reprezentującego lokalną oś i .

W dalszej części pracy będą używane oznaczenia algorytmu $v1$ dla wersji podstawowej oraz $v2$ dla wersji ze zoptymalizowanym obliczaniem nierówności.

8.3. Eksperymenty numeryczne

8.3.1. Obroty obiektów wokół różnych osi

Użyteczność wymiaru pudełkowego w zastosowaniach do analiz krajo-brazowych została wykazana zarówno w testach numerycznych algorytmu brutalnego (podrozdział 6.3), jak i podczas badań doświadczalnych z zastosowaniem algorytmu opartego na AABB (podrozdział 7.3). Z tego względu w tej części zostaną opisane przede wszystkim badania mające na celu analizę zależności wartości wymiaru pudełkowego od obrotu obiektu w przestrzeni. W tym celu przygotowany został model testowy (rys. 8.10), składający się z kilku obiektów o wymiarach „standardowych”, trzech nieco większych (określanych jako „średnie”) oraz jednego „dużego”. Ich wymiary zostały dobrane losowo w zakresie 1,5 - 2x wielkość obiektu standardowego dla średnich, oraz około 3x wielkość standardowego dla obiektu dużego.



Rysunek 8.10: Sytuacja wyjściowa do testów obrotów obiektów typu OBB

Model testowy był następnie modyfikowany według 25 różnych przypadków, uwzględniających obroty obiektów wokół różnych osi. Każdy z nich został zastosowany do obiektów o różnej wielkości, a także do grup obiektów. Część testów zakładała również składanie przypadków, czyli uwzględnianie

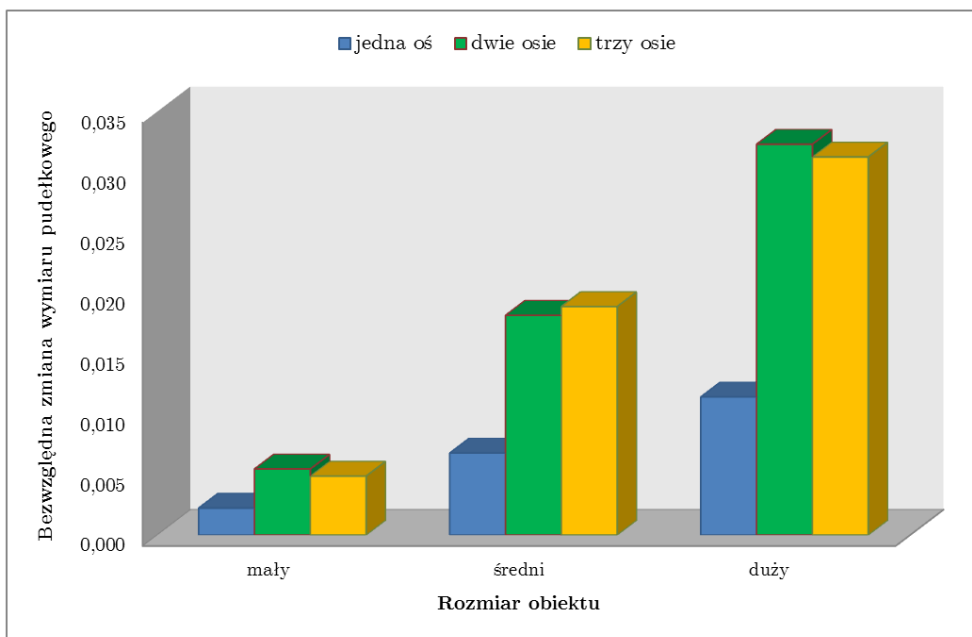
ich dla różnych obiektów w tym samym czasie. Dodatkowo, podczas każdego pomiaru testowego obliczany był również czas, konieczny do wykonania algorytmu. Jako punkt odniesienia został przyjęty model bazowy (rys. 8.10) z obliczonym wymiarem pudełkowym równym 2,568 i czasem wykonania algorytmu równym 240 sekund w algorytmie wersji *v1* oraz 17 sekund dla wersji *v2*. Już na początku badań doświadczalnych zwraca zatem uwagę fakt znacznego wydłużenia czasu wykonania pomiarów, gdyż algorytm działający w oparciu o AABB to samo zadanie wykonał w czasie 1,44 sekundy.

Wyniki otrzymane podczas analizy poszczególnych przypadków, zaprezentowane w tabeli 8.1, pozwalają na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków. Pierwszym, który rzuca się w oczy już podczas pobieżnego spojrzenia na tabelę jest fakt, iż obroty obiektów nie pozostają bez wpływu na mierzoną wartość wymiaru pudełkowego. Co więcej, praktycznie za każdym razem wymiar ten zmniejsza się pod wpływem obrotu. Wyjątki, dla przypadków 2, 6 i 10 biorą się z faktu, iż został w nich zastosowany obrót o 90° , zatem ułożenie obiektów w dalszym ciągu było zgodne z osiami globalnego układu współrzędnych. Drugim wnioskiem, dość oczywistym, jest zależność wielkości zmiany wymiaru pudełkowego od rozmiaru analizowanego obiektu. Dla obiektu najmniejszego średnia zmiana ΔD_b wynosiła -0,004, zatem była zmianą zupełnie nieistotną, stanowiła bowiem 4‰ przedziału, jaki mogą osiągać wartości tego wymiaru. Dla największego obiektu zmiana ta osiągnęła wartość 5-krotnie większą, czyli -0,021. Trzecim nasuwającym się wnioskiem jest zależność wielkości zmiany od liczby osi, biorących udział w obrocie. Podczas obrotów wokół jednej osi (przypadki 1 - 12) zmiana ta była zauważalnie mniejsza, niż podczas obrotów wokół większej ich liczby, natomiast pomiędzy obrotem wokół dwóch osi (przypadki 13 - 21), a wokół trzech osi (przypadki 22 - 25) zmiana ta nie była już tak dostrzegalna (rys. 8.11).

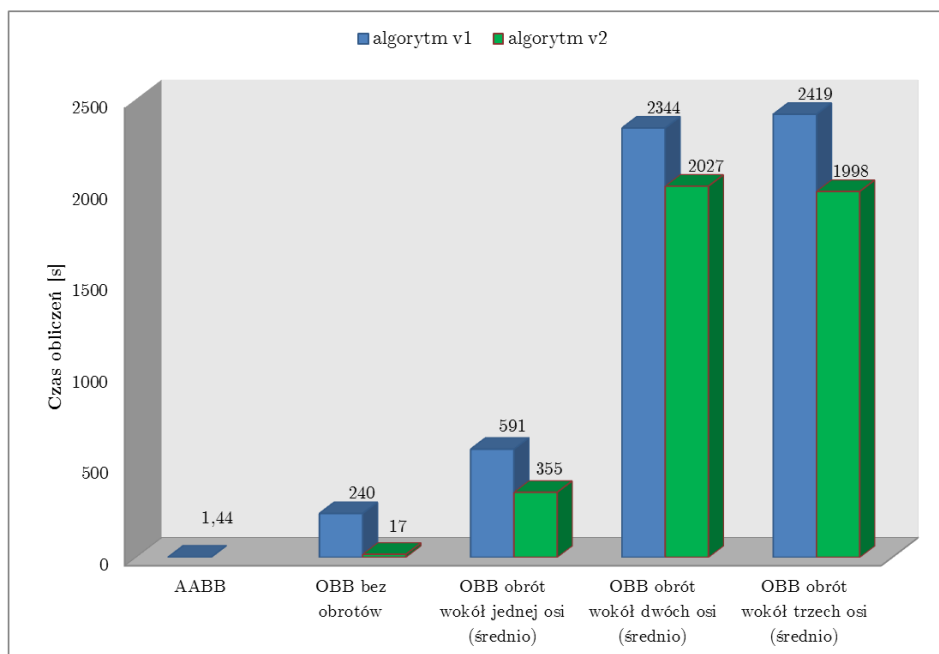
Spory problem w przypadku stosowania algorytmu opartego na OBB może stanowić czas obliczeń, gdyż jest on znacznie dłuższy niż w przypadku stosowania obiektów typu AABB. Czas ten wydłuża się w zależności od ilości osi, biorących udział w obrocie danego obiektu. Podobnie jak to miało miejsce w przypadku różnic w wartościach wymiaru pudełkowego, również podczas analizy czasu wykonania algorytmu można zauważyć, iż między obrotem wokół jednej osi, a obrotem wokół dwóch występuje znacznie większa różnica niż pomiędzy obrotem wokół dwóch osi a obrotem wokół trzech (rys. 8.12). Dodatkowo zwraca również uwagę fakt, iż korzyść czasowa z zastosowania algorytmu wersji *v2*, a więc z zastosowaniem optymalizacji, jest widoczna jedynie w przypadku obrotów wokół jednej osi - redukcja czasu wykonania

Tabela 8.1: Wymiar pudełkowy D_b oraz zmiana tego wymiaru ΔD_b dla poszczególnych przypadków, podczas przekształcania konkretnego rodzaju obiektów: dużych, średnich i małych

Nr.	Scenariusz	Duży		Średni		Mały	
		D_b	ΔD_b	D_b	ΔD_b	D_b	ΔD_b
1	Z o 45°	2,543	-0,025	2,561	-0,007	2,563	-0,005
2	Z o 90°	2,570	0,002	2,575	0,007	2,565	-0,003
3	Z o losowy kąt ujemny	2,546	-0,021	2,565	-0,003	2,561	-0,006
4	Z o losowy kąt dodatni	2,550	-0,018	2,570	0,002	2,563	-0,005
5	Y o 45°	2,554	-0,014	2,561	-0,007	2,565	-0,003
6	Y o 90°	2,560	-0,008	2,563	-0,005	2,571	0,003
7	Y o losowy kąt ujemny	2,550	-0,018	2,554	-0,014	2,565	-0,002
8	Y o losowy kąt dodatni	2,553	-0,015	2,553	-0,015	2,567	-0,001
9	X o 45°	2,555	-0,013	2,553	-0,015	2,566	-0,001
10	X o 90°	2,586	0,018	2,573	0,005	2,567	-0,001
11	X o losowy kąt ujemny	2,553	-0,015	2,550	-0,017	2,565	-0,002
12	X o losowy kąt dodatni	2,557	-0,011	2,556	-0,012	2,567	-0,001
13	X i Y o 45°	2,534	-0,034	2,549	-0,018	2,562	-0,006
14	X i Z o 45°	2,530	-0,038	2,550	-0,018	2,563	-0,005
15	Y i Z o 45°	2,536	-0,032	2,546	-0,022	2,563	-0,005
16	X i Y o losowe kąty dodatnie	2,529	-0,039	2,551	-0,017	2,563	-0,005
17	X i Z o losowe kąty dodatnie	2,536	-0,032	2,552	-0,015	2,563	-0,005
18	Y i Z o losowe kąty dodatnie	2,543	-0,025	2,548	-0,020	2,563	-0,005
19	X i Y o losowe kąty ujemne	2,535	-0,033	2,554	-0,014	2,560	-0,008
20	X i Z o losowe kąty ujemne	2,535	-0,033	2,546	-0,021	2,562	-0,006
21	Y i Z o losowe kąty ujemne	2,543	-0,025	2,550	-0,018	2,562	-0,006
22	X, Y i Z o 45°	2,531	-0,037	2,549	-0,019	2,563	-0,005
23	X, Y i Z o losowe kąty dodatnie	2,539	-0,029	2,550	-0,018	2,562	-0,006
24	X, Y i Z o losowe kąty ujemne	2,542	-0,026	2,548	-0,020	2,563	-0,004
25	X, Y i Z o zestaw losowych kątów	2,534	-0,034	2,549	-0,019	2,563	-0,005



Rysunek 8.11: Średnia zmiana wymiaru pudełkowego w zależności od wielkości obiektu i liczby osi biorących udział w obrocie, wyrażona w liczbach bezwzględnych



Rysunek 8.12: Zależność czasu wykonania poszczególnych algorytmów od ilości osi biorących udział w obrocie obiektu typu OBB

sięga wtedy 93%. Dla obrotów wokół dwóch i trzech osi, średnia redukcja wynosiła około 22%.

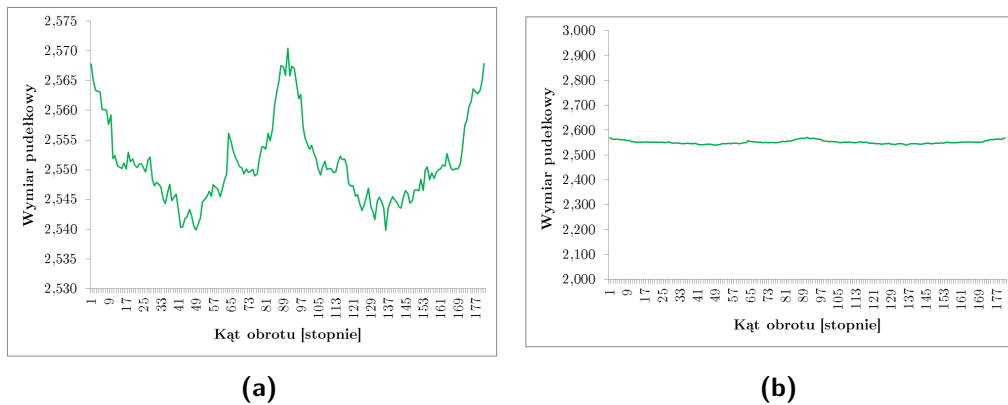
8.3.2. Obroty wokół osi Z

Opracowana metoda ma charakter uniwersalny i może być stosowana w różnych dziedzinach, jednak przedstawione w pracy przykłady zastosowań dotyczą głównie architektury krajobrazu. W tej dziedzinie najbardziej istotną osią, wokół której warto rozważać obroty obiektów i związane z tym zmiany wymiaru pudełkowego jest pionowa oś Z. Trudno sobie bowiem wyobrazić, iż obiekty zbudowane przez człowieka będą obrócone wokół którejś z pozostałych osi. Obiekty pochylone nie będą w rozważaniach brane pod uwagę.

Pierwszy analizowany przypadek testowy zakładał cykliczny obrót obiektów wokół osi Z w zakresie $0^\circ - 180^\circ$ z krokiem co 1° . Obrót w zakresie pełnych 360° nie był konieczny z uwagi na symetrię obiektów, a co za tym idzie symetrię pomiarów w zakresach $0^\circ - 180^\circ$ oraz $180^\circ - 360^\circ$. Modyfikacji takiej poddawane były obiekty z każdej grupy wielkościowej, grupy obiektów, a także bryły zmodyfikowane poprzez wydłużenie wzdłuż którejś z osi.

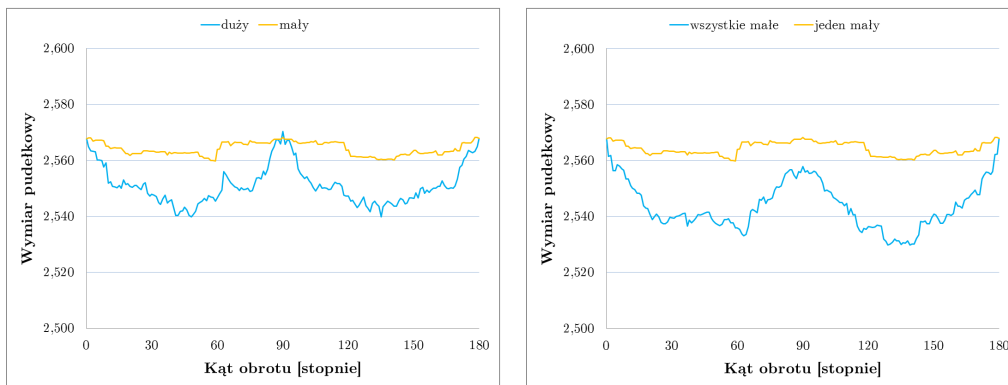
Jako pierwszy analizie został poddany największy z istniejących w scenie obiektów. Należy zwrócić uwagę, iż znajduje się on w pewnym oddaleniu od pozostałych (rys. 8.10), co może mieć delikatny wpływ na obserwowane wyniki. Otrzymane rezultaty wskazują na pewną cykliczność zmian wymiaru pudełkowego w zależności od kąta obrotu (rys. 8.12). W zakresach $0^\circ - 90^\circ$ oraz $90^\circ - 180^\circ$ można zaobserwować zależność zbliżoną do kwadratowej. Współczynnik dopasowania R^2 wielomianu drugiego stopnia dla pierwszego zakresu wynosi 0,85, natomiast dla drugiego 0,90. Lokalne ekstrema osiągnane są w okolicy wielokrotności kąta obrotu równego 45° . Zależności przedstawione na rys. 8.13a mogą się wydawać duże, jednak po przeskalowaniu jego osi pionowej do przedziału, jaki mogą osiągać wartości wymiaru pudełkowego obiektów znajdujących się w przestrzeni trójwymiarowej, ich skala nie jest już tak znaczna (rys. 8.13b).

Istotna kwestia dotyczy wpływu rozmiaru obracanego obiektu na wartość zmiany wymiaru pudełkowego, zależnej od wielkości obrotu. Istnienie takiej zależności wykazały testy przypadków przedstawione w punkcie 8.3.1, a potwierdziły analizy rotacji cyklicznych (rys. 8.14a). Im większy rozmiar danego obiektu, tym większą różnicę w wymiarze pudełkowym można zaobserwować podczas wspomnianych przekształceń. Również liczba obiektów obracanych w tym samym czasie nie pozostaje bez wpływu na obserwowany



Rysunek 8.13: Obroty cykliczne wokół osi Z dużego obiektu

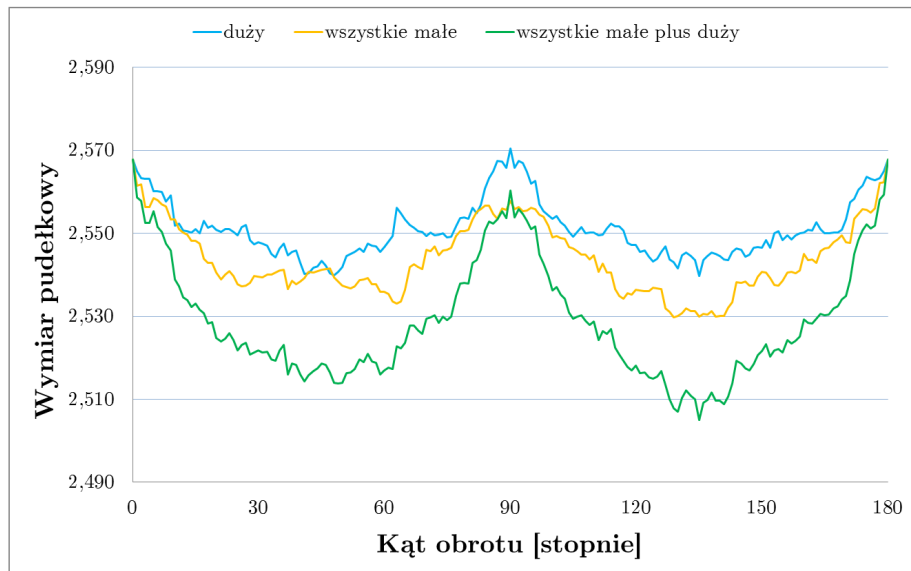
wymiar. Podczas rotacji wszystkich małych obiektów znajdujących się w scenie testowej, jego wartość zmieniała się w większym stopniu niż podczas obrotu pojedynczego obiektu o tym samym rozmiarze (rys. 8.14b). W celu zwiększenia czytelności zakres osi pionowej został ograniczony w taki sposób, aby obejmował jedynie 10% przedziału możliwych do osiągnięcia wartości.



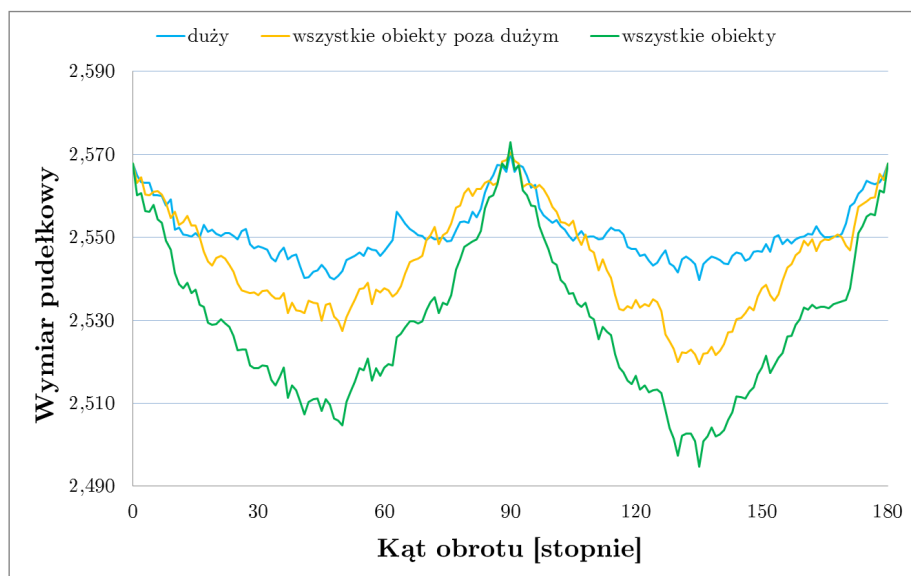
(a) Dla obiektów o różnej wielkości **(b)** Dla różnej ilości obracanych obiektów tej samej wielkości

Rysunek 8.14: Zależność wymiaru pudełkowego od kąta obrotu

Warto również rozważyć wpływ kumulowania obrotów, pochodzących od różnych obiektów na zmierzoną wartość wymiaru pudełkowego. Rys. 8.15 wykazuje istnienie powiązania pomiędzy jednoczesnym obracaniem różnych obiektów i grup, a zwiększaniem się różnicy w wymiarze pudełkowym. Jednoczesne obracanie pewnej grupy brył z wyłączeniem elementu największego powodowało mniejsze obniżenie się wartości tego wymiaru niż jednoczesne obroty przy uwzględnieniu największego obiektu. Zależność taka była obserwowana przy wszystkich testowych kumulacjach, pochodzących od różnej wielkości brył. Należy jednak zaznaczyć, iż wpływ skumulowany nie jest



(a)

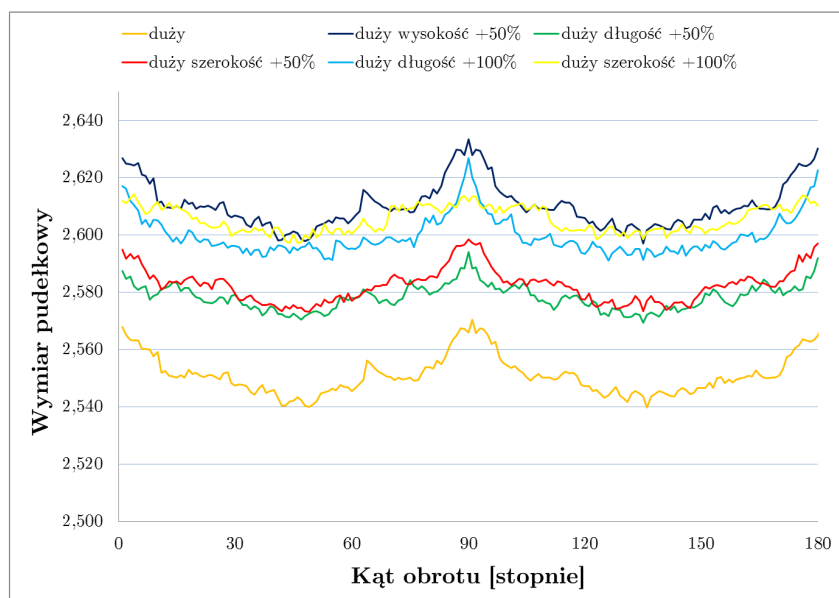


(b)

Rysunek 8.15: Kumulowanie obrotów pochodzących od obiektów różnej wielkości i grup obiektów

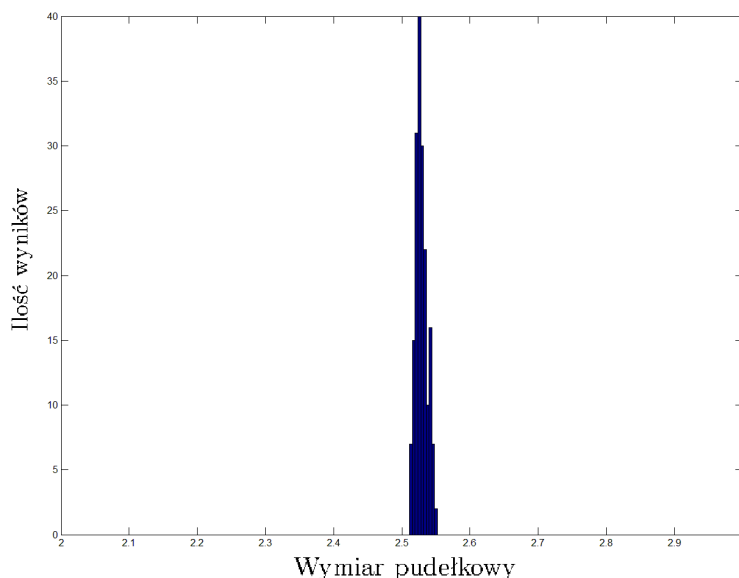
dokładną sumą matematyczną składowych, jednak jego wartość jest do tej sumy bardzo zbliżona. Może to być efektem nachodzenia na siebie niektórych obiektów podczas obrotów.

Podczas analizy obiektów przy użyciu wymiaru pudełkowego na pierwszy plan wysuwa się określanie różnicy pomiędzy dwoma stanami i zmierzonymi dla tych stanów wartościami wymiaru pudełkowego. Dlatego też istotne zadanie testowe stanowiło rozpoznanie, w jaki sposób wartość wymiaru pudełkowego zmienia się podczas obrotów dla obiektu, którego wymiary zostały w pewien sposób zmodyfikowane. W tym celu przeprowadzony został zestaw testów, polegający na cyklicznych obrotach wokół osi Z obiektu, oznaczonego jako „duży” w zakresie $0^\circ - 180^\circ$ z krokiem co 1° . Obiekt ten posiadał wymiary zbliżone do wartości $45 \times 60 \times 15$ jednostek. Został on poddany kilku modyfikacjom, polegającym na zwiększeniu któregoś z wymiarów - szerokości, wysokości bądź długości o 50 lub 100%. Największy wpływ na zmianę wymiaru pudełkowego miała zmiana wysokości obiektu; zmiana szerokości bądź długości modyfikowała ten wymiar w mniejszym zakresie. Najistotniejszy jest jednak fakt, iż obroty obiektu w żaden sposób nie zaburzyły różnic w mierzonych wartościach wymiaru pudełkowego. W dalszym ciągu różnice pomiędzy poszczególnymi stanami mogły być poprawnie interpretowane, oczywiście dla tego samego kąta obrotu (rys. 8.16).



Rysunek 8.16: Zależność wymiaru pudełkowego od kąta obrotu dla obiektu poddanego modyfikacjom polegającym na zmianie jego wymiarów

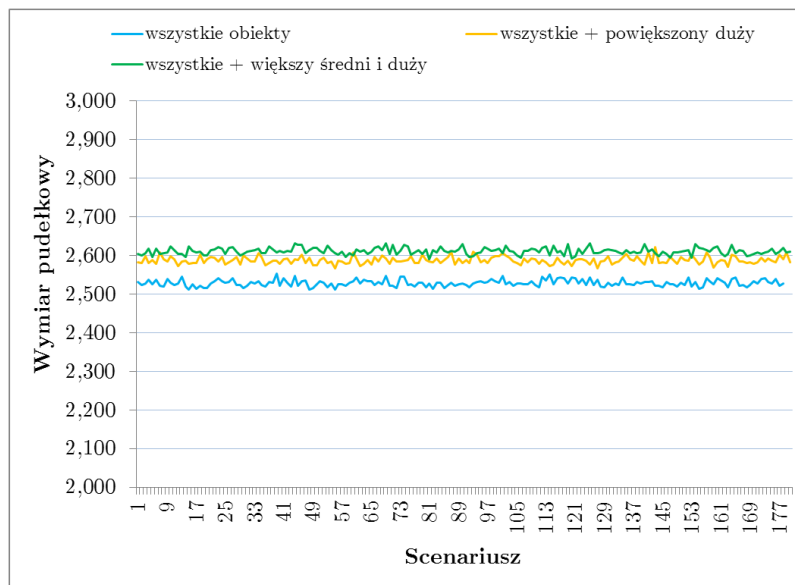
Ostatnią istotną kwestię, związaną z obrotami obiektów wokół osi Z, a zarazem ostatni przypadek testowy stanowiło wygenerowanie testowego modelu (rys. 8.10) ze wszystkimi znajdującymi się tam obiektami obróconym w sposób losowy wokół osi Z. Losowanie to zostało powtórzone 180 razy, po każdym losowaniu została przeprowadzona procedura pomiaru wymiaru pudełkowego. Otrzymane wyniki wykazują wysoką stabilność (rys. 8.17), odchylenie standardowe z próby osiągnęło wartość 0,0086.



Rysunek 8.17: Histogram obrazujący rozkład wyników pomiarów wartości wymiaru pudełkowego przy losowych obrotach wszystkich obiektów w modelu

Dodatkowo test ten został powtórzony przy zwiększonym rozmiarze kilku istniejących w scenie obiektów. Uzyskane wyniki potwierdzają wniosek, zaprezentowany dla obrotów cyklicznych - losowe obroty obiektów wokół osi Z nie zaburzają różnic w zmierzonym wymiarze pudełkowym, uzyskanych podczas zmiany rozmiaru poszczególnych obiektów (rys. 8.18).

Otrzymane wyniki sugerują, iż podczas rozpatrywania wpływu danego obiektu na wymiar pudełkowy całości modelu, bardziej istotną zmienną jest zmiana jego wielkości, niż kąta obrotu wokół osi Z. W celu zweryfikowania tej hipotezy przeprowadzony został kolejny zestaw testów numerycznych. Podany im został algorytm działający na obiektach typu AABB oraz opisywany, bazujący na analizie obiektów typu OBB. Procedura testowa w przypadku obiektów AABB polegała na jednokrotnym przeprowadzeniu pomiaru wymiaru pudełkowego dla jednego ze scenariuszy, a następnie obliczeniu różnicy pomiędzy otrzymaną wartością, a wartością bazową, o której mowa w



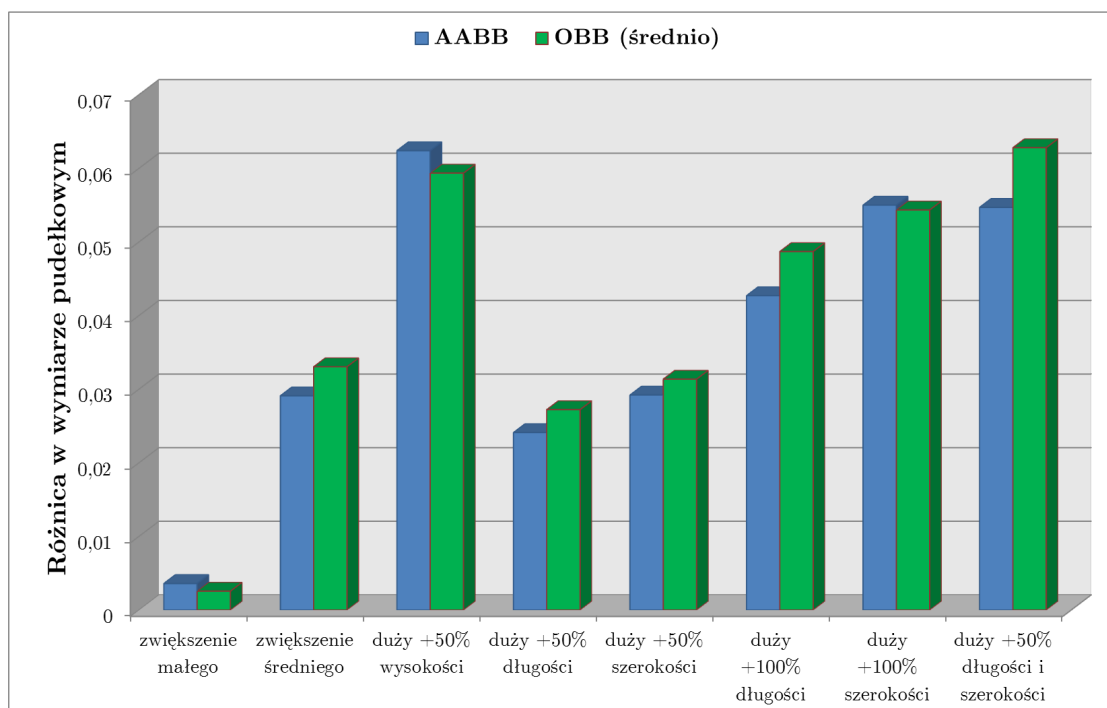
Rysunek 8.18: Wartość wymiaru pudełkowego dla obiektów obróconych w sposób losowy wokół osi Z, przy uwzględnieniu zmiany rozmiaru niektórych obiektów

p. 8.3.1. Scenariusze te oparte były o modyfikację rozmiarów obiektu dużego, oraz zwiększanie wysokości obiektów małego i średniego (rys. 8.19). Dla obiektów typu OBB zostały wykonane te same rozważania, jednak dodatkowo uwzględniany był obrót wokół osi Z. Obrót ten rozważany był dwójako, jako:

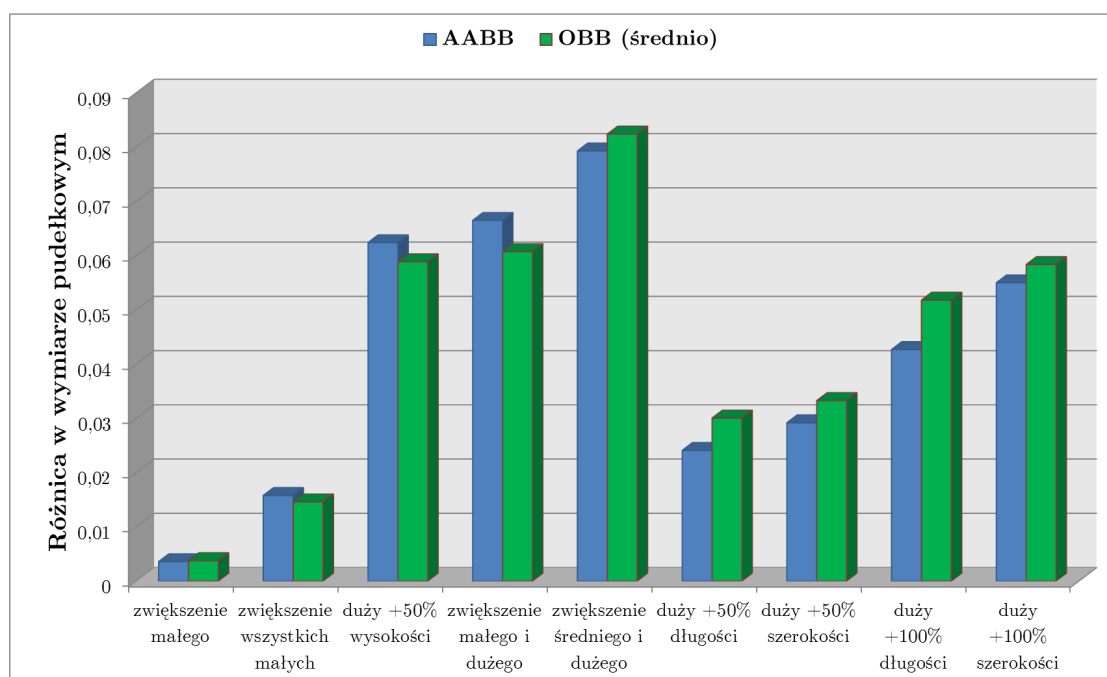
- Obrót cykliczny w zakresie $0^\circ - 180^\circ$ z krokiem co 1° . W tym przypadku obracany był tylko obiekt poddawany modyfikacji wymiarów.
- Obrót losowy. W tym przypadku obracane były wszystkie obiekty znajdujące się w modelu. Kąt obrotu każdego z nich został przyjęty w sposób losowy.

Dla każdego ze scenariuszy zostało wykonanych 180 pomiarów testowych, a otrzymane wartości zostały następnie uśrednione. Na ich podstawie, wyliczona została różnica pomiędzy stanem zmodyfikowanym a stanem bazowym. Stan bazowy, uzyskany na podstawie modelu (rys. 8.10) określony został w sposób następujący:

- Dla obiektów obracanych cyklicznie stanowił uśrednioną wartość z cyklicznych obrotów obiektu *przed* wykonaniem danej modyfikacji. Przykładowo - gdy analizowana była zmiana rozmiaru obiektu dużego, stan bazowy został wyznaczony na podstawie średniej z wartości wymiaru pudełkowego, obliczanego podczas obrotów cyklicznych obiektu dużego w zakresie $0^\circ - 180^\circ$ z krokiem co 1° .



(a) Obroty cykliczne



(b) Obroty losowe

Rysunek 8.19: Różnica w wymiarze pudełkowym pomiędzy stanem wyjściowym, a poszczególnymi stanami, dla algorytmów działających na różnych typach obiektów

- Dla obiektów obracanych losowo stanowił uśrednioną wartość ze 180 losowych układów modelu (rys. 8.10), przy czym losowość polegała jedynie na zmianie kąta obrotu wokół osi Z, a nie zmianie pozycji.

Wyniki testów, zaprezentowane na rys. 8.19 uwidaczniają wysoce interesujący fakt. Różnice w wartościach wymiaru pudełkowego pomiędzy stanem zmodyfikowanym, a stanem bazowym w przypadku obu algorytmów są do siebie bardzo zbliżone. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, iż stosowanie modelu rozszerzonego można ograniczyć do przypadków, w których obrót obiektu/obiektów ma istotny wpływ na ostateczny kształt modelu i nie może być pominięty. W pozostałych przypadkach należy zwrócić baczną uwagę na bilans zysków i strat związanych z jego zastosowaniem. Może się bowiem okazać, iż korzyść czasowa związana z zastosowaniem modelu uproszczonego będzie większa niż korzyść z osiągnięcia nieco większej dokładności w przypadku zastosowania modelu rozszerzonego.

Najbardziej widoczne różnice pomiędzy dwoma algorytmami występują w przypadku zmiany rozmiarów dużego obiektu w kierunku poziomym. Prawdopodobnej przyczyny należy upatrywać w nakładaniu na siebie dużego obiektu oraz innego obiektu w scenie, mogącego nastąpić podczas obrotu.

8.3.3. Zmiana wielkości obiektu

Podczas testów numerycznych bardzo często pojawiały się zagadnienia dotyczące wzrostu wartości wymiaru pudełkowego w przypadku powiększania jednego lub kilku obiektów. Podczas większości analiz zmiana taka była obserwowana. Może się zatem pojawić pytanie, czy pomiędzy przyrostem wielkości danego obiektu a przyrostem wartości wymiaru pudełkowego można zauważyć możliwą do opisaną zależność. Weryfikacja odpowiedzi wymagała przeprowadzenia zestawu testów, polegających na iteracyjnym powiększaniu konkretnego obiektu i jednoczesnym pomiarze wartości wymiaru pudełkowego.

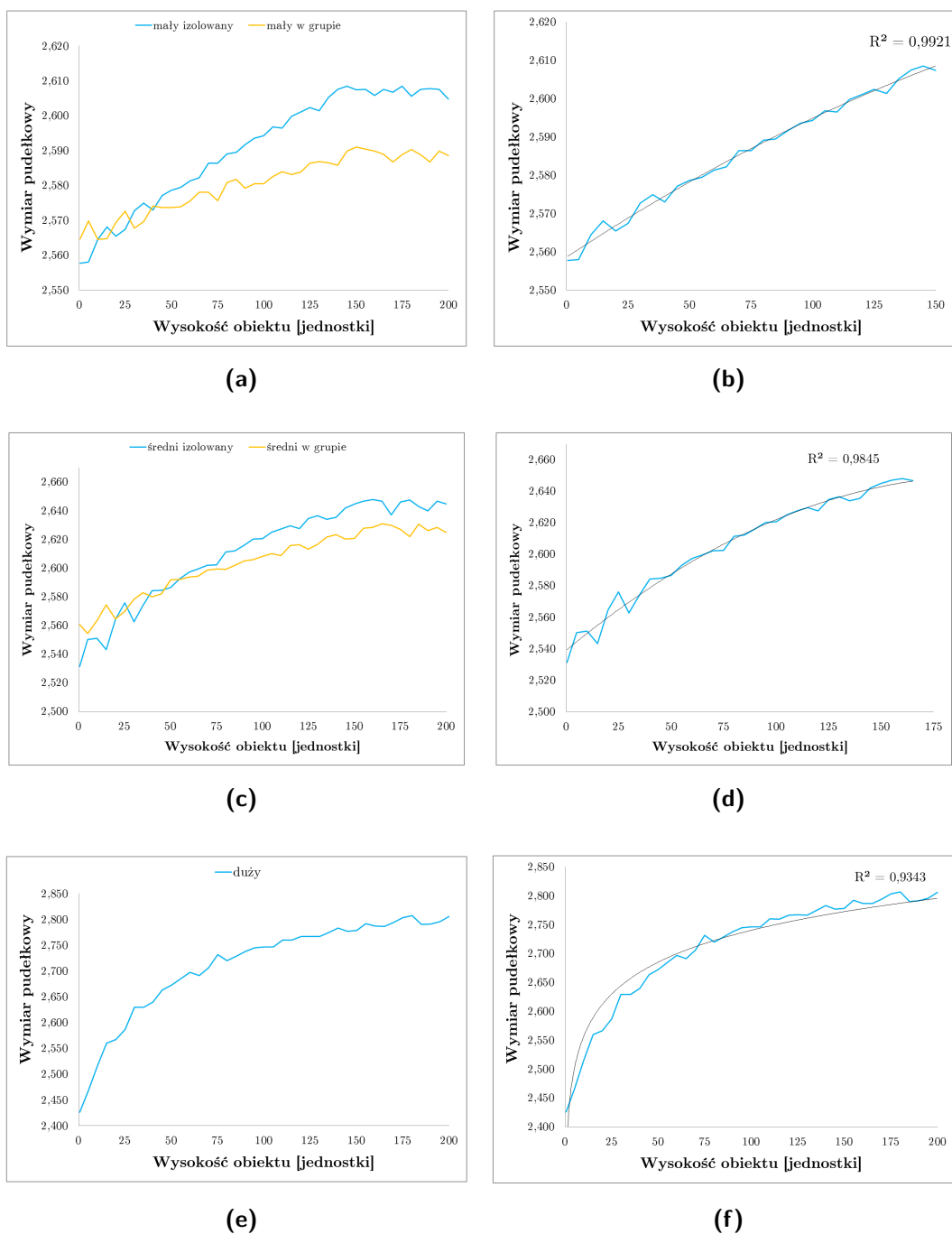
W pierwszym etapie rozpatrzone zostały przyrosty wzdłuż pionowej osi Z. Jako sytuacja wyjściowa przyjęty został model przedstawiony na rys. 8.10, w którym zmieniona została wielkość przestrzeni ograniczającej, w celu pomieszczenia w niej obiektów o znacznie zwiększonych wymiarach. Do testów zostało wybranych 5 różnych rodzajów obiektów występujących w modelu:

- mały izolowany;
- mały w grupie;
- średni izolowany;
- średni w grupie;

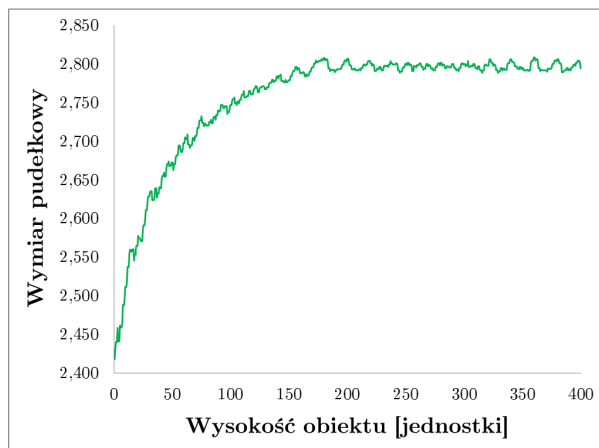
- duży.

Mały obiekt miał podstawę o wielkości 15 x 20 jednostek, średni około 24 x 36 jednostek, oraz duży około 46 x 63 jednostek. Jako algorytm testowy wybrany został algorytm uproszczony, działający na obiektach typu AABB, z uwagi na znacznie krótszy czas działania, a także na wnioski opisane pod koniec poprzedniej sekcji. Pojedynczy test polegał na generowaniu modelu, w którym jeden z pięciu wymienionych obiektów był podwyższany o 1 jednostkę w trakcie 1 iteracji. W celu lepszej prezentacji danych większość wykresów została przeskalowana w taki sposób, aby na osi poziomej uwzględniana była co 5 iteracja.

Analiza otrzymanych wyników prowadzi do interesujących wniosków. Po osiągnięciu określonej liczby iteracji wartość wymiaru pudełkowego stabilizowała się na pewnym poziomie. Zarówno liczba iteracji prowadząca do wysycenia, jak i jego poziom zależne były od rozmiaru badanego obiektu (rys. 8.20). W przypadkach obiektów małych (rys. 8.20a) stabilizacja następowała po około 150 iteracjach, a zatem przy wysokości obiektu równej 150 jednostkom. Dla obiektów średnich (rys. 8.20c) proces ten można zaobserwować po około 170 iteracjach, natomiast dla dużych - po 200 (rys. 8.20e). Dodatkowo zwraca uwagę fakt, iż po ograniczeniu liczby pomiarów do wspomnianej ilości iteracji, do każdego z wykresów możliwe jest dopasowanie linii trendu z dość wysokim współczynnikiem R^2 , którego wartości pozostają zawsze powyżej granicy 0,9. W przypadku obiektów małych (rys. 8.20b), trend najlepiej oddaje wielomian stopnia drugiego ($R^2 = 0,992$), lub linia prosta ($R^2 = 0,987$). Im większy obiekt, tym bardziej linia trendu odbiega od kształtu linii prostej. Dla obiektów średnich (rys. 8.20d) dopasowanie wielomianem stopnia drugiego posiada współczynnik $R^2 = 0,985$, podczas gdy dopasowanie liniowe $R^2 = 0,952$. Najciekawsza sytuacja ma jednak miejsce w przypadku obiektu największego (rys. 8.20f), gdzie najlepszym dopasowaniem okazuje się być zależność logarytmiczna, przy wartości $R^2 = 0,969$. Podczas bardziej szczegółowego testu, dla którego jedna iteracja odpowiadała podwyższeniu obiektu o jedną jednostkę, można zauważyć pewne niewielkie fluktuacje wartości wymiaru pudełkowego po osiągnięciu przez niego poziomu wysycenia (rys. 8.21). Dalsze zwiększanie wysokości (do wartości 1000 jednostek) nie powodowało ani zwiększania fluktuacji ani odejścia od poziomu wysycenia.

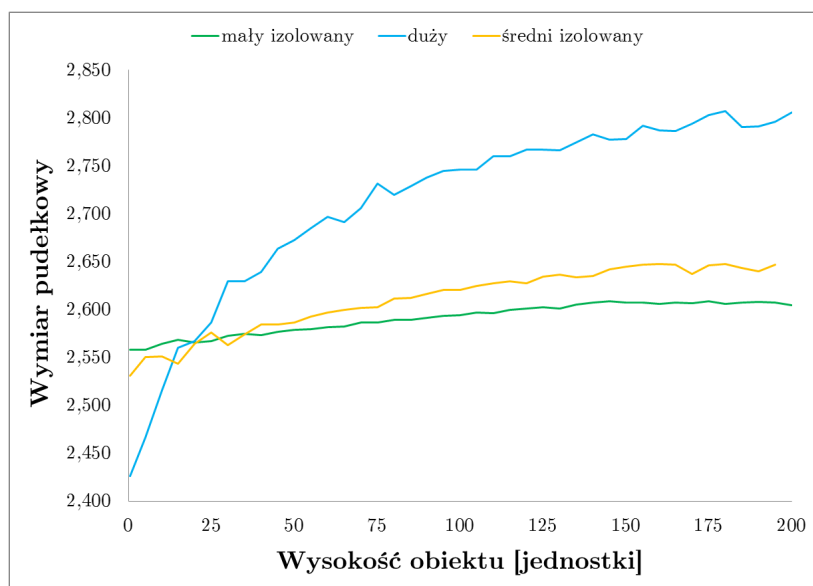


Rysunek 8.20: Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla różnych obiektów. Kolumna z prawej strony przedstawia te same wykresy ograniczone do momentu osiągnięcia wysycenia, wraz z linią trendu, dla obiektów izolowanych



Rysunek 8.21: Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla dużego obiektu przy zwiększonej gęstości pomiarów

Poziom stabilizacji wyników dla każdego z obiektów znajdował się przy innej wartości wymiaru pudełkowego. Im mniejszy był dany obiekt, tym wcześniej i szybciej następowało wysycenie osiąganych wartości (rys. 8.22). Inny punkt startowy każdej z linii należy tłumaczyć początkową nieobecnością (zerową wysokością) danego typu obiektu. Przykładowo, dla linii zielonej, odpowiadającej małemu obiektowi, w modelu od samego początku obecny był zarówno obiekt średni, jak i duży. Z tego względu początkowa wartość wymiaru pudełkowego jest najwyższa.



Rysunek 8.22: Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla obiektów o różnych rozmiarach

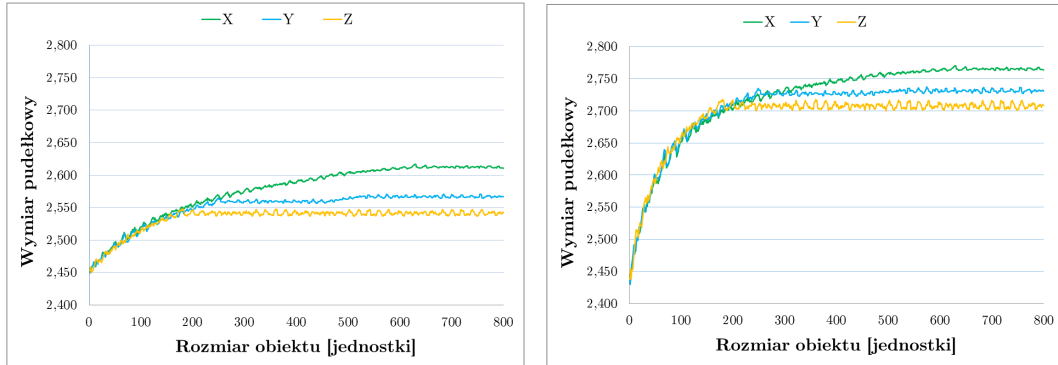
Otrzymane wyniki, dotyczące logarytmicznej zależności oraz wysycania się wartości wymiaru pudełkowego na pewnym poziomie okazały się dość zaskakujące. Z tego powodu test został rozbudowany w taki sposób, aby uwzględniał również potencjalne zwiększenie rozmiarów obiektu wzdłuż osi X oraz Y. W tym samym modelu testowym obiekt duży został zmodyfikowany w taki sposób, aby jego podstawa była symetryczna. Wielkość podstawy została przyjęta w jednym teście na 20 x 20 jednostek, natomiast w drugim 40 x 40 jednostek. Przyrost wielkości wzdłuż każdej z osi analizowany był oddzielnie, pozostałe procedury testowe pozostały bez zmian.

W początkowej fazie zmiany wielkości obiektu przyrost wymiaru pudełkowego postępował praktycznie w takim samym tempie dla każdej z trzech osi. Ciekawe zjawisko miało jednak miejsce w fazie późniejszej - wysycenie wartości wymiaru pudełkowego zostało osiągnięte jako pierwsze podczas przyrostu obiektu wzdłuż osi Z. Jednocześnie wartość stabilizacji była najniższa spośród wszystkich trzech osi. Takie samo zachowanie zostało zaobserwowane zarówno dla podstawy wielkości 20 x 20 jak i 40 x 40 (rys. 8.23 a i b). Podobnie jak w przykładzie opisywanym na rys. 8.20, również i w tym przypadku większy obiekt osiągał wyższą wartość wysycenia, oraz kształt wykresu zależności zbliżony do krzywej logarytmicznej. Zależność ta została potwierdzona również na innym modelu testowym, obejmującym znacznie większą grupę obiektów znajdujących się w otoczeniu (wyniki nie są prezentowane w pracy). Jest to fakt wysoce ineteresujący, gdyż wydaje się pozostawać w zgodzie z prawem Webera-Fechnera, które werbalnie może zostać zapisane jako [46]:

Wartość reakcji układu biologicznego jest proporcjonalna do logarytmu bodźca.

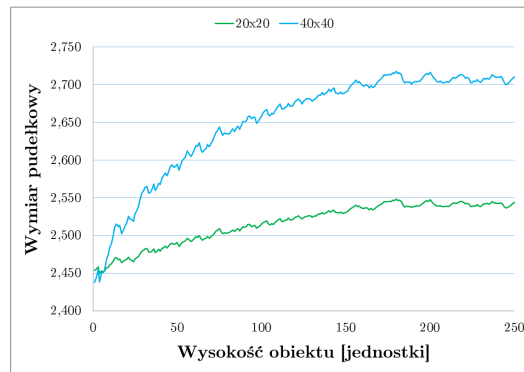
Prawo to znajduje swoje zastosowanie dla wielu różnorodnych bodźców, m.in. wzrokowych czy słuchowych. Nie jest zatem wykluczone, iż będzie spełnione również w przypadku postrzegania zmian wielkości obserwowanych obiektów w powiązaniu z wymiarem pudełkowym. Inne sformułowanie przytoczonego prawa, mówi, że jeśli porównywane są wielkości bodźców, na naszą percepcję oddziałuje nie arytmetyczna różnica pomiędzy nimi, lecz stosunek porównywanych wielkości. Można to w sposób bezpośredni odnieść do różnic w wysokościach zabudowy - czteropiętrowy blok wielorodzinny, o wysokości około 15 m w sposób wyraźny odróżnia się od bloku dziesięciopiętrowego, którego wysokość wynosi około 30 m, gdyż stosunek wysokości równy jest w tym przypadku około 2. Jednak ta sama różnica arytmetyczna nie będzie praktycznie dostrzegalna dla wieżowców, o wysokościach odpowiednio 100 i 115 metrów, gdyż stosunek ich wielkości wynosi zaledwie 1,15. Podobną

obserwację można uczynić podczas analizy rys. 8.23b, co również sugeruje spełnienie wspomnianego prawa. Wymagane są jednak dalsze badania w tym kierunku.



(a) Wielkość podstawy - 20 x 20

(b) Wielkość podstawy - 40 x 40



(c) Różne wielkości podstaw dla przyrostu wzdłuż osi Z

Rysunek 8.23: Przyrost wartości wymiaru pudełkowego w zależności od przyrostu wielkości obiektu wzdłuż różnych osi

8.4. Podsumowanie

Przedstawiony model, oparty na obiektach typu Oriented Bounding Boxes jest naturalnym rozszerzeniem modelu zaprezentowanego w poprzednim rozdziale. W dalszym ciągu stanowi spore uproszczenie rzeczywistości, jednak uwzględnia już dodatkowe cechy, jak obrót wokół dowolnej osi. Obroty te nie pozostają bez wpływu na mierzoną wartość wymiaru pudełkowego. W ponad 90% przypadków ich uwzględnienie powodowało zmniejszenie tej wartości. Im większy obiekt, tym większy był również wpływ obrotu na wynik końcowy. Jednocześnie większa liczba osi, biorących udział w obrocie obiektu powodowała większą zmianę osiąganą wartość, przy czym pomiędzy

obrotem wokół dwóch osi, a wokół trzech osi różnica nie była tak dostrzegalna jak pomiędzy obrotem wokół jednej osi a wokół dwóch.

Z uwagi na fakt, iż prowadzone testy, a zarazem większość przykładów dotyczyła architektury krajobrazu, dokładnie przeanalizowane zostały obroty wokół pionowej osi Z. Podczas obrotów w zakresie $0^\circ - 180^\circ$ z krokiem co 1° można dostrzec pewną cykliczność zmian - lokalne ekstrema wartości wymiaru pudełkowego osiągane są w okolicy wielokrotności kąta obrotu równego 45° , przy czym przy wielokrotnościach 90° wartość ta powraca do wielkości wyjściowej. Podczas obracania kilku obiektów w tym samym czasie dało się zauważyć kumulowanie się wpływu zmiany wartości, pochodzącej od różnych obiektów, jednak nie był on ścisły w sensie matematycznym, a jedynie przybliżony w pewnym zakresie. Bardzo istotny jest fakt, iż podczas rozpatrywania wpływu danego obiektu na wymiar pudełkowy całości modelu, zmienną posiadającą większe znaczenie jest jego rozmiar niż kąt obrotu wokół osi Z. Podobne obserwacje zostały uczynione podczas testów, zakładających losowy obrót wokół osi Z dla każdego obiektu znajdującego się w modelu. Losowość ta nie zaburza w żaden sposób różnic w zmierzonym wymiarze pudełkowym uzyskanych podczas rozpatrywania dwóch, lub większej ilości stanów, w których dany obiekt różnił się rozmiarem.

Problemem w przypadku analiz opartych na OBB może okazać się jednak czas, potrzebny na przeprowadzenie jednorazowego obliczenia wartości wymiaru pudełkowego. Jest on zdecydowanie większy, niż podczas stosowania obiektów typu AABB, a przyrost jest liczony w tysiącach procent przy uwzględnieniu obrotu o jedną oś, aż do dziesiątków tysięcy procent przy analizie obejmującej trzy osie. Okazuje się jednak, iż przy pomiarze różnic wynikających ze zmiany rozmiaru obiektu posiadają one bardzo zbliżone wartości w przypadku pomiarów algorytmem opartym na AABB i tym opartym na OBB, po uśrednieniu wartości z cyklu obrotów, bądź też obrotów losowych. Stosowanie modelu OBB jest zatem zasadne w przypadkach rozważania wpływu obrotów poszczególnych elementów modelu na końcową wartość wymiaru pudełkowego. Gdy jednak analizowany jest jedynie wpływ zmiany rozmiaru, bądź zmiany ilości obiektów, korzyść czasowa wynikająca z zastosowania modelu uproszczonego może przeważać nad potencjalnie wyższą dokładnością modelu rozszerzonego.

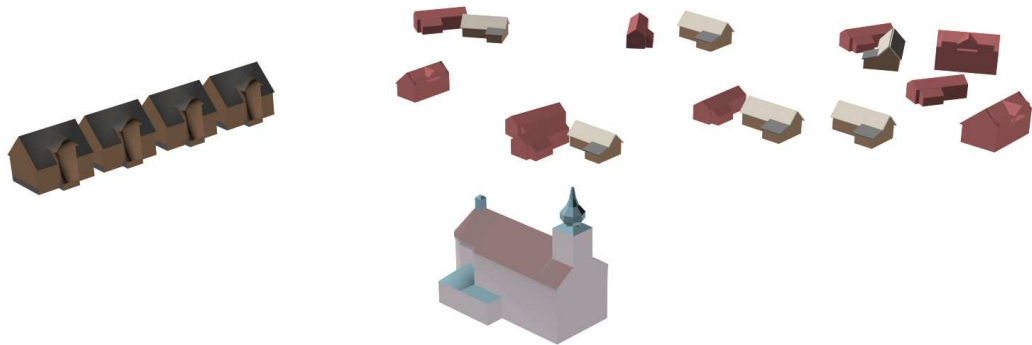
Interesujące wnioski ukształtowały się również podczas analizy zmian wartości wymiaru pudełkowego spowodowanych zwiększaniem wysokości obiektu. Okazuje się bowiem, iż mierzona wartość osiąga w pewnym momencie punkt wysycenia, wokół którego występują drobne, lecz niewiele znaczące

fluktuacje. Punkt ten osiągany jest zasadniczo szybciej dla obiektów o mniejszych rozmiarach, a wartość stabilizacji w danym punkcie jest tym większa, im większy jest dany obiekt. Dodatkowo wraz ze wzrostem rozmiaru obiektu, krzywa reprezentująca na wykresie zależność wymiaru pudełkowego od wielkości, przybiera kształt coraz bardziej zbliżony do logarytmicznego. Wyliczenia te pozostają w zgodzie z empirycznym wrażeniem zmysłowym. Bryła budynku wyróżniająca się swoją wysokością z otoczenia jest łatwo dostrzegalna. Kilku- czy kilkunastokrotna różnica wysokości nie sprawia obserwatorowi większej różnicy - i tak jest ona postrzegana jako dysonans. Może on jednak odbierać różnice znacznie mniejsze. Jest to o tyle istotne, iż wysokość danego obiektu architektonicznego jest postrzegana jako jedna z ważniejszych jego cech, gdyż bardzo często w dokumentach planistycznych jest określana jej maksymalna wartość.

Rozdział 9

Model zaawansowany oparty na siatce wielokątowej

Model oparty na obiektach typu OBB, przedstawiony w poprzednim rozdziale, stanowił właściwe rozwinięcie modelu podstawowego w kierunku lepszego odwzorowania rzeczywistych sytuacji. W dalszym ciągu jednak stanowił on bardzo duże uproszczenie rzeczywistości, gdyż obiekty w nim zawarte posiadały kształt prostopadłościanów. Nie uwzględniał on zatem charakterystyki niektórych budynków, która pojawia się dopiero podczas uwzględnienia szczegółów, przykładowo spadzistych dachów i kościelnych wież. Detale te uwidaczniają się dopiero w modelu opartym na obiektach składających się z wielokątów (rys. 9.1).



Rysunek 9.1: Przykładowy model składający się z obiektów reprezentowanych za pomocą siatek wielokątowych

9.1. Konstrukcja modelu

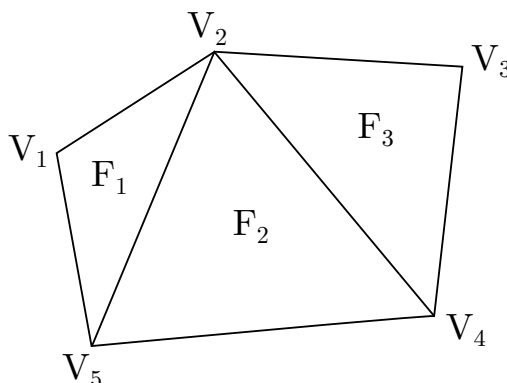
W odróżnieniu od obiektów typu *Bounding Box*, na których oparte były dwa opisywane wcześniej modele, a do których opisu wystarczyło znać punkt centralny i długości krawędzi, reprezentacja za pomocą siatki jest bardziej skomplikowana. Siatka wielokątowa jest zbiorem krawędzi, wierzchołków i wielokątów tak połączonych, że każda krawędź jest wspólna co najmniej dla dwóch wielokątów. Krawędź łączy dwa wierzchołki, natomiast wielokąt jest zamkniętą sekwencją krawędzi. Krawędź może być wspólna dla dwóch sąsiednich wielokątów, wierzchołek jest wspólny dla przynajmniej dwóch krawędzi i każda krawędź jest częścią jakiegoś wielokąta. Siatka wielokątowa może być reprezentowana na różne sposoby - w sposób bezpośredni, za pomocą wskaźników na listę wierzchołków, lub wskaźników na listę krawędzi [15].

Do utworzenia prezentowanych w tym rozdziale modeli została zastosowana reprezentacja wierzchołkowa. W reprezentacji tej każdy wierzchołek wielokąta jest zapisywany w pamięci tylko raz, natomiast wielokąt jest reprezentowany za pomocą wskaźników na listę wierzchołków (rys. 9.2). W przedstawionym przykładzie mamy zatem zbiór wierzchołków

$$V = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) = ((x_1, y_1, z_1), \dots, (x_5, y_5, z_5)) \quad (9.1)$$

oraz zbiór wielokątów reprezentowanych za pomocą tych wierzchołków:

$$\begin{aligned} F_1 &= (1, 2, 5) \\ F_2 &= (2, 4, 5) \\ F_3 &= (2, 3, 4) \end{aligned} \quad (9.2)$$



Rysunek 9.2: Reprezentacja wierzchołkowa siatki wielokątowej w modelu krawędziowym

9.2. Konstrukcja algorytmu

Radykalna zmiana konstrukcji modelu pociągnęła za sobą konieczność istotnych modyfikacji w algorytmie. Moduł eksportujący dane z programu 3ds Max musiał zostać stworzony praktycznie od podstaw. Plik zawierający dane o modelu musiał bowiem zawierać wszystkie elementy konieczne do odtworzenia reprezentacji wierzchołkowej siatki wielokątowej, a zatem listę wierzchołków oraz listę wielokątów, zawierających indeksy wierzchołków. Dodatkowo istotnym elementem w dalszej części algorytmu jest znajomość współrzędnych wektora normalnego do danego wielokąta, pozwalająca określić, po której jego stronie znajduje się określony punkt w przestrzeni. Dane o tym wektorze również są zatem eksportowane (Listing 9.1).

Listing 9.1: Fragment pliku zawierającego dane o modelu 3D mesh; wyszczególnione współrzędne wierzchołków, lista wielokątów ze wskaźnikami na wierzchołki oraz lista normalnych.

Mesh :

Vertex :

53 [1163.85 , -713.764 , 571.062]

[1155.24 , -713.764 , 571.049]

[1155.24 , -707.928 , 572.668]

[1163.85 , -707.928 , 572.668]

.....

Face :

75 [40 , 39 , 38] [38 , 41 , 40] [20 , 13 , 11] [20 , 11 , 5]

.....

Normal :

[0.139812 , -0.227833 , 0.96361]

[0.139989 , -0.225466 , 0.964141]

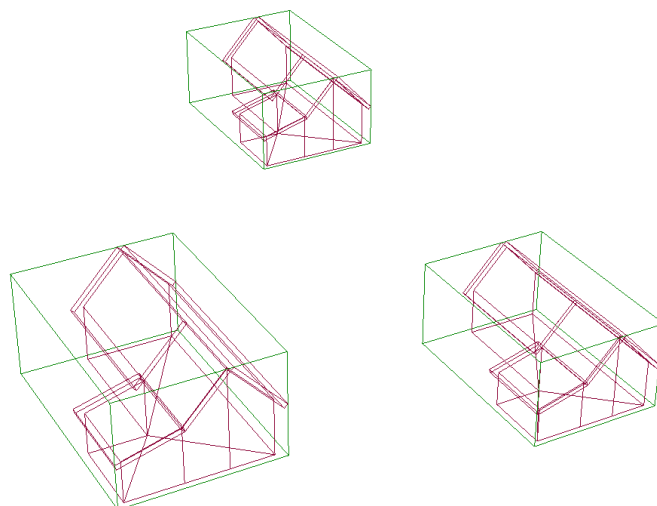
[0 , -1 , 0] [0.527484 , -0.849565 , 0]

.....

Z uwagi na modułową konstrukcję algorytmu, jego główne etapy, opisane w podrozdziale 7.2 w dalszym ciągu pozostają niezmienione. Również etap drugi, polegający na utworzeniu podprzestrzeni danego obiektu bazuje na opracowanym wcześniej rozwiązaniu. Dla każdego obiektu znajdowane są bowiem skrajne wierzchołki:

$$\begin{aligned} X_{min}, Y_{min}, Z_{min} \\ X_{max}, Y_{max}, Z_{max} \end{aligned} \quad (9.3)$$

które grupowane są w zbiory zgodnie z formułą (8.7), a następnie obliczane są współrzędne AABB na podstawie (8.8). Współrzędne te stanowią wierzchołki podprzestrzeni ograniczającej, w której będą prowadzone odpowiednie obliczenia (rys. 9.3).



Rysunek 9.3: Przykładowe obiekty reprezentowane za pomocą siatki wielokątowej oraz odpowiadające im podprzestrzenie ograniczające

Test kolizji

Elementem algorytmu, który musiał zostać poddany gruntownej przebudowie, a w zasadzie konstrukcji od podstaw, jest test kolizji. Istniejące algorytmy do przeprowadzenia testów kolizji pomiędzy dwiema siatkami są dość czasochłonne obliczeniowo, z tego też względu został stworzony algorytm dostosowany do specyfiki zadania, fragmentami bazujący na istniejących i opublikowanych rozwiązaniach. Poszczególne fragmenty algorytmu realizowane są w utworzonych wcześniej podprzestrzeniach.

Test zawierania w siatce

W każdej z podprzestrzeni obiektu przeprowadzany jest test pozwalający ocenić, czy dane pudełko zawarte jest w siatce tworzącej dany obiekt. W tym celu analizowane jest każde pudełko z podprzestrzeni. Analiza ta polega na ocenie, czy wierzchołek danego pudełka zawiera się w siatce obiektu. Jeżeli choć jeden z wierzchołków jest w tej siatce zawarty, oznacza to, iż pudełko przecina dany obiekt, czyli zawiera w sobie jakiś jego fragment. Jest ono wtedy przez algorytm uznawane za spełnione, zgodnie z definicją wymiaru pudełkowego. Test zawierania wierzchołka w siatce nie jest jednak zadaniem prostym w realizacji i opiera się na badaniu przecięcia promień/trójkąt.

Z każdego wierzchołka analizowanego w danym momencie pudełka można wyprowadzić w losowym kierunku promień

$$R(t) = O + tD \quad (9.4)$$

gdzie:

O - punkt zaczepienia promienia,

D - znormalizowany wektor kierunku promienia,

t - odległość od punktu zaczepienia.

Przyjmując, iż trójkąt zdefiniowany jest za pomocą wierzchołków V_0, V_1, V_2 można określić punkt znajdujący się na trójkącie, jako

$$T(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (9.5)$$

gdzie (u, v) są współrzędnymi barycentrycznymi, spełniającymi warunki:

$$\begin{aligned} u &\geq 0 \\ v &\geq 0 \end{aligned} \quad (9.6)$$

$$u + v \leq 1$$

Warunek na wystąpienie przecięcia pomiędzy promieniem a trójkątem sprowadza się zatem do sprawdzenia równości

$$R(t) = T(u, v) \quad (9.7)$$

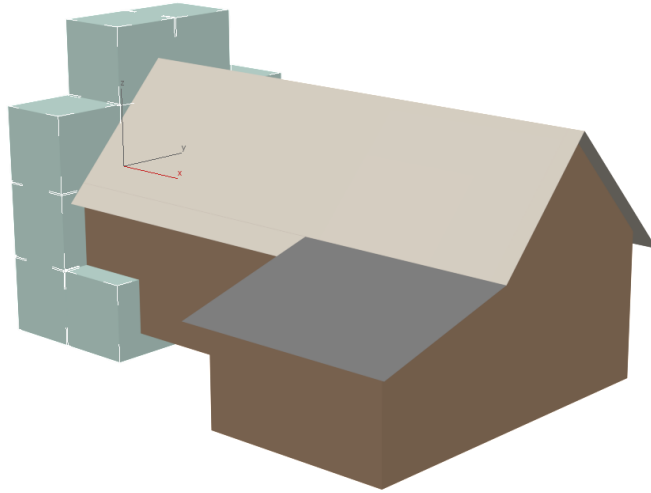
Podstawiając za obie strony równania (9.7) wartości z (9.4) oraz (9.5) otrzymuje się

$$O + tD = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (9.8)$$

co po przeorganizowaniu i przekształceniu na postać macierzową sprowadza się do

$$[-D, V_1 - V_0, V_2 - V_0] \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0 \quad (9.9)$$

Zatem odległość potencjalnego punktu przecięcia promienia z trójkątem oraz jego współrzędne barycentryczne mogą zostać obliczone z powyższego układu równań liniowych.



Rysunek 9.4: Pudełka przecinające się z siatką wykryte dzięki testowi zawierania

Oznaczając krawędzie pomiędzy wierzchołkami trójkąta jako wektory:

$$\begin{aligned} E_1 &= V_1 - V_0 \\ E_2 &= V_2 - V_0 \end{aligned} \tag{9.10}$$

oraz $T = O - V_0$ można otrzymać rozwiązanie układu 9.9 korzystając z wzorów Cramera oraz własności iloczynu wektorowego. Otrzymuje się wtedy

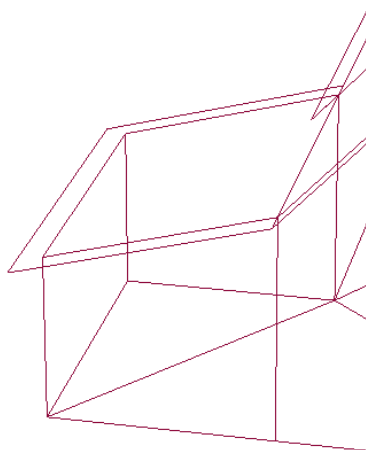
$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{P \cdot E_1} \begin{bmatrix} Q \cdot E_2 \\ P \cdot T \\ Q \cdot D \end{bmatrix} \tag{9.11}$$

przy czym $P = D \times E_2$ oraz $Q = T \times E_1$ [38].

Jeśli dla danego promienia oraz wielokąta spełnione są warunki (9.6) oraz warunek $t \geq 0$, wtedy promień ten przecina badany wielokąt. Dodatkowo liczba przecięć promienia z całością badanej siatki informuje o tym, czy punkt zaczepienia promienia znajduje się wewnątrz, czy na zewnątrz siatki. Jeśli liczba ta jest nieparzysta, punkt znajduje się wewnątrz, jeśli parzysta - na zewnątrz.

Test ten prowadzony jest dla każdego wierzchołka analizowanego aktualnie pudełka, przy czym wystarczy znalezienie jednego punktu wewnętrznego, aby pudełko to mogło zostać uznane za wypełnione.

Przedstawiony warunek związany z liczbą przecięć promienia w celu określenia położenia punktu względem siatki wielokątowej prowadzi do sformułowania warunku poprawności siatki, która może zostać zastosowana w modelu. Może bowiem podczas tworzenia siatki zaistnieć sytuacja, w której w celu zmniejszenia ilości użytych wielokątów, pewne elementy budowli, jak np. dachy, zabudowy balkonów czy balustrady będą reprezentowane pojedynczym wielokątem, nie posiadającym grubości (rys. 9.5). Taka sytuacja może prowadzić do powstania błędów typu *false-positive*, gdyż wierzchołek znajdujący się w okolicy takiego wielokąta może zostać uznany jako zawierający się w siatce. Z tego samego względu w siatce nie mogą istnieć „dziury”, natomiast mogą występować detale typu wnęki, oraz siatka nie musi być siatką wypukłą.



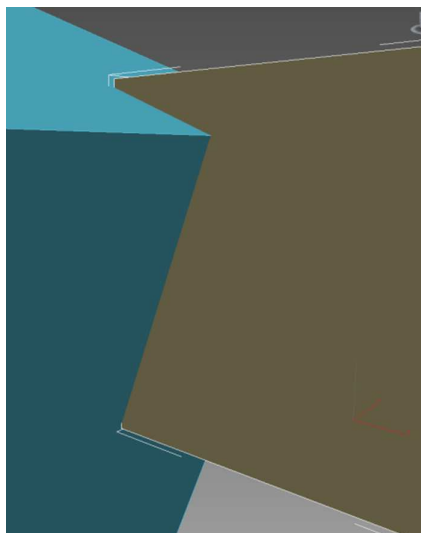
Rysunek 9.5: Dach budynku reprezentowany pojedynczym wielokątem o zerowej grubości

Warunki na poprawność siatki mogą zatem zostać zapisane następująco:

1. siatka wielokątowa musi być siatką zamkniętą,
2. elementy wystające poza obręb zasadniczej bryły nie mogą być reprezentowane przez wielokąty o zerowej grubości.

Test przecinania krawędzi

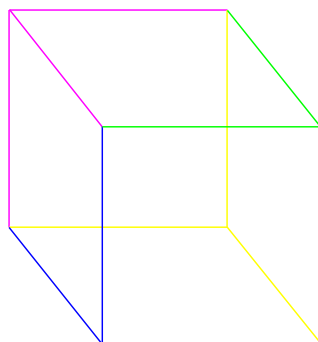
Test zawierania w siatce wykrywa większość pudełek, które zawierają w sobie jakiś fragment badanego obiektu, jednak mogą się zdarzyć sytuacje, w których test ten nie jest wystarczający. Taki przypadek ma przykładowo miejsce wtedy, gdy krawędź obiektu przecina ścianę pudełka, jednak żaden z wierzchołków pudełka nie znajduje się wewnątrz siatki obiektu (rys. 9.6).



Rysunek 9.6: Przykładowa sytuacja kolizji pudełka (z prawej) i obiektu, w której test zawierania w siatce nie wygeneruje prawidłowego rezultatu

Test przecinania krawędzi jest prowadzony dla pudełek odrzuconych w teście zawierania w siatce. Bazuje on na opisanej wyżej metodzie, przy uwzględnieniu kilku poprawek:

1. Promień z danego wierzchołka nie jest wysyłany w kierunku losowym, lecz określany jest na podstawie wektora utworzonego z dwóch wierzchołków połączonych jedną krawędzią. W celu uniknięcia powtórzeń brane są pod uwagę cztery wierzchołki, z każdego z nich wysyłane są po trzy promienie (rys. 9.7).
2. Samo spełnienie warunku przecięcia promienia z siatką nie jest wystarczające. Konieczne jest również określenie punktów przecięcia, które muszą znajdować się na badanej krawędzi, aby fragment obiektu zawierał się w analizowanym pudełku.



Rysunek 9.7: Kierunki promieni wysyłanych z poszczególnych wierzchołków pudełka

Jeśli oba warunki są spełnione, tzn. promień wysłany z danego wierzchołka pudełka przecina siatkę obiektu, oraz punkty przecięcia znajdują się pomiędzy wierzchołkami tworzącymi krawędź, wtedy pudełko to jest uznawane jako wypełnione.

Efektom przeprowadzenia testu zawierania w siatce oraz testu przecinania krawędzi jest znalezienie pudełek, które zawierają w sobie fragment siatki analizowanego obiektu. Ostatnim etapem algorytmu jest eliminacja duplikatów, czyli liczonych pudełek znajdujących się w tym samym miejscu, a pochodzących od różnych obiektów. Przebiega ona według procedury opisanej w podrozdziale 7.2.

Należy zaznaczyć, iż istnieje jeszcze jedna możliwość kolizji siatki obiektu i pudełka, która nie jest wykrywana przez przedstawiony algorytm. Kolizja ta polega na przecięciu ściany pudełka przez wierzchołek siatki bez przecinania jego krawędzi. Są to przypadki trudne do wykrycia w sensie obliczeniowym, jednak testy numeryczne wykazały, iż ich liczba w modelu jest marginalna i mogą one zostać pominięte bez szkody dla ostatecznego wyniku.

9.3. Eksperymenty numeryczne

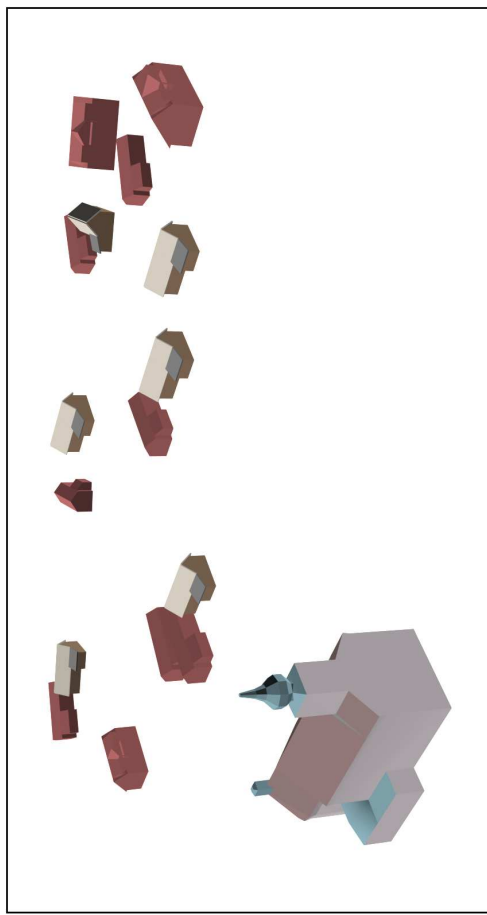
Obiekty, na których przedstawiony algorytm przeprowadza obliczenia, odbiegają w znacznym stopniu od obiektów reprezentowanych za pomocą prostopadłościanów. Z tego też względu zostały na nowo przeprowadzone testy, mające na celu ocenić użyteczność modelu w obecnym kształcie. Na ich potrzeby przygotowany został model, zawierający kilkanaście budynków, z których każdy jest siatką wielokątową. Budynki te zostały utworzone na podstawie oryginalnych planów dawnej zabudowy jednej z małopolskich wsi. Konstrukcja testowego modelu zakłada pewną losowość w obrocie danego budynku wokół osi Z, jak również nieregularność ustawienia, obrazującą zabudowę zwartą przechodzącą w rozproszoną. Tak skonstruowany model stanowił sytuację początkową (rys. 9.8a), dla której obliczona wartość wymiaru pudełkowego wynosi 2,275, natomiast czas wykonania pomiaru to około 200 sekund.

Bazując na przedstawionej sytuacji początkowej do modelu dobudowywane były kolejne elementy, stanowiące budowle różnego rodzaju. Pierwszą z nich, którą najczęściej można spotkać w każdej miejscowości jest kościół (rys. 9.8b). Bardzo często budynek świątyni góruje ponad niską zabudową wiejską, zatem wzrost wymiaru pudełkowego jest zjawiskiem naturalnym. Nowa zmierzona wartość równa jest 2,348, co stanowi wzrost o 7,3% prze-

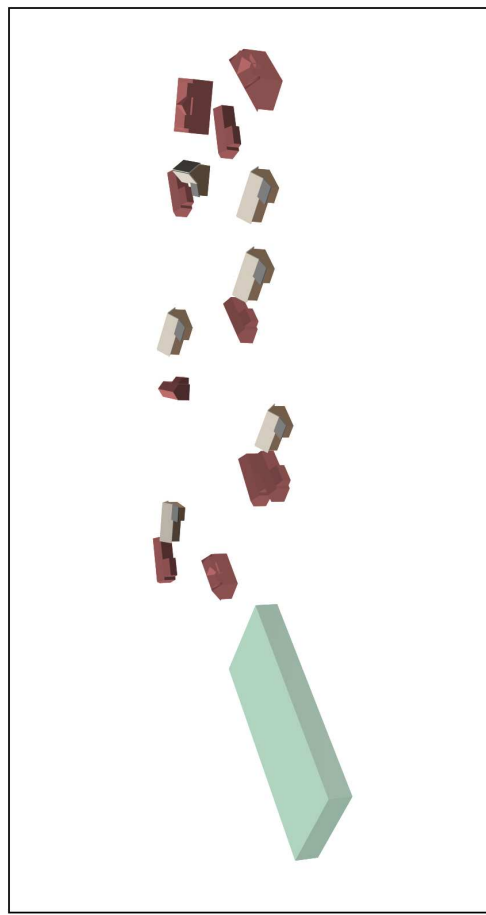
działu, w którym mogą być zawarte wartości tego wymiaru. Znacznie większy przyrost wartości można zaobserwować podczas uwzględnienia w modelu obiektu zupełnie odmiennego, dominującego nad okolicą, którym może być chociażby wysoki wieżowiec (rys. 9.8c) lub budynek o niewielkiej wysokości, za to posiadający rozległą powierzchnię. Takim budynkiem może być chociażby niewielka fabryka, magazyn czy też sortownia (rys. 9.8d). W obu przypadkach zmierzona wartość wymiaru pudełkowego jest znacznie większa niż dla scenariusza oryginalnego, przy czym wyższy wynik osiągany jest dla wieżowca (2,440 wzrost o 0,165), niż dla fabryki (2,408 wzrost o 0,133).

Interesująca sytuacja ma miejsce w momencie, kiedy do krajobrazu, który został już w jakiś sposób przekształcony poprzez umieszczenie w nim budynku odmiennego od otoczenia, zostanie dobudowany kolejny duży budynek. Przykładem może tu być wybudowanie fabryki i kościoła. Podczas, gdy w kontekście otoczenia istnieje kościół i zostanie w nim wybudowana fabryka (rys. 9.9a), wzrost wymiaru pudełkowego można uznać za znaczący (od wartości 2,348 do 2,433, różnica 0,085), natomiast w sytuacji odwrotnej - wybudowania kościoła w otoczeniu, które zostało już zmienione poprzez postawienie fabryki, przyrost ten nie jest już tak istotny (od wartości 2,408 do 2,433, różnica 0,025). Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku postawienia przy istniejącej fabryce kominów o znacznej wysokości (rys. 9.9b i c). Obserwowany wzrost wartości wynosi odpowiednio 0,020 dla jednego komina i 0,037 dla dwóch, przy czym jako wartość bazowa uznawana jest wartość dla scenariusza, przedstawionego na rys. 9.9a. Można zatem sformułować wniosek, iż w krajobrazie, który został już w sposób znaczący przekształcony, poprzez wybudowanie budynków o charakterze odmiennym od pierwotnego, dalsze zmiany nie są już tak mocno odczuwalne. Odzwierciedla to intuicyjne odczucia z życia codziennego. Przykładowo, jadąc autostradą i widząc na horyzoncie elektrociepłownię z dymiącymi kominami, dla większości obserwatorów nie będzie miało większego znaczenia, czy znajdują się tam trzy kominy, czy tylko dwa; najistotniejszym będzie fakt samego jej istnienia i dominacji w otaczającym krajobrazie.

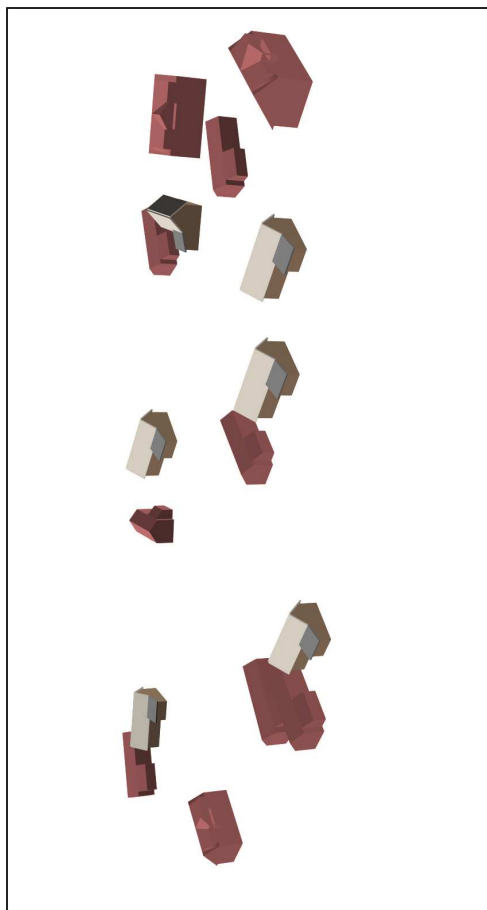
Można zatem również postawić pytanie, czy wybudowanie kilku nowych budynków mieszkalnych w danej miejscowości wpłynie znacząco na jej odbiór z zewnątrz. W odróżnieniu od testów prowadzonych dla obiektów typu AABB czy też OBB domy te nie będą wyglądały dokładnie tak samo jak każdy inny dom w otoczeniu, będą jedynie do nich w znaczącym stopniu podobne. Sytuacja taka została rozpatrzona poprzez zagęszczenie istniejącej zabudowy kilkoma budynkami o różnych, jakkolwiek bardzo zbliżonych do



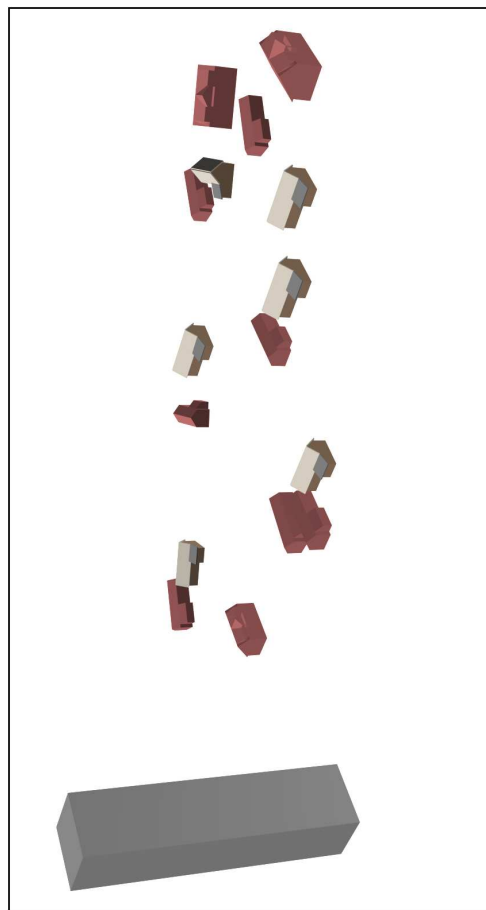
(b)



(d)

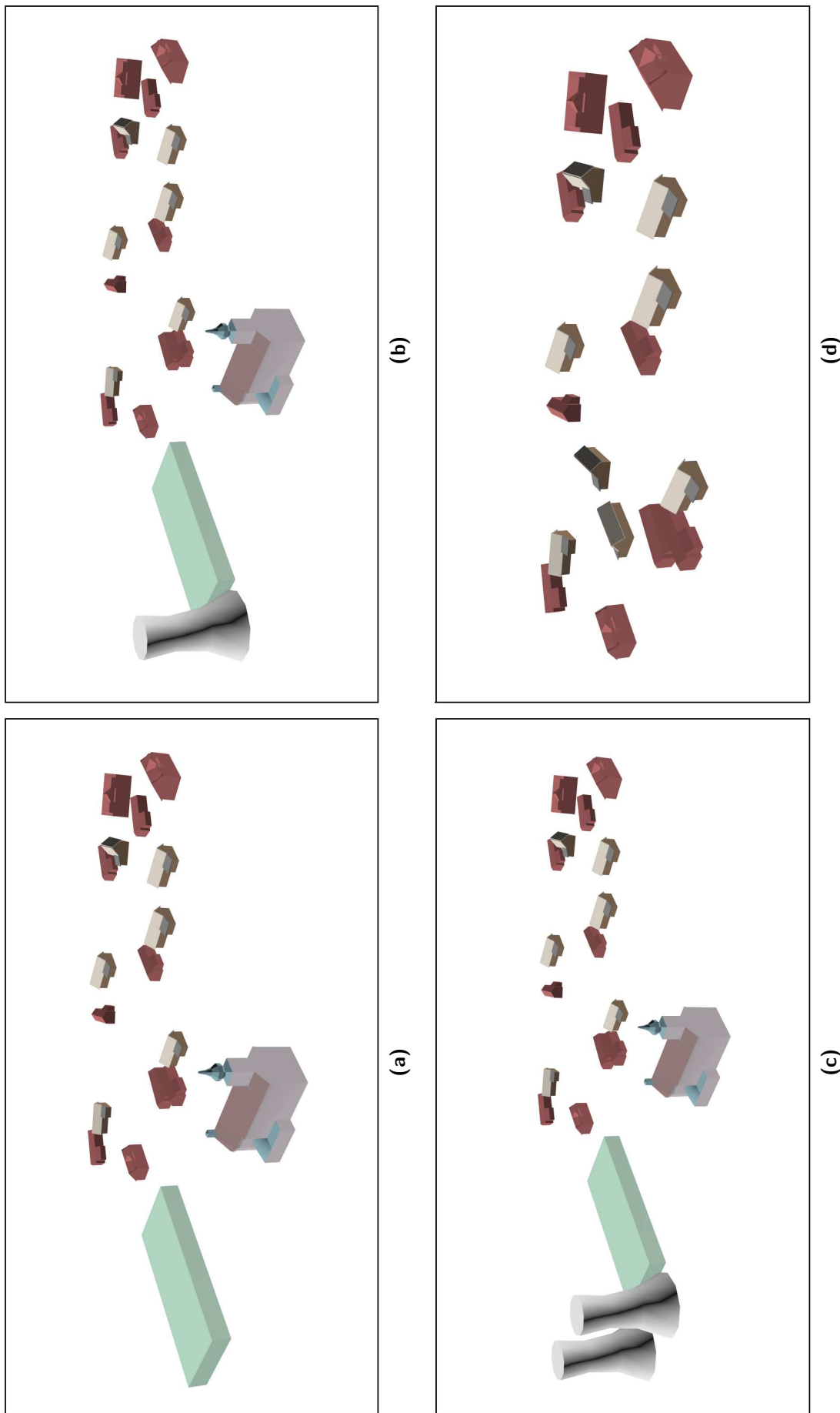


(a)



(c)

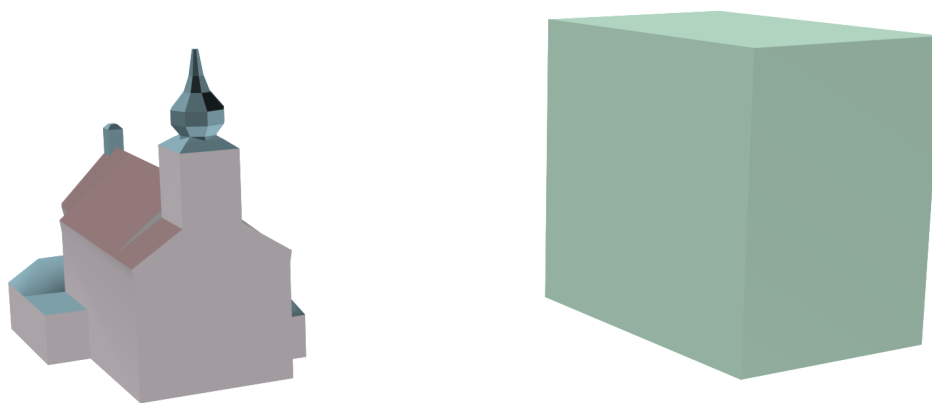
Rysunek 9.8: Testowe układy zabudowań dla modelu siatki wielokątowej



Rysunek 9.9: Testowe układy zabudowań dla modelu siatki wielokątowej

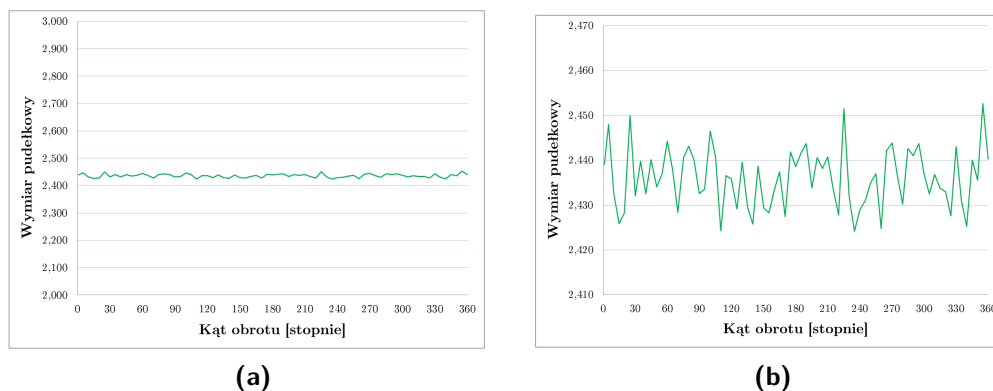
otoczenia, kształtach i gabarytach (rys. 9.9d). Zmiana wartości wymiaru pudełkowego dla tego scenariusza okazała się być marginalna i wyniosła 0,001. Fakt ten potwierdza tezę, postawioną w poprzednich rozdziałach, iż przekształcenia krajobrazu, które nie wywierają wpływu na zmianę jego charakteru nie pociągają również za sobą istotnych zmian w wartości wymiaru pudełkowego.

Charakterystyczną cechą obiektów, będących siatkami wielokątowymi jest mniejsze lub większe bogactwo ich szczegółów. Po raz kolejny warto tu odwołać się do przedstawionego już przykładu kościoła. Konstrukcja tej budowli nie jest bowiem całkowicie zwarta, lecz zawiera dodatkowe elementy „odstające” od głównej bryły. Są to chociażby przybudówki czy też dzwonnica. Wszystkie te elementy, łącznie z pochyłym dachem sprawiają, iż wielkość jego bryły w sposób znaczący różni się od wielkości, którą by posiadał, gdyby był reprezentowany jako bryła ograniczająca - *bounding box* (rys. 9.10). Znajduje to również odzwierciedlenie w obliczanych wartościach wymiaru pudełkowego. Dla scenariusza, przedstawionego na rys. 9.8b wynosi ona 2,348, jednak jeśli zastąpimy bryłę kościoła odpowiadającym jej *bounding box-em* wartość ta wzrośnie do 2,491. W przypadku wieżowców, czy fabryk efekt ten nie jest widoczny, z uwagi na ich prostą, jednorodną konstrukcję.



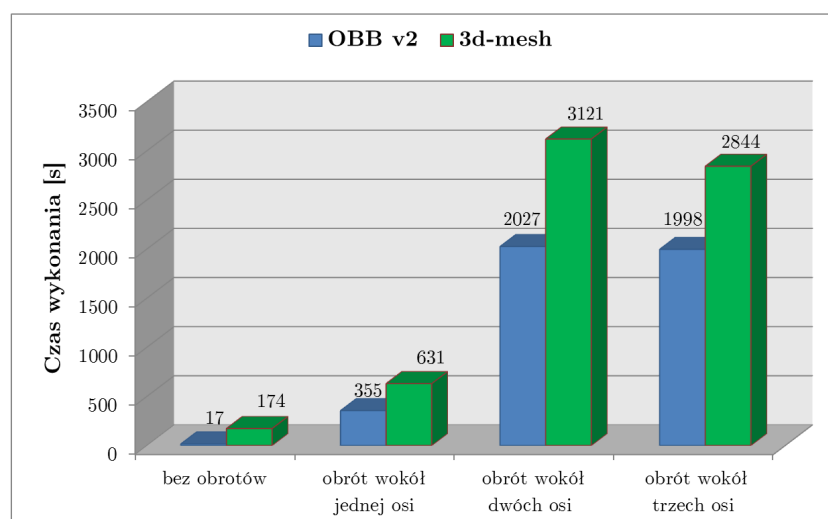
Rysunek 9.10: Bryła kościoła i odpowiadająca jej bryła ograniczająca - *bounding box*

Wpływ rodzaju analizowanego modelu ujawnia się również podczas analizy zależności wymiaru pudełkowego od obrotu danego obiektu. Zależność taka została wykazana i zbadana dla obiektów typu OBB, co opisano w p. 8.3.1. W przypadku obiektów typu *3D-mesh* nie jest ona jednak obserwowana (rys. 9.11).



Rysunek 9.11: Zależność wartości wymiaru pudełkowego od obrotu, dla przykładowego obiektu typu 3D-mesh

Zwraca również uwagę znacznie dłuższy czas wykonania zadań obliczeniowych, nawet dla obiektów o prostej konstrukcji, jakimi są prostopadłościany. Testy czasu wykonania prowadzone były przy uwzględnieniu tych samych warunków, dla których wykonane zostały testy modelu OBB (rys. 8.12). Zależność pomiędzy liczbą osi biorących udział w danym obrocie a czasem wykonania pozostała niezmienną, jednak całkowity czas uległ znacznemu wydłużeniu (rys. 9.12). Jest to spowodowane koniecznością przeprowadzenia większej liczby obliczeń dla każdego z pudełek, oraz faktem, iż na żadnym etapie nie mogą one zostać skrócone, jak to ma miejsce w przypadku algorytmu działającego na obiektach typu OBB, gdzie po znalezieniu osi rozdzielającej nie ma potrzeby kontynuowania obliczeń.



Rysunek 9.12: Porównanie średnich czasu wykonania obrotów dla algorytmów bazujących na różnych typach obiektów

9.4. Podsumowanie

Model oparty na obiektach reprezentowanych za pomocą siatek wielokątowych znacznie lepiej oddaje rzeczywistą charakterystykę zabudowań niż modele oparte na obiektach typu *bounding box*. Pociąga to za sobą również konsekwencje w postaci różnic, jakie zachodzą w zmianach wymiaru pudełkowego podczas analiz prowadzonych przy użyciu różnych typów modeli. Bardzo dobrze uwidocznilo ten fakt porównanie wartości osiąganych przez ten wymiar w przypadku analizy otoczenia z wybudowanym kościołem, oraz reprezentacją tegoż kościoła w postaci bryły ograniczającej. Nie zmienia to jednak faktu, iż analizy zmian charakteru krajobrazu prowadzone przy użyciu zaawansowanego modelu opartego na siatce wielokątowej dają rezultaty zgodne z intuicją, co wykazały testy. Co więcej, model ten w dokładniejszy sposób jest w stanie oddać charakter danego otoczenia, a co za tym idzie również i zmian, które nie są z tym charakterem zgodne. Należy jednak mieć na uwadze fakt znacznie większego skomplikowania algorytmu obliczeniowego, a co za tym idzie również i znacznego wydłużenia czasu, koniecznego do przeprowadzenia odpowiednich obliczeń.

Rozdział 10

Zakończenie rozprawy

Główny cel pracy stanowiło opracowanie metody i algorytmów umożliwiających ocenę zmian zachodzących w krajobrazie, bazujących na pomiarze wymiaru fraktalnego. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie obiektywnej oceny charakteru zmian wprowadzanych do krajobrazu, przykładowo podczas realizacji nowych inwestycji. Opracowana i opisana metoda bazuje na aparacie matematyczno-informatycznym, jakim jest pomiar wartości wymiaru fraktalnego. Wymiar ten obliczany jest z definicji wymiaru pudełkowego z uwagi na łatwość jego adaptacji dla konkretnych przypadków dwu- oraz trójwymiarowych.

Wspomniana metoda może zostać podzielona na dwie części. Pierwszą z nich stanowi analiza fotografii krajobrazowych, reprezentowanych przez dwuwymiarowe obrazy cyfrowe. Analizy prowadzone na obrazach sztucznych wykazały istnienie zależności pomiędzy charakterem zmiany wprowadzanej do obrazu, a obliczoną dla tego obrazu różnicą w wartości wymiaru pudełkowego pomiędzy stanem przed i po wprowadzeniu danej zmiany. Wyniki te zostały potwierdzone przez szereg badań empirycznych, przeprowadzonych głównie podczas prac nad ekspertyzami tworzonymi na potrzeby przemysłu. Poddane zostały one również ocenie eksperckiej, która potwierdziła ich użyteczność. Obliczenia wymiaru pudełkowego prowadzone były zarówno przy użyciu autorskiej aplikacji, opracowanej jako wtyczka do programu GIMP, jak i funkcji matematycznych zawartych w pakiecie Image Processing Toolbox programu Matlab. Podczas prowadzenia badań opracowane zostały wytyczne, jakie powinna spełniać fotografia wykonana z perspektywy człowieka, aby możliwe było przeprowadzenie na niej odpowiednich obliczeń. Wymagania te dotyczą zarówno poprawnej rejestracji, począwszy od uwzględnienia takich czynników jak odpowiedni dobór miejsca wykonania fotografii, a kończąc na doborze parametrów zdjęcia, takich jak rozdzielczość przestrzenna czy długość ogniskowej, jak również właściwej segmentacji obrazu. Wyka-

zane zostały również wady automatycznej segmentacji fotografii krajobrazowej wraz z prowadzonymi w tym kierunku badaniami.

Zastosowanie metody pomiaru wymiaru pudełkowego dwuwymiarowych fotografii w analizach krajobrazowych nie jest pozbawione pewnych niedogodności. Poddawany badaniom wpływ realizacji konkretnej inwestycji na zmianę krajobrazu może być widoczny w różnym stopniu w zależności od wyboru punktu obserwacji. Dodatkowy czynnik modyfikujący ów wpływ mogą stanowić naturalne bariery przesłaniające w postaci lasów czy niewielkich zagajników, widocznych tylko z określonych miejsc. Dlatego też w celu uzyskania możliwie najdokładniejszej oceny wpływu badanej zmiany na krajobraz, konieczne byłoby wykonanie fotografii z jak największej liczby miejsc. Nie zawsze jest to jednak możliwe.

Druga część opracowanej metody bazuje zatem na analizie obiektów znajdujących się w przestrzeni trójwymiarowej. Istniejące w literaturze prace skupiają się głównie na doskonaleniu algorytmów, pracujących na modelach reprezentowanych za pomocą wokseli. Tego typu modele pozwalają na dość dokładny pomiar wartości wymiaru pudełkowego dla pojedynczego obiektu. W przypadku analiz prowadzonych na modelach przedstawiających rozległy zakres terenu znacznie lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie reprezentacji brzegowej oraz ograniczenie zakresu działania algorytmu nie do pojedynczych obiektów, a do określonej przestrzeni, w której te obiekty się znajdują.

W celu właściwego zbadania całości zagadnienia, opis metody działającej w przestrzeni trójwymiarowej podzielony został na trzy etapy. Pierwszy z nich dotyczył najprostszego z możliwych przypadków, w którym obiekty w modelu reprezentowane są za pomocą AABB (*Axis Aligned Bounding Boxes*), czyli są prostopadłościanami ułożonymi w kierunku zgodnym z osiami globalnego układu współrzędnych. Na bazie tego modelu sformułowane zostały cztery podstawowe etapy algorytmu, służącego do wyznaczenia ilości pudełek zajętych w danym kroku procedury, zgodnie z teorią wyznaczania wartości wymiaru pudełkowego: lokalizacja obiektu w przestrzeni ograniczającej, utworzenie podprzestrzeni obiektu, w której wykonywane będą dalsze obliczenia, test kolizji oraz eliminacja duplikatów. Algorytm ten został następnie zaimplementowany przy zachowaniu podziału na dwie zasadnicze części. Pierwszą z nich stanowi eksport danych ze środowiska graficznego, zawierającego trójwymiarowy model (w pracy do tego celu użyty został program Autodesk 3ds Max), drugą - właściwe kalkulacje przy użyciu środowiska obliczeniowego Matlab. Stworzona do tego celu autorska aplikacja została opracowana w taki sposób, aby import danych możliwy był z dowolnego śro-

dowiska do modelowania 3D, gdyż na wejściu wymaga jedynie odpowiednio skonstruowanego pliku tekstowego. Algorytm został gruntownie przetestowany pod względem stabilności wyników. Testy te wykazały zarówno zgodność otrzymanywanych wyników z rezultatami wygenerowanymi przez algorytm brutalny, jak również ich niezależność od rozmiaru przestrzeni ograniczającej i położenia badanych obiektów w tejże przestrzeni. Przeprowadzone zostały również testy użyteczności, które potwierdziły możliwość jego zastosowania w zadaniach, w których istotne jest znalezienie obiektywnej wartości liczbowej umożliwiającej oszacowanie różnicy pomiędzy określonymi stanami zaprezentowanymi w różnych modelach. Kolejną zaletą algorytmu jest jego krótki czas działania, zwłaszcza w porównaniu z algorytmem brutalnym. Nawet dla liczby obiektów w modelu sięgającej 10000 czas ten zamykał się w obrębie kilkunastu minut. Pewien problem może natomiast stanowić fakt szybkiego przyrostu tego czasu w zależności od wielkości obiektów, jednak przy zachowaniu skali urbanistycznej nie powinien on być uciążliwy.

Drugi etap bazował na obiektach, dla których uwzględniona została również macierz obrotu - *Oriented Bounding Boxes* (OBB). Model taki w dalszym ciągu stanowi uproszczenie rzeczywistości, jednak jest naturalnym rozszerzeniem modelu opartego na AABB. Uwzględnienie wspomnianej macierzy wymagało przebudowania dwóch zasadniczych faz algorytmu - tworzenia podprzestrzeni oraz testu kolizji. Konieczna była również modyfikacja modułu odpowiedzialnego za eksport/import danych. Podczas testów algorytmu okazało się, iż w znacznej większości przypadków uwzględnienie obrotu powodowało zmniejszenie wyliczanej wartości wymiaru pudełkowego w stosunku do tej, obliczonej przy ułożeniu obiektu zgodnie z osiami układu współrzędnych. Różnica ta była tym większa im większy był rozmiar danego obiektu oraz im więcej osi brało udział w transformacji. Z uwagi na powiązanie prowadzonych badań z zagadnieniami z zakresu architektury krajobrazu, dokładnie przebadane zostały obroty obiektów wokół osi Z. Istotnym wnioskiem z wykonanych testów jest fakt, iż wielkością, która wpływa na zmianę wartości wymiaru pudełkowego w większej mierze niż rotacja wokół osi pionowej jest rozmiar danego obiektu. Rozpatrzone tu zostały zarówno transformacje obiektu, który powodował wystąpienie zmiany w modelu, jak i losowe obroty wszystkich obiektów znajdujących się w modelu. Dodatkowo należy również zaznaczyć wniosek o kumulowaniu się wpływu przekształceń pochodzących od różnych elementów modelu na końcową wartość wymiaru pudełkowego, co może mieć niebagatelne znaczenie podczas badań nad zachowaniem uporządkowania w danym modelu, niekoniecznie powiązanym z architekturą kra-

jobrazu. Pewną niedogodnością jest tu jednak czas obliczeń, który wzrasta wielokrotnie w porównaniu do modelu opartego na AABB.

Trzeci etap oparty został na najbardziej skomplikowanych obiektach, reprezentowanych przez siatkę wielokątową. Takie podejście umożliwiło znacznie dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistej zabudowy, co pociągnęło za sobą konieczność gruntownych zmian w algorytmie liczącym wymiar pudełkowy. Przebudowane zostały całkowicie moduły odpowiedzialne za tworzenie podprzestrzeni obiektu oraz za test kolizji, który w tym przypadku był kwestią wymagającą największej uwagi. Nowe moduły zostały opracowane na bazie istniejącej wiedzy z dziedziny grafiki komputerowej. Przeprowadzone testy po raz kolejny potwierdziły postawioną tezę, iż przekształcenia krajobrazu, które wpływają w sposób istotny na jego charakter, pociągają również za sobą adekwatną zmianę w wartości wymiaru pudełkowego, natomiast przekształcenia, które tego wpływu nie wywierają, powodują zmianę tej wartości na poziomie marginalnym. Dobrze ten fakt oddawał test ukazujący rozszerzenie określonego fragmentu zabudowy o kolejne domy, które nie były identyczne z już istniejącymi, a jedynie zbliżone wyglądem i rozmiarami. Zmiana wartości wymiaru pudełkowego osiągnęła wtedy wartość 0,001, podczas gdy wstawienie w tym miejscu wysokościowca powodowało wystąpienie różnicy na poziomie 0,165. Dodatkowo interesującym może być fakt, iż w krajobrazie, który został już w pewien sposób przekształcony, dalsze modyfikacje nie pociągają już za sobą tak znaczących zmian w wartości wymiaru pudełkowego, jak w momencie pierwotnego przekształcenia. Oczywiście należy mieć na uwadze, iż wyższa szczegółowość modelu pociąga również za sobą koszty w postaci znacznego wydłużenia czasu koniecznego na wykonanie odpowiednich obliczeń.

Z punktu widzenia architektury krajobrazu należy również wspomnieć o kilku spostrzeżeniach, które ukształtowały się w czasie prowadzenia badań oraz testów. Pierwszym z nich jest obserwowane wysycanie się wartości wymiaru pudełkowego na pewnym poziomie podczas zmiany rozmiaru określonego obiektu. Wysycenie to następuje zasadniczo szybciej, im mniejszy rozmiar początkowy ma dany obiekt, jednak punkt stabilizacji ma większą wartość, im dany obiekt jest większy. Dodatkowo wraz ze wzrostem rozmiaru obiektu, krzywa reprezentująca na wykresie zależność wymiaru pudełkowego od wielkości przybiera kształt coraz bardziej zbliżony do logarytmicznego. Fakt ten wydaje się spełniać prawo Webera-Fechnera, mówiące, iż wartość reakcji układu biologicznego jest proporcjonalna do logarytmu bodźca. Prawo to najczęściej odnosi się do naturalnych reakcji organizmu, przykła-

dowo ocena głośności dźwięku jest proporcjonalna do logarytmu ciśnienia akustycznego na membranie bębna, natomiast ocena jasności światła do logarytmu strumienia światła mierzonego na powierzchni oka.

Testy wykazały również, iż obiekty izolowane podczas zmiany rozmiaru mają większy wpływ na ostateczną wartość wymiaru pudełkowego niż obiekty znajdujące się w grupie, a co za tym idzie w sposób bardziej istotny wpływają również na zmianę charakteru krajobrazu. Pozostaje to w zgodzie z ludzką percepcją, która każdą formę postrzega w kontekście tła, na jakim się znajduje. Obiekt izolowany od otoczenia będzie zatem mocniej oddziaływał na wrażenia zmysłowe niż bryła znajdująca się w grupie. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż różnice wynikające ze zmiany wielkości danego obiektu posiadają bardzo zbliżone wartości w przypadku pomiarów algorytmem opartym na AABB oraz opartym na OBB po uśrednieniu wartości z cyklu obrotów lub obrotów losowych. Można postulować wprowadzenie swoistego rodzaju poziomu szczegółowości (LOD - *level of detail*) prowadzonych analiz krajobrazowych, uzależnionego od rozmiaru badanego obszaru. Jest bowiem prawdopodobne, iż szczegóły, wynikające z zastosowania dokładniejszego modelu nie będą miały wpływu na ostateczny wynik podczas rozważania obszarów obejmujących kilka czy kilkanaście miejscowości. Zysk czasowy wynikający z zastosowania modelu uproszczonego może być jednak w tym przypadku znaczący. Konieczne są dalsze badania w tym kierunku, pozwalające na określenie granicznej wielkości obszaru, dla którego opłacalnym będzie korzystanie z modelu o najwyższym stopniu szczegółowości.

Zaprezentowana metoda oraz zestaw algorytmów, służących do jej stosowania miały na celu stworzenie obiektywnego narzędzia wspomagającego podejmowanie decyzji dotyczących ingerencji w krajobraz, który to cel należy uznać za osiągnięty. Wymiar pudełkowy, będący wskaźnikiem numerycznym, dotyczy jednak jedynie formy oraz skali obiektów. Nie może być zatem traktowany jako jedyna wartość, będąca podstawą wydawania decyzji, gdyż w konkretnych przypadkach należy brać również pod uwagę szereg czynników ekonomicznych, społecznych i innych. Po raz kolejny należy także podkreślić, iż intencją prowadzonych badań nie jest opracowanie narzędzia pozwalającego określić wymiar fraktalny danego obiektu w sposób precyzyjny, jak również klasyfikowanie przedstawionych przykładów jako fraktali. Autor wyraża nadzieję, iż przedstawiona metoda będzie z powodzeniem stosowana w analizach krajobrazowych prowadzonych zarówno na potrzeby przemysłu jak i w celach naukowych, a także w innych zagadnieniach, w których nie-

zbędne jest porównanie ze sobą kilku różnych stanów i oszacowanie różnic pomiędzy nimi.

Bibliografia

- [1] BARNSLEY, M., *Fractals Everywhere*, Academic Press Inc., 1988
- [2] BISHOP, I., *Assesment of visual qualities, impacts and behaviours, in the landscape, by using measures of visibility*. Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 30, s. 677-688, 2003
- [3] BOVILL C., *Fractal Geometry in Architecture and Design*. Birkhauser 1995
- [4] BRONSZTEJN I. N., SIEMIENDAJEW K. A., *Matematyka. Poradnik Encyklopedyczny*, PWN, 1968
- [5] BUCZKOWSKI S. ET AL., *The modified box-counting method: analysis of some characteristic parameters*. Pattern Recognition, Vol. 31, No. 4, s. 411-418, Elsevier, 1998
- [6] BURDZIEJ J., KUNZ M., *Ocena wpływu rozdzielczości i metody pozyskiwania danych wysokościowych na dokładność numerycznych modeli spadków i ekspozycji*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 16, 2006
- [7] CARMONA M., HEATH T., TIESDELL S., *Public Places - Urban Spaces. The Dimensions of Urban Design*. Architectural Press, 2003
- [8] CHEN D-R. ET AL., *Classification of breast ultrasound images using fractal features*. Journal of Clinical Imaging 29 s. 235-245, Elsevier, 2005
- [9] DĄBROWSKA-BUDZIŁO K., *Forma i treść krajobrazowej kompozycji*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2012
- [10] EBERLY D., *Dynamic Collision Detection using Oriented Bounding Boxes*, Geometric Tools Inc., 2002
- [11] FALCONER K., *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Application*, John Wiley & Sons, 2003.
- [12] FALCONER K., *Techniques in Fractal Geometry*, John Wiley & Sons, 1997
- [13] FISHER Y., (ED.) *Fractal Image Compression: Theory and Application to Digital Images*, Springer Verlag, 1995
- [14] FLORIANI L. DE, MAGILLO P., *Visibility algorithms on triangulated digital terrain models*, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 8, Issue 1, s.13-41, 1994
- [15] FOLEY J. D. ET AL., *Wprowadzenie do grafiki komputerowej*, WNT, 1995

- [16] FOROUTAN-POUR K., DUTILLEUL P., SMITH D.L., *Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation*. Applied Mathematics and Computation 105, s. 195-210, Elsevier, 1999
- [17] GOMEZ M., *Simple Intersection Test For Games*, www.gamasutra.com (dostęp: styczeń 2015)
- [18] GOTTSCHALK S., *Collision Queries using Oriented Bounding Boxes*, PhD Dissertation, Department of Computer Science, University of North Carolina, 2000
- [19] GOTTSCHALK S., LIN M. C., MANOCHA D., *OBB-Tree: A hierarchical structure for rapid interference detection*, SIGGRAPH '96 Proceedings, 1996
- [20] HAGERHALL C. M. ET AL., *Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference*. Journal of Environmental Psychology 24, s. 247-255, Elsevier, 2004
- [21] HEYMANS O. ET AL., *Is fractal geometry useful in medicine and biomedical sciences?* Medical Hypotheses, Harcourt Publishers Ltd, 2000
- [22] IFTEKHARUDDIN K. M., JIA W., MARSH R., *Fractal analysis of tumor in brain MR images*. Machine Vision and Applications 13, s. 352-362, Springer-Verlag, 2003
- [23] ISLAM Z., METTERNICHT G., *Fractal Dimension of Multiscale and Multi-source Remote Sensing Data for Characterising Spatial Complexity of Urban Landscapes*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003
- [24] JAHN R., TRUCKENBRODT H., *A simple fractal analysis method of the surface roughness*. Journal of Materials Processing Technology 145, s. 40-45, Elsevier, 2004
- [25] KLIMCZAK H., GALANT K., *Zastosowanie geometrii fraktalnej do modelowania kartograficznego struktury przestrzennej wybranych cech środowiska przyrodniczego*. Analizy przestrzenne w badaniach warunków gospodarowania na obszarach wiejskich województwa dolnośląskiego., Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, 2008
- [26] KRUGER A., *Implementation of a fast box-counting algorithm*. Computer Physics Communications 98, s. 224-234, Elsevier, 1996
- [27] KUCZYŃSKI K., *Klasyfikacja obrazów radiologicznych na podstawie wymiaru fraktalnego*, Scientific Bulletin of Chełm, Section of Mathematics and Computer Science, 2008
- [28] KUDREWICZ, J., *Fraktale i chaos*, WNT, 1993
- [29] KURATOWSKI K., MOSTOWSKI A., *Teoria mnogości*, PWN, 1952
- [30] ŁABĘDŹ P., *Wymiar fraktalny w cyfrowej analizie obrazów*, Wybrane zagadnienia przetwarzania obrazu. Pod red. J. Chwastowski, K. Korcyl, s. 35-50, Wydawnictwo PK, seria Monografie nr 472, 2014

- [31] ŁABĘDŹ P., OZIMEK A., *Fractal Dimension in the Landscape Change Estimation*. Computer Recognition Systems 4, Advances in Intelligent and Soft Computing, s. 507-515. Springer-Verlag, 2011
- [32] ŁABĘDŹ P., OZIMEK A., *Rejestracja panoram widokowych w zakresach pozaspektralnych jako narzędzie oceny atrakcyjności krajobrazu*. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG nr 14/2010 Krajobraz a turystyka, s. 331-341, 2010
- [33] MAHOVSKY J., WYVILL B., *Fast Ray-Axis Aligned Bounding Box Overlap Tests with Plücker Coordinates*. Journal of graphics tools, Vol. 9, Nr. 1, s. 35-46, A K Peters Ltd., 2004
- [34] MANDELBROT B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., 1982
- [35] MALLOY M. A., DEAN D. J., *An Accuracy Assessment of Various GIS-Based Viewshed Delineation Techniques*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67, s. 1293-1298, 2001
- [36] MCCOLLOUGH E., *Photographic Topography*. Industry: A Monthly Magazine Devoted to Science, Engineering and Mechanic Arts, s. 399 - 406, Industrial Publishing Company, 1893
- [37] MIAŁDUN J., OSTROWSKI M., *Wymiar fraktalny fragmentów zdjęć lotniczych strefy przybrzeżnej Jeziora Mikołajskiego, Śniardw i Łuknajno*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 21, s. 267-279, 2010
- [38] MÖLLER T., TRUMBORE B., *Fast, Minimum Storage Ray/Triangle Intersection*, Journal of Graphics Tools, s. 21-28, 1997
- [39] AKENINE-MÖLLER T., HAINES E., HOFFMAN N., *Real-Time Rendering*, A K Peters, 2008
- [40] MURDOCK K. L., *3ds Max 2012 Bible*, John Wiley & Sons, 2011
- [41] OCZERETKO E., *Wymiar fraktalny w analizie sygnałów i obrazów biomedycznych*, Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, 2006
- [42] OZIMEK P., BÖHM A., OZIMEK A., WAŃKOWICZ W., *Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych, przy użyciu cyfrowych analiz terenu wraz z oceną ekonomiczną*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2014
- [43] OZIMEK P., *Zastosowanie algorytmów światła lokalnego w wyznaczaniu wykresów widoczności*. Praca doktorska wykonana w WAPK pod kier. Aleksandra Böhma, Kraków 2002
- [44] OZIMEK P., TARKO J., ŁABĘDŹ P., *Cyfrowe modele analizy krajobrazu bazujące na cyfrowych modelach terenu systemów informacji przestrzennej*. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG nr 14/2010 Krajobraz a turystyka, s. 342-352, 2010
- [45] PEITGEN H.O., JÜRGENS H., SAUPE D., *Granice chaosu: fraktale (t. 1 - 2)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002

- [46] PINKER S., *The Better Angels of Our Nature*, Penguin Books, 2012
- [47] ROBINSON D. G. ET AL. (EDS.), *Landscape evaluation - the landscape evaluation research project 1970-1975*, University of Manchester, 1976
- [48] RUAN R., ZHANG L., *Analysis of Landscape Change Based on Fractal Dimension*, Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010
- [49] RUIZ DE MIRAS J. ET AL., *UJA-3DFD: A program to compute the 3D fractal dimension from MRI data*, Comput. Methods Programs Biomed., Elsevier, 2010
- [50] RYGIEL P., *Współczynnik wrażliwości wizualnej krajobrazu (visual sensitivity) i możliwości jego zastosowania w pracach planistycznych w mieście*, Praca doktorska wykonana w WAPK pod kier. Aleksandra Böhma, Kraków 2005
- [51] SANECKI J. (PR. ZB.), *Teledetekcja. Pozyskiwanie danych*. WNT, s. 27-31, 2006
- [52] SARKAR N., CHAUDHURI B. B., *An Efficient Differential Box-Counting Approach to Compute Fractal Dimension of Image*, Systems, Man and Cybernetics, 2004
- [53] SCHNEIDER P., EBERLY D., *Geometric Tools for Computer Graphics*. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, Elsevier, 2003
- [54] SIK KIM K., BENGUIGI L., MARINOV M., *The fractal structure of Seoul's public transportation system*. Cities, Vol. 20, No. 1, s.31-39, Elsevier, 2003
- [55] SMARDON R.C., PALMER J.F., FELLEMAN J.P., *Foundations for Visual Project Analysis*, s. 214, John Wiley & Sons, 1986
- [56] STACHERA J., ROKITA P., *Fractal-based hierarchical mip-pyramid texture compression*, Machine Graphics & Vision, Vol. 15, I. 3, s. 607-619, 2006
- [57] STEINITZ C., *Toward a Sustainable Landscape with High Visual Preference and High Ecological Integrity: the Loop Road in Acadia National Park, USA*. Landscape and Urban Planning 54, Elsevier, 2001
- [58] STRUZIŁ P., *Zastosowanie informacji satelitarnej AVHRR/NOAA do klasyfikacji rodzaju pokrycia terenu*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1999
- [59] SZTEJN J., ŁABĘDŹ P., OZIMEK P., *Visual Landscape Character in the Approach of GeoDesign*. Buhmann/Ervin//Pietsch (Eds.): Peer Reviewed Proceedings Digital Landscape Architecture 2012, Anhalt University of Applied Sciences, s. 227-234, Wichmann Verlag, 2012
- [60] THOMPSON J. A., BELL J. C., BUTLER CH. A., *Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling*. Geoderma 100, s. 67-89, 2001
- [61] UNWIN K. I., *The relationship of observer and landscape in landscape evaluation*. Transactions of the Institute of British Geographers 66, s. 130-133, 1975

- [62] WIĄCEK M., MIERNIK M.: *Wyznaczenie wymiaru fraktalnego do opisu chropowatości powierzchni po toczeniu żeliwa szarego*. Nowoczesne techniki i technologie. Pod red. Leona Kukielki. Koszalin: Wydaw. Uczel. PKoszal. 2004 s. 337-344, (Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego - Politechnika Koszalińska, ISSN 1640-4572; nr 33)
- [63] WRÓBLEWSKI P., *Algorytmy. Struktury danych i techniki programowania*, Helion, 2009
- [64] ZACHMANN G., *Geometric Data Structures for Computer Graphics*. University of Bonn, 2003
- [65] ZHANG H., *Fast Incremental Transformation of Bounding Boxes, with Generalizations to regular grids like terrain and volume data*. University of North Carolina, 1997
- [66] ŻARNOWIECKA J., *Przestrzeń informatyczna i architektura regionalna: rozpoznanie komputerowych metod analizy, oceny i wspomaganie projektowania architektury regionalnej*, Rozprawy Naukowe - Politechnika Białostocka, 2004

Spis rysunków

2.1	Zbiór M i trzy możliwe jego pokrycia (na podstawie [11])	11
2.2	Przykładowe obiekty, dla których obliczany będzie wymiar pudełkowy	12
2.3	Pokrycie struktury siatką o wielkości oczek (a) $s = \frac{1}{5}$ całości, oraz (b) $s = \frac{1}{16}$ wraz z zaznaczonymi zliczanymi oczkami [30]	13
2.4	Zależność logarytmiczna dla struktury pokazanej na rysunku 2.3 [30]	14
2.5	Trójwymiarowy obiekt, wraz z fragmentem pokrycia jednorodną siatką pudełek	14
3.1	Zmierzony wymiar fraktalny obu obiektów wynosi 1,622 [31]	16
3.2	Obiekty i ich zmierzone wymiary pudełkowe [31]	19
4.1	Przykładowy wykres widoczności dla pojedynczego punktu terenu . .	22
4.2	Zbinaryzowany wykres widoczności	23
4.3	Przykładowa mapa widoczności	23
4.4	Fotografia krajobrazowa i próby automatycznej segmentacji opartej na barwie rejestrowanej w świetle widzialnym	25
4.5	Segmentacja automatyczna bazująca na fotografiach wykonanych w zakresie poza spektrum światła widzialnego [32]	26
4.6	Widmowy współczynnik odbicia dla liścia zielonego i farby ciemnozielonej [51]	26
4.7	Jakość reprezentacji obrazu w zależności od zagęszczenia pikseli, przy tym samym rozmiarze obrazu	27
4.8	Etapy przygotowania fotografii do analizy [30]	28
4.9	Utrudniona analiza krajobrazowa w sezonie zimowym	29
5.1	Widok na hotel - stan obecny	30
5.2	Różne propozycje zagospodarowania terenu w miejscu obecnego hotelu [31]	32
5.3	Widok ze szlaku na Śnieżkę w stronę Karpacza	33
5.4	Scenariusze zagospodarowania terenu [30]	34
5.5	Scenariusze przy innych warunkach początkowych	36
5.6	Panorama doliny rzeki Jasionka ze stoku Małej Góry	38
5.7	Panorama z Przymiarek	39

6.1	Fragment pokrycia przestrzeni jednakowej wielkości pudełkami. Elementy zawierające obiekt zaznaczone są na czerwono	42
6.2	Przykładowa scena z kilkoma obiektami i przestrzenią ograniczającą	43
6.3	Przykładowe wypełnienie przestrzeni jednorodnymi pudełkami	44
6.4	Sceny testowe wraz z wymiarami pudełkowymi	46
6.5	Sceny testowe wraz z wymiarami pudełkowymi	48
6.6	Model zabudowań w dolinie, przykład dużego zadania obliczeniowego	48
7.1	Przykładowa scena składająca się z obiektów typu AABB	50
7.2	Fragment modelu z obiektami AABB (kolor niebieski) oraz bryłą stanowiącą przestrzeń ograniczającą (kolor magenta)	51
7.3	Lokalizacja obiektu w przestrzeni ograniczającej	52
7.4	Pokrycie podprzestrzeni obiektu regularną siatką pudełek	53
7.5	Test kolizji AABB w przestrzeni dwuwymiarowej [17]	53
7.6	Przykładowy test modyfikacji przestrzeni	55
7.7	Modele testowe wraz z wymiarami pudełkowymi	57
7.8	Modele testowe wraz z wymiarami pudełkowymi	58
7.9	Histogramy dla poszczególnych scenariuszy testowych	60
7.10	Czas działania algorytmu dla różnych typów i liczby obiektów	62
7.11	Zależność czasu działania algorytmu od rozmiaru obiektów istniejących w modelu	63
7.12	Przykładowe modele, użyte w testach porównawczych czasu działania algorytmów	64
8.1	Przykładowa scena, zawierająca obiekty typu OBB	67
8.2	Przykładowe obiekty typu OBB (kolor zielony), wraz z odpowiadają- cymi im obiektami AABB (kolor czarny)	69
8.3	Ilustracja twierdzenia o osiach rozdzielających w przestrzeni dzwuwymiarowej	70
8.4	Prostokąty i ich lokalne osie	71
8.5	Rzutowanie wektora T oraz połówek prostokątów na oś $L = A_x$	72
8.6	Dwa prostopadłościany w przestrzeni trójwymiarowej wraz z płaszczyzną rozdzielającą (kolor zielony) i prostopadłą do niej osią rozdzielającą (kolor czerwony)	73
8.7	Możliwe płaszczyzny rozdzielające, równoległe do poszczególnych ścian prostopadłościanu	73
8.8	Możliwa kolizja pomiędzy krawędziami obiektów przestrzennych	74
8.9	Krawędzie prostopadłościanu, równoległe do osi lokalnego układu współrzędnych	74
8.10	Sytuacja wyjściowa do testów obrotów obiektów typu OBB	77

8.11 Średnia zmiana wymiaru pudełkowego w zależności od wielkości obiektu i liczby osi biorących udział w obrocie, wyrażona w liczbach bezwzględnych	80
8.12 Zależność czasu wykonania poszczególnych algorytmów od ilości osi biorących udział w obrocie obiektu typu OBB	80
8.13 Obroty cykliczne wokół osi Z dużego obiektu	82
8.14 Zależność wymiaru pudełkowego od kąta obrotu	82
8.15 Kumulowanie obrotów pochodzących od obiektów różnej wielkości i grup obiektów	83
8.16 Zależność wymiaru pudełkowego od kąta obrotu dla obiektu poddanego modyfikacjom polegającym na zmianie jego wymiarów . . .	84
8.17 Histogram obrazujący rozkład wyników pomiarów wartości wymiaru pudełkowego przy losowych obrotach wszystkich obiektów w modelu .	85
8.18 Wartość wymiaru pudełkowego dla obiektów obróconych w sposób losowy wokół osi Z, przy uwzględnieniu zmiany rozmiaru niektórych obiektów	86
8.19 Różnica w wymiarze pudełkowym pomiędzy stanem wyjściowym, a poszczególnymi stanami, dla algorytmów działających na różnych typach obiektów	87
8.20 Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla różnych obiektów. Kolumna z prawej strony przedstawia te same wykresy ograniczone do momentu osiągnięcia wysycenia, wraz z linią trendu, dla obiektów izolowanych	90
8.21 Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla dużego obiektu przy zwiększonej gęstości pomiarów	91
8.22 Zależność wymiaru pudełkowego od wysokości dla obiektów o różnych rozmiarach	91
8.23 Przyrost wartości wymiaru pudełkowego w zależności od przyrostu wielkości obiektu wzdłuż różnych osi	93
9.1 Przykładowy model składający się z obiektów reprezentowanych za pomocą siatek wielokątowych	96
9.2 Reprezentacja wierzchołkowa siatki wielokątowej w modelu krawędziowym	97
9.3 Przykładowe obiekty reprezentowane za pomocą siatki wielokątowej oraz odpowiadające im podprzestrzenie ograniczające	99
9.4 Pudełka przecinające się z siatką wykryte dzięki testowi zawierania .	101
9.5 Dach budynku reprezentowany pojedynczym wielokątem o zerowej grubości	102
9.6 Przykładowa sytuacja kolizji pudełka (z prawej) i obiektu, w której test zawierania w siatce nie wygeneruje prawidłowego rezultatu	103

9.7	Kierunki promieni wysyłanych z poszczególnych wierzchołków pudełka	103
9.8	Testowe układy zabudowań dla modelu siatki wielokątowej	106
9.9	Testowe układy zabudowań dla modelu siatki wielokątowej	107
9.10	Bryła kościoła i odpowiadająca jej bryła ograniczająca - <i>bounding box</i>	108
9.11	Zależność wartości wymiaru pudełkowego od obrotu, dla przykładowego obiektu typu 3D-mesh	109
9.12	Porównanie średnich czasu wykonania obrotów dla algorytmów bazujących na różnych typach obiektów	109

Spis tabel

7.1	Wyniki testów stabilności	61
7.2	Czas (sek.) wykonania poszczególnych algorytmów dla porównywalnych modeli	63
8.1	Wymiar pudełkowy D_b oraz zmiana tego wymiaru ΔD_b dla poszczególnych przypadków, podczas przekształcania konkretnego rodzaju obiektów: dużych, średnich i małych	79

Streszczenie

Niniejsza praca podejmuje tematykę z zakresu grafiki komputerowej i ma swoje praktyczne odniesienie do architektury krajobrazu. Jej celem jest opracowanie metody i algorytmów umożliwiających ocenę zmian zachodzących w krajobrazie, bazujących na pomiarze wymiaru fraktalnego. Obliczany jest on metodą pudełkową, a następnie wyznaczane są różnice w wartości tego wymiaru pomiędzy stanem istniejącym, a stanem po wprowadzeniu danej zmiany.

Praca składa się z dwóch głównych części. Pierwsza z nich obejmuje zagadnienia dotyczące analiz przeprowadzanych na obrazach dwuwymiarowych. Opisanie w niej zostały aspekty prawidłowej rejestracji oraz segmentacji obrazu, który ma zostać poddany analizie, testy numeryczne prowadzone na obrazach wygenerowanych sztucznie oraz studia przypadków, obejmujące zastosowanie procedury pomiaru wymiaru pudełkowego na rzeczywistych fotografiach wykonanych z perspektywy człowieka. Wykazane zostało istnienie zależności pomiędzy charakterem zmiany wprowadzanej do obrazu a zmierzoną wartością wymiaru pudełkowego.

Druga część dotyczy zagadnień pomiaru wymiaru pudełkowego w przestrzeni trójwymiarowej. Zostały w niej przedstawione trzy modele scen trójwymiarowych, reprezentujących rzeczywistą zabudowę: AABB uwzględniający jedynie wysoce uproszczone kształty obiektów oraz ich położenie w przestrzeni, OBB obejmujący dodatkowo możliwość obrotów obiektów wokół dowolnej osi oraz model oparty na siatce wielokątowej, najbardziej skomplikowany, a zarazem najwierniej oddający rzeczywiste kształty analizowanych obiektów. Dla każdego z modeli został opracowany algorytm obliczania wymiaru pudełkowego uwzględniający jego specyfikę oraz przeprowadzone testy numeryczne badające poprawność wyników, testy stabilności, czasu działania i użyteczności. Dzięki nim potwierdzona została możliwość stosowania wymiaru pudełkowego jako wskaźnika w zadaniach, w których istotne jest znalezienie obiektywnej wartości liczbowej umożliwiającej oszacowanie różnicy pomiędzy określonymi stanami zaprezentowanymi w różnych scenach trójwymiarowych.

Podczas prowadzonych badań ukształtowało się również kilka interesujących spostrzeżeń, dotyczących m.in. wysycania się wartości wymiaru pudełkowego na pewnym poziomie podczas zmiany rozmiaru określonego obiektu, formowania się zależności logarytmicznej wymiaru pudełkowego od wielkości obiektu oraz zwiększonego wpływu zmiany rozmiaru obiektów izolowanych na ostateczną wartość wymiaru, w odróżnieniu od obiektów znajdujących się w grupie. Obserwacje te pozostają w zgodzie zarówno z intuicją jak i naturalną percepcją obserwowanych zmian.

FRACTAL ALGORITHMS IN THE DIGITAL ANALYSIS OF SPATIAL OBJECTS

Abstract

This work is centered on the issues in the field of computer graphics and has its practical relevance to the landscape architecture. Its aim is to develop methods and algorithms assessing changes in the landscape, based on the measurement of the fractal dimension. It is computed using a box-counting method and then the differences in the values of this dimension between the existing state and the state after introduction of the given change are determined.

The work consists of two main parts. First one covers issues related to two-dimensional images' analyses. The aspects of proper registration and image segmentation to be analyzed, numerical tests performed on artificially generated images and the case studies including the use of procedures for computing the box-counting dimension on real photographs taken from a human perspective have been described. The existence of a relationship between the nature of the change introduced into the image and the measured value of the box-counting dimension has been demonstrated.

The second part deals with the issues of calculating the box-counting dimension in three-dimensional space. Three types of three-dimensional scenes representing the actual building development have been presented: AAB taking only highly simplified shapes of objects and their position in space into account, OBB further comprising the possibility of objects' rotation around any axis and a model based on a mesh - the most complex and at the same time most precisely reflected an actual shapes of analyzed objects. For each of the models an algorithm for calculating box-counting dimension taking into account its specificity was developed and numerical tests examining the correctness of results, stability tests, running time tests, usability tests were carried out. Thereby the ability to use box-counting dimension was confirmed as an indicator in the tasks, in which it is important to find an objective numerical value to estimate the difference between the specific states presented in different three-dimensional scenes.

During the research several interesting observations were formed including saturation of the box-counting dimension at a certain level when changing the size of the specific object, forming of a logarithmic relationship between box-counting dimension and the objects' size, the increased impact of changes in the size of isolated objects on the final dimension value in contrast to the objects gathered in groups. These observations are consistent with both the intuition and the natural perception of the observed changes.