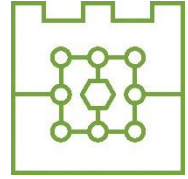




Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Informatyki i Matematyki



Rozprawa doktorska

mgr inż. Jerzy Krzysztof Orlof

WYZNACZANIE WYKRESÓW
WIDOCZNOŚCI NA PODSTAWIE
WIELKOSKALOWYCH CHMUR PUNKTÓW

Promotor

dr hab. inż. arch. Paweł Ozimek, prof. PK

Promotor pomocniczy

dr inż. Piotr Łabędź

Kraków 2025

Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania mojemu promotorowi pracy doktorskiej, Profesorowi Pawłowi Ozimkowi, za cenne wsparcie merytoryczne oraz kierowanie moimi badaniami w trakcie realizacji pracy. Fachowe uwagi oraz wskazówki były nieocenione w procesie rozwoju moich badań i ich finalizacji.

Dziękuję również Panu Doktorowi Piotrowi Łabędziowi, promotorowi asystującemu, za pomoc w realizacji moich założeń badawczych oraz za konstruktywne uwagi i wskazówki, które miały istotny wpływ na jakość mojej pracy.

Mojej żonie, Gosi, dziękuję za cierpliwość i wsparcie w trakcie realizacji pracy. Jej zrozumienie i pomoc w codziennych obowiązkach pozwoliły mi skupić się na badaniach.

Dziękuję również moim dzieciom, Wiktorowi i Laurze za uśmiech i motywację do dalszego rozwoju.

Na koniec pragnę podziękować moim rodzicom, Małgorzacie i Krzysztofowi za ich wsparcie w moich decyzjach zawodowych oraz za pomoc, dzięki nim jestem tu, gdzie jestem.

Spis treści

Abstrakt	8
1. Wprowadzenie.....	10
1.1. Przedstawienie problemu.....	10
1.2. Cel i teza pracy.....	12
1.3. Motywacja.....	13
1.4. Układ rozprawy	15
2. Wprowadzenie do tematyki chmur punktów i wykresów widoczności jako źródła danych.....	17
2.1. Chmura punktów	17
2.2. Wielkości chmur punktów	18
2.2.1. Przykłady dla różnych rozmiarów chmur punktów	19
2.3. Pozyskiwanie chmury punktów	22
2.3.1. LIDAR.....	23
2.3.2. Skanery inwazyjne	24
2.3.3. Skanery bezinwazyjne.....	25
2.3.4. Fotogrametria.....	27
2.3.5. Ogólnodostępne chmury punktów	29
2.3. Klasyfikacja chmury punktów	29
2.4. Inne wykorzystywane typy danych	31
3. Wykres widoczności.....	37
3.1. Wykres widoczności.....	37
3.2. Wykorzystanie wykresów widoczności.....	39
3.2.1. Potrzeba planowania przestrzennego	40
3.2.2. Inne przykłady	42
4. Badanie widoczności	45
4.1. Przegląd metod badania widoczności.....	45
4.1.1. Metody manualne	45

4.1.2. Visibility Polygon.....	48
4.1.3. Isovist 2D	49
4.1.4. Isovist 3D	50
4.1.5. Wykres widoczności na bazie ray tracingu i cyfrowego modelu terenu	51
4.1.6. Algorytm XDRAW.....	53
4.1.8. QLA 360.....	55
4.2. Przegląd funkcji do tworzenia wykresów widoczności w wybranych programach.....	55
5. Wybrana metoda tworzenia wykresu widoczności na bazie ray tracingu i cyfrowego modelu powierzchni i pokrycia terenu.....	58
5.1. Wybrana metoda badania widoczności	58
5.2. Proces tworzenia wykresu widoczności - metoda.....	63
6. Analiza dokładności tworzenia wykresów widoczności na bazie różnych typów danych.....	70
6.1. Metodyka	71
6.2. Dane.....	72
6.2.1. Punkt 1 - Pomnik Ofiar Faszyzmu.....	72
6.2.2. Punkt 2 - Kopiec Krakusa	77
6.3. Wyniki	81
6.3.1. Czas potrzebny na obliczenie wykresów widoczności	82
7. Radialny podział chmury punktów.....	84
7.1. Wyznaczenie radialnych części:.....	86
7.2. Dokładność wykresów widoczności bazujących na wycinkach radialnych	98
7.3. Czas tworzenia wykresu widoczności na bazie wycinków radialnych ...	101
8. Zmiana struktury danych	103
8.1. Struktura danych chmury punktów.	103
8.2. Analizowane struktury danych.....	104

8.2.1. Tablice.....	104
8.2.2. Listy	104
8.2.3. Stosy.....	105
8.2.4. Kolejki.....	106
8.2.5. Grafy	107
8.2.6. Drzewa	108
8.3. Różne struktury drzew	109
8.3.1. Drzewa nieodpowiednie do zadania	110
8.3.2. Drzewa brane pod uwagę	115
9. Algorytm odrzucania poddrzew w kD drzewie.....	121
9.1. Opis algorytmu odrzucającego poddrzewa	122
9.2. Opis zasad odrzucania poddrzew	123
9.2.1. Zasady odrzucenia dla kątów 0-90.....	125
9.2.2. Zasady odrzucenia dla kątów 90-180.....	125
9.2.3. Zasady odrzucenia dla kątów 180-(270).....	125
9.2.4. Zasady odrzucenia dla kątów (270)-(360)	125
9.2.5. Zasady odrzucania dla kątów (0)-(180)	126
9.2.6. Zasady odrzucania dla kątów (90)-(270)	126
9.2.7. Zasady odrzucania dla kątów (180)-(360).....	126
9.2.8. Zasady odrzucania dla kątów (270)-(90).....	127
9.3. Przykład praktycznego zastosowania algorytmu	129
10. Zrównoleglenie procesu.....	132
10.1. Opis przykładowego zadania	132
10.2.1. Podział zadania na podzadania	133
10.2. Propozycja metody zrównoleglania.....	133
10.3.1. Przebieg działania programu	134
10.3.2. Opis plików nagłówkowych.....	136

10.3.3. Opis zadań przypisanych do konkretnych komputerów	137
10.4. Technologia.....	138
10.5. Porównanie czasów wykonywania algorytmu przy różnych metodach zrównoleglenia	138
10.5.1. Zadanie 1: Podział chmury (A) na cztery części	140
10.5.2. Zadanie 2: Podział chmury (B) na dziesięć oraz szesnaście części	142
10.6. Przykład zastosowania zrównoleglenia dla badanego przypadku.....	143
11. Praktyczne zastosowania wyników pracy.....	145
12. Podsumowanie.....	149
13. Bibliografia	153
14. Spis tabel.....	165
15. Spis Ilustracji.....	166

ABSTRAKT

Niniejszy tekst podsumowuje kilkuletnie badania nad generowaniem wykresów widoczności na podstawie chmur punktów, które stanowią jedno z kluczowych źródeł danych do zaawansowanych analiz przestrzennych. Opisany proces opiera się na wykorzystaniu technik renderingu z zastosowaniem ray tracingu, umożliwiającego precyzyjne odwzorowanie relacji widoczności w przestrzeni trójwymiarowej. W badaniach skoncentrowano się na problemie tworzenia wykresów widoczności w oparciu o wielkoskalowe chmury punktów, których ogromna liczba punktów stanowi znaczące wyzwanie obliczeniowe. Problem ten utrudnia efektywne tworzenie powierzchni TIN, będącej podstawą wyznaczania widoczności przy wykorzystaniu algorytmu ray tracingu.

W celu umożliwienia tworzenia wykresów widoczności na podstawie wielkoskalowych chmur punktów, opracowano metodę polegającą na podziale chmury punktów na radialne wycinki, na podstawie których generowane są częściowe wykresy widoczności. Po stworzeniu wykresów częściowych dla wszystkich wycinków, są one łączone w całościowy wykres, tworząc pełny wykres widoczności.

Kolejnym kluczowym elementem optymalizacji procesu było zastosowanie struktury danych kD-drzewa, umożliwiającej szybki i efektywny podział chmury punktów na mniejsze fragmenty radialne. Dzięki temu możliwe było selektywne wybieranie punktów w wycinkach radialnych oraz implementacja autorskiego algorytmu odrzucania poddrzew, co znacznie zredukowało liczbę koniecznych obliczeń.

Zastosowanie tych technik nie tylko usprawniło proces generowania wykresów widoczności, ale również otworzyło nowe możliwości w analizach przestrzennych, szczególnie w kontekście przetwarzania dużych zbiorów danych. Opracowana metodologia wykazuje potencjał do szerokiego zastosowania w różnych dziedzinach, takich jak planowanie przestrzenne, analiza środowiskowa czy inżynieria lądowa.

W dalszej części pracy przedstawiono metodę zrównoleglenia procesu generowania wykresów widoczności, wykorzystującą wiele maszyn obliczeniowych. Zastosowanie tej techniki pozwala na znaczące przyspieszenie obliczeń i efektywniejsze wykorzystanie zasobów sprzętowych. Wartość użycia tak dużych zbiorów danych, jak

chmura punktów, została wykazana poprzez porównanie wyników uzyskanych na podstawie chmury punktów z wynikami generowanymi z numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT).

Praca opisuje również badania dotyczące różnic między wynikami uzyskanymi z pełnych chmur punktów a uproszczonymi numerycznymi modelami pokrycia terenu (NMPT). Badania terenowe w okolicach Kopca Krakusa i Pomnika Ofiar Faszyzmu potwierdziły, że użycie pełnych chmur punktów, mimo większych wymagań obliczeniowych, zapewnia wyższą precyzję i wiarygodność analiz widoczności.

Podsumowaniem badań jest ocena efektywności opracowanego algorytmu oraz jego zastosowania w praktyce komercyjnej. Przeprowadzone projekty potwierdziły zasadność stosowania chmur punktów oraz wdrożonych optymalizacji jako skutecznych narzędzi w analizach widoczności. Przedstawione badania dowodzą, że opracowane rozwiązania pozwalają na przetwarzanie danych na dużą skalę, oferując szerokie możliwości aplikacyjne w analizie przestrzennej i wizualizacji.

1. WPROWADZENIE

1.1. Przedstawienie problemu

Architektura krajobrazu odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu i rozwoju przestrzeni zarówno miejskich, jak i wiejskich. Wpływa na estetykę i funkcjonalność otoczenia, poprawiając jakość życia mieszkańców oraz ich interakcję z otaczającym środowiskiem. Znaczenie kształtowania przestrzeni przejawia się w projektowaniu przestrzeni, które nie tylko są estetyczne, ale również odpowiadają na potrzeby ekologiczne i społeczne. Architekci muszą uwzględniać różnorodne czynniki środowiskowe, kulturowe i użytkowe, co czyni ich pracę złożoną i wymagającą dostępu do wysokiej jakości danych. W miarę jak projekty stają się bardziej skomplikowane, wzrasta zapotrzebowanie na narzędzia wspomagające analizę i planowanie przestrzeni.

Współczesna technologia umożliwia pozyskiwanie coraz bardziej precyzyjnych i obszernych danych, które mogą być wykorzystywane do szczegółowych analiz w architekturze krajobrazu. Nowoczesne metody, takie jak skanowanie laserowe i fotogrametria, dostarczają dokładnych informacji o terenie i jego cechach. Dzięki temu architekci mają do dyspozycji ogromne ilości danych, które mogą być używane do modelowania i analizy. Jednak rosnąca ilość i precyzja danych stanowią wyzwanie, ponieważ ich efektywne przetwarzanie wymaga znacznych zasobów obliczeniowych i zaawansowanych narzędzi informatycznych. Konieczne jest opracowanie metod, które pozwolą na wydajne i dokładne przetwarzanie tych informacji, aby uzyskać wiarygodne wyniki.

W projektowaniu krajobrazu, jak w każdej dziedzinie, dokładność analiz jest niezwykle istotna. Wysoka precyzja danych wpływa na trafność podejmowanych decyzji projektowych oraz na jakość i funkcjonalność tworzonych przestrzeni. Architekci krajobrazu nie tworzą nowych narzędzi, ale wykorzystują już istniejące oprogramowanie i algorytmy informatyczne, aby analizować i interpretować dane. Informatyka techniczna odgrywa kluczową rolę w tym procesie, umożliwiając łączenie danych przestrzennych z zaawansowanymi metodami obliczeniowymi. Współpraca różnych branż, takich jak inżynieria, urbanistyka czy ochrona środowiska, wymaga zintegrowanych narzędzi, które mogą wspierać złożone analizy przestrzenne.

Jednym z głównych wyzwań, z którymi muszą się zmierzyć architekci krajobrazu, jest efektywne przetwarzanie dużych zbiorów danych. Chmury punktów, pozyskiwane m.in. poprzez skanowanie laserowe, dostarczają bardzo szczegółowych informacji o terenie. Dane te są nieocenione przy tworzeniu precyzyjnych wykresów widoczności, które są niezbędne do oceny wpływu projektów na otoczenie oraz do planowania przestrzennego. Problem polega jednak na tym, że wielkość tych danych często przekracza możliwości tradycyjnych metod analizy. W miarę jak dokładność i rozmiar zbiorów danych rośnie, ich pełne wykorzystanie staje się coraz trudniejsze, co stawia przed architektami i inżynierami konieczność opracowywania skutecznych strategii ich przetwarzania.

W niniejszej pracy doktorskiej skoncentrowano się na rozwijaniu metod, które umożliwią efektywne tworzenie wykresów widoczności z wielkoskalowych chmur punktów. Obecnie brak jest powszechnie dostępnych rozwiązań, które pozwalałyby na szybkie i dokładne przetwarzanie tak dużych zbiorów danych. Wyzwanie to wymaga nowatorskiego podejścia, które uwzględnia zarówno potrzeby architektów krajobrazu, jak i ograniczenia techniczne związane z pracą na wielkich zbiorach danych. Zaproponowane rozwiązania mają na celu nie tylko przyspieszenie procesu analizy, ale również zapewnienie, że wyniki będą na tyle dokładne, aby mogły wspierać decyzje projektowe i planistyczne, wpływając pozytywnie na jakość życia i funkcjonowanie przestrzeni.

1.2. Cel i teza pracy

Rezultaty uzyskane w toku prowadzonych badań miały potwierdzić następującą tezę:

Zmiana struktury przechowywania wielkoskalowych chmur punktów na kD drzewo, w połączeniu z algorytmem odrzucania poddrzew, zastosowaniem ray tracingu oraz zrównolegleniem na poziomie sprzętowym, prowadzi do efektywnego wyznaczania wykresów widoczności na podstawie wielkoskalowych chmur punktów, które charakteryzują się większą dokładnością niż wykresy bazujące na NMPT.

Główny cel prowadzonych badań stanowiło:

- Opracowanie ogólnodostępnej metody przetwarzania dużych zbiorów danych, jakimi są wielkoskalowe chmury punktów, w celu generowania wykresów widoczności.
- Porównanie wykresów widoczności opartych na numerycznym modelu pokrycia Terenu (NMPT) utworzonym z uproszczonej chmury punktów z wykresami widoczności opartymi na źródłowej chmurze punktów.
- Przyspieszenie procesu generowania wykresów widoczności poprzez zastosowanie zrównoleglenia na poziomie sprzętowym.

1.3. Motywacja

Dynamiczny rozwój aglomeracji miejskich staje się coraz bardziej widoczny, a tempo tego procesu stale przyspiesza. Duże miasta systematycznie się rozrastają, a te, które niegdyś były małe, stają się prężnie rozwijającymi się ośrodkami. Każda rozbudowa czy renowacja musi być przeprowadzona w porozumieniu z architektami oraz spełniać określone warunki zabudowy. Do ich stworzenia wdrażane są coraz bardziej szczegółowe wymagania. Jednym z istotnych elementów tych wymagań jest analiza wpływu nowoprojektowanych budynków na otoczenie. Dotyczy to nie tylko aspektów wizualnych, które są oczywiście niezwykle ważne, ale także wpływu na emocjonalny odbiór otaczającej przestrzeni przez użytkowników.

Pod względem wizualnym, negatywny wpływ może być zauważalny w przypadku zasłaniania istotnych dla kultury obiektów architektonicznych, np. przez nowe budynki, takie jak hotele czy apartamentowce. Również cień rzucany przez wysokie konstrukcje może negatywnie oddziaływać na otoczenie, zarówno w kontekście funkcjonalnym, jak i estetycznym. Przykładem może być ograniczenie dostępu światła do okien istniejących mieszkań czy tworzenie nieprzyjemnego wrażenia przebywania w cieniu wieżowców podczas spacerów po parkach lub ogrodach.

Tego typu analizy są niezbędne nie tylko w procesie planowania zabudowy, ale także w innych dziedzinach, takich jak architektura krajobrazu czy turystyka. Tworzenie szlaków turystycznych i planowanie przestrzeni krajobrazowych wymaga uwzględnienia widoczności atrakcji turystycznych, jakimi są zabytki, punkty widokowe czy charakterystyczne elementy krajobrazu. W tym kontekście analiza widoczności pozwala na odpowiednie zaplanowanie ścieżek, aby podkreślały one walory estetyczne otoczenia i jednocześnie minimalizowały negatywne oddziaływanie nowych inwestycji na krajobraz.

Rozprawa przedstawia rozwiązanie, które umożliwia tworzenie analizy widoczności na podstawie chmury punktów, przechowującej informacje z maksymalną dokładnością. Takie rozwiązanie pozwala na większą dokładność analiz widoczności, co oznacza uzyskanie wyników o wyższej precyzji, umożliwiających dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych warunków przestrzennych. Ponadto, jest bardziej dostępne, ponieważ pozwala na uzyskiwanie wyników bez wykorzystania bardzo zaawansowanych i drogich maszyn obliczeniowych a jedynie stacji roboczych wykorzystywanych do

projektowania CAD w biurach projektów. Dzięki temu możliwe jest efektywne wspieranie procesów projektowych, które uwzględniają zarówno potrzeby mieszkańców, jak i ochronę walorów krajobrazowych, jednocześnie poprawiając jakość przestrzeni turystycznych.

1.4. Układ rozprawy

Rozdział 1. Wprowadzenie

Przedstawiono problematykę, cel oraz tezę pracy, wraz z motywacją podjęcia tematyki badawczej.

Rozdział 2. Wprowadzenie do tematyki chmur punktów i wykresów widoczności

Zaprezentowano wprowadzenie do zagadnienia chmur punktów, obejmujące ich pozyskiwanie oraz możliwości zastosowania. Dodatkowo omówiono inne, często wykorzystywane typy danych przestrzennych.

Rozdział 3. Wykres widoczności

Przedstawiono definicję wykresu widoczności oraz jego różnorodne zastosowania.

Rozdział 4. Badanie widoczności

Opisano dostępne metody badania widoczności oraz szczegółowo zaprezentowano metodę wybraną w tej pracy.

Rozdział 5. Wybrana metoda tworzenia wykresu widoczności na bazie ray tracingu i cyfrowego modelu powierzchni i pokrycia terenu.

Przedstawiono proces generowania wykresu widoczności przy użyciu wybranej metody.

Rozdział 6. Analiza dokładności tworzenia wykresów widoczności na bazie różnych typów danych

Zaprezentowano porównanie dokładności wykresów widoczności opartych na chmurze punktów z tymi opartymi na numerycznym modelu pokrycia Terenu (NMPT).

Rozdział 7: Radialny podział chmury punktów

Opisano proces dzielenia chmury punktów na wycinki radialne w celu optymalizacji tworzenia wykresów widoczności na dużych chmurach punktów.

Rozdział 8: Zmiana struktury danych

Omówiono zmianę struktury przechowywania chmury punktów na kD drzewo oraz przedstawiono inne dostępne struktury.

Rozdział 9: Algorytm odrzucania poddrzew w kD drzewie.

Przedstawiono algorytm odrzucania poddrzew bazujący na kD drzewie, mający na celu optymalizację obliczeń widoczności.

Rozdział 10: Zrównoleglenie procesu

Opisano proces zrównoleglenia obliczeń przy generowaniu częściowych wykresów widoczności.

Rozdział 11: Praktyczne zastosowania wyników pracy

Zaprezentowano praktyczne zastosowania procesu tworzenia wykresów widoczności na wielkoskalowych chmurach punktów.

Rozdział 12: Podsumowanie

Przedstawiono podsumowanie wyników badań oraz wnioski końcowe.

2. WPROWADZENIE DO TEMATYKI CHMUR PUNKTÓW I WYKRESÓW WIDOCZNOŚCI JAKO ŹRÓDŁA DANYCH

2.1. Chmura punktów

Dzięki postępującym badaniom i innowacjom architekci oraz inżynierowie coraz częściej korzystają z zaawansowanych danych, które odgrywają kluczową rolę w procesach projektowania, planowania i monitorowania inwestycji. Dane te, pochodzące z różnych technologii, są stosowane w licznych dziedzinach, od budownictwa po archeologię. Przykładowo w inżynierii lądowej oraz geodezji, dane przestrzenne, takie jak te pozyskane z chmur punktów, umożliwiają precyzyjne odwzorowanie terenu oraz infrastruktury. W architekturze wykorzystuje się te dane do tworzenia modeli BIM (Building Information Modeling)[1], co z kolei ułatwia zarządzanie cyklem życia budynku oraz przewidywanie jego przyszłych potrzeb konserwacyjnych.

W kontekście archeologii, dane z chmur punktów pozyskane przy użyciu technologii LiDAR, umożliwiają szczegółowe badania dużych obszarów, odkrywanie ukrytych struktur oraz dokumentowanie stanowisk archeologicznych[2]. Podobnie, w geodezji i kartografii, dane z chmur punktów służą do precyzyjnego tworzenia modeli terenu oraz monitorowania zmian w krajobrazie[3]. Technologie takie jak lotniczy skaning laserowy stosuje się również do analizy terenów rolniczych, co pomaga optymalizować produkcję i zarządzanie zasobami.

Wedle definicji [4] **chmura punktów** to zbiór punktów reprezentujących trójwymiarową przestrzeń, gdzie każdy punkt ma przypisane współrzędne X, Y, Z, a często także inne dodatkowe informacje, takie jak kolor, intensywność czy klasyfikacja[5]. Takie dane stanowią cyfrową reprezentację obiektów, pozwalając na bardzo dokładne odwzorowanie rzeczywistego otoczenia [6]. W zależności od zastosowania, chmury punktów mogą być używane do modelowania budynków, infrastruktury [7], analizowania przestrzeni miejskiej, a także monitorowania zmian w środowisku [8]. Dzięki wysokiej precyzji i wszechstronności, chmury punktów

stanowią nieocenione narzędzie w rękach współczesnych architektów i inżynierów, umożliwiając tworzenie zaawansowanych modeli i prowadzenie dokładnych analiz, które mogą być używane na każdym etapie projektu – od wstępnych koncepcji po realizację i utrzymanie obiektów [9].

2.2. Wielkości chmur punktów

Wielkość obszarów, które mogą być przedstawiane za pomocą chmur punktów, jest bardzo zróżnicowana i zależy od specyfiki projektu oraz skali przestrzeni, która ma być odwzorowana. Chmury punktów mogą obejmować zarówno rozległe tereny, takie jak całe miasta, krajobrazy czy obszary przemysłowe, jak i bardzo małe, precyzyjne obiekty, takie jak elementy maszyn, rzeźby czy detale architektoniczne. Warto zaznaczyć, że podział chmur punktów można rozpatrywać pod kątem wielkości obszaru, który one reprezentują, a nie liczby punktów w samej chmurze. Kala, w której się operuje, ma istotne znaczenie dla wyboru metodologii pozyskiwania danych, ich przetwarzania oraz późniejszej analizy. W tym kontekście autor wyróżnia trzy główne kategorie chmur punktów ze względu na wielkość obszarów, które odwzorowują.

Fig. 1 przedstawia umowny, zaproponowany przez autora podział chmur punktów ze względu na ich wielkość. Pierwszą wyróżnioną kategorią są **wielkoskalowe** chmury punktów obejmujące duże obszary, takie jak obszary rolnicze, tereny górskie czy wielkie obiekty infrastrukturalne, jak mosty czy drogi. Te chmury punktów są niezwykle przydatne w projektach związanych z planowaniem przestrzennym, zarządzaniem infrastrukturą oraz monitorowaniem zmian w środowisku. Drugą kategorię stanowią **średnioskalowe** chmury punktów, które obejmują pojedyncze budynki, kompleksy budowlane lub tereny lokalne, np. place, parki czy osiedla mieszkaniowe. Takie dane są często wykorzystywane w architekturze, budownictwie oraz konserwacji zabytków. Trzecią i najmniejszą kategorią są **małoskalowe** chmury punktów, dotyczące bardzo małych obiektów, takich jak detale architektoniczne, rzeźby, maszyny, a nawet części przemysłowe, gdzie istotna jest bardzo wysoka precyzja odwzorowania. Oprócz chmur punktów, które można jednoznacznie zaklasyfikować do określonych grup, istnieją również takie, które nie spełniają w pełni kryteriów żadnej z tych kategorii. Takie chmury znajdują się w strefie pośredniej, będąc przejściem między różnymi grupami danych. Na Fig. 1 zilustrowano ten podział za pomocą skali gradientowej, która płynnie przedstawia

zmiany wartości między wielkościami. Autor wprowadza ten podział, aby lepiej zrozumieć różnorodność zastosowań chmur punktów w praktyce.

- wielkoskalowe 
- średnioskalowe 
- małoskalowe 



Fig. 1 Skala chmury punktów

2.2.1. Przykłady dla różnych rozmiarów chmur punktów

Wielkoskalowe chmury punktów (Fig. 2) to zbiory danych, które różnią się gęstością punktów w zależności od charakterystyki terenu. Wedle standardu II [10], gęstość punktów w obszarach otwartych, takich jak pola czy łąki, wynosi zazwyczaj około 6 pkt/m². W miastach, gdzie infrastruktura jest bardziej złożona i wymagająca, gęstość ta może sięgnąć nawet 20 pkt/m² lub więcej. Różnice w gęstości są wynikiem licznych czynników, takich jak ukształtowanie terenu, obecność budynków, dróg oraz zieleni.

Dodatkowo, różne państwa mogą stosować odrębne standardy i wytyczne przy tworzeniu chmur punktów, co również wpływa na ich wielkość. W Europie zwykle inżynierowie korzystają z niższych gęstości chmur punktów (0,5-1,0 punktów/m²) w krajach takich jak Szwecja, Szwajcaria, Dania, Finlandia i Hiszpania. Podobne gęstości jak w standardzie II, występują w niemieckich projektach. Natomiast w Holandii stosuje się gęstość wynoszącą 10 punktów/m² [11],[12].

W krajach z surowszymi normami dotyczącymi dokładności danych gęstość punktów może być większa, co sprzyja dokładniejszym analizom i modelom przestrzennym. W innych regionach, gdzie dostęp do zaawansowanych metod zbierania

danych jest ograniczony, gęstość punktów może być niższa, co wpływa na jakość i użyteczność takich zbiorów.



Fig. 2 Przykład wielkoskalowej chmury punktów

Średnioskalowe chmury punktów (Fig. 3) to zbiory danych, które koncentrują się na mniejszych przestrzeniach, takich jak pojedyncze budynki czy działki. Umożliwiają one tworzenie dokładnych modeli cyfrowych, co jest kluczowe w kontekście renowacji i odbudowy. Te modele są szczególnie przydatne w projektowaniu, zwłaszcza w ramach modelowania informacji o budynkach BIM. Wedle artykułu [13] Historic Building Information Modelling (HBIM), bazujące na skanach chmur średnioskalowych jest w stanie objąć kompleksową renowacją budynki zabytkowe. Średnioskalowe chmury punktów pozwalają również na integrację danych z różnych źródeł, co wspiera tworzenie kompleksowych modeli 3D, które zawierają informacje o geometrii, materiałach oraz systemach inżynierskich.



Fig. 3 Przykład średnioskalowej chmury punktów

Małoskalowe chmury punktów (Fig. 4) są wykorzystywane w architekturze do modelowania detali o niewielkich rozmiarach, takich jak ornamenty, elementy wykończeniowe czy rzeźby. Pozwalają na uchwycenie szczegółowych informacji dotyczących kształtu, tekstury oraz koloru, co jest niezbędne przy tworzeniu precyzyjnych modeli BIM, szczególnie w przypadku obiektów o złożonej geometrii. W architekturze, takie chmury punktów są również używane do monitorowania postępu prac budowlanych oraz oceny jakości wykonania projektu, co pozwala na porównanie rzeczywistego stanu budynku z projektem i identyfikację ewentualnych różnic [14].

Poza architekturą, małoskalowe chmury punktów koncentrują się na obiektach, osobach, zwierzętach oraz innych elementach o niewielkich rozmiarach. Ich głównym celem jest uchwycenie szczegółowych informacji o kształcie i teksturze, co czyni je niezwykle przydatnymi w dziedzinach takich jak animacja, gry komputerowe [15], medycyna [16], a także badania biologiczne i środowiskowe, pozwalając na analizę i modelowanie szczegółowych struktur w 3D.



Fig. 4 Przykład małoskalowej chmury punktów

W zależności od wielkości chmur punktów są one przechowywane w różnych formatach, najczęściej zapisywana jest w postaci plików .las lub .laz. Format .las to standardowy, niekompresowany format, który przechowuje surowe dane chmury punktów uzyskane z technologii skanowania laserowego. Natomiast format .laz jest jego skompresowaną wersją, która umożliwia znacznie szybszy transfer, łatwiejsze przechowywanie oraz przeglądanie danych, zachowując jednocześnie ich wysoką jakość. Dzięki kompresji, pliki .laz są bardziej efektywne w zarządzaniu dużymi zbiorami danych, co jest szczególnie ważne w projektach obejmujących obszerne obszary lub złożone struktury[9].

2.3. Pozyskiwanie chmury punktów

Pozyskiwanie chmur punktów to kluczowy proces zbierania danych przestrzennych, który odgrywa istotną rolę w wielu dziedzinach. Istnieje wiele metod pozyskiwania chmur punktów, które różnią się między sobą pod względem zastosowanej technologii oraz sprzętu. Niektóre metody są bardziej odpowiednie do pracy w dużych obszarach, gdzie konieczne jest uchwycenie szerokiego kontekstu, podczas gdy inne skoncentrowane są na szczegółowych pomiarach niewielkich obiektów. Wybór konkretnej metody często zależy od specyfiki projektu, wymaganej dokładności oraz warunków terenowych, takich jak ukształtowanie terenu, dostępność miejsca czy warunki atmosferyczne. Kluczowe jest również określenie celu pozyskiwania danych — czy chodzi o monitoring zmian w krajobrazie, tworzenie modeli 3D, czy też wsparcie dla działań związanych z ochroną środowiska. Odpowiednia metoda pozyskiwania chmur punktów pozwala na uzyskanie precyzyjnych i wiarygodnych danych, które stanowią

podstawę dla dalszych analiz, wizualizacji oraz zastosowań praktycznych. W związku z rosnącym zainteresowaniem technologiami związanymi z chmurami punktów, rozwijają się również nowe metody i narzędzia, które zwiększają efektywność i dokładność zbierania danych, co wpływa na jakość realizowanych projektów w różnych branżach.

2.3.1. LIDAR

Pozyskiwanie chmur punktów przy pomocy skaningu laserowego jest jedną z najważniejszych metod w tej dziedzinie [17], [18], [19], [20], [21]. Dzięki tej technologii można generować chmury punktów obejmujące całe państwa. Metoda ta opiera się na skaningu LIDAR (Light Detection and Ranging; Fig. 5). Polega ona na przelocie dronem lub samolotem nad określonym terenem, zbieraniu współrzędnych GPS oraz określaniu wysokości za pomocą lasera mierzącego odległość od ziemi przy użyciu konkretnej długości fali. W określonych odstępach czasowych punkty są próbkowane i zapisywane. Przy wykorzystaniu tej metody mogą być również zapisywane dodatkowe informacje o punktach, takie jak kolor lub klasa.

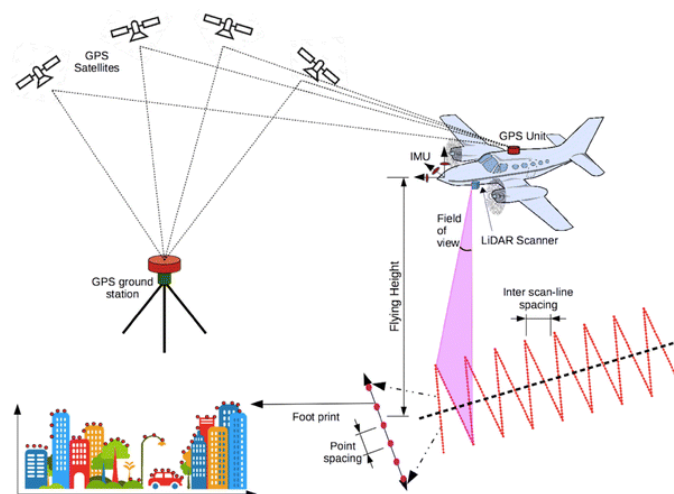


Fig. 5 LIDAR - metoda skanowania terenu ([22])

Metoda LIDAR ma wiele zalet, ale także pewne wady. Do wad można zaliczyć błędy pojawiające się w chmurze punktów, np. zamiast pomiaru odległości od ziemi, która określa współrzędną Z, może być zapisana odległość od przelatującego ptaka. Dodatkowo, impulsy lasera mogą być pochłaniane przez chmury, wodę lub mgłę, co prowadzi do niedokładności pomiarów. Duża objętość danych generowana przez tę metodę wpływa na proces tworzenia wykresów widoczności, co jest jednym z głównych aspektów analizowanych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Pomimo tych trudności, skaniny laserowy LIDAR pozostaje niezwykle cennym narzędziem w wielu dziedzinach, takich jak geodezja, kartografia, archeologia czy ochrona środowiska, ze względu na swoją precyzję i zdolność do zbierania szczegółowych danych terenowych. Technologia LIDAR jest wykorzystywana głównie do generowania wielkoskalowych chmur punktów.

Równie powszechną metodą jest pozyskiwanie chmur punktów przy wykorzystaniu skanerów 3D, choć zazwyczaj dotyczy mniejszych przestrzeni niż metody oparte o LIDAR. Skanery 3D to urządzenia bazujące na generowaniu modelu cyfrowego poprzez przenoszenie kształtu fizycznego obiektu do postaci trójwymiarowej chmury punktów. W tej kategorii można wyróżnić kilka grup skanerów, z których dwie najważniejsze to skanery dotykowe i bezdotykowe.

2.3.2. Skanery inwazyjne

Skanery inwazyjne [23] (Fig. 6), znane również jako skanery dotykowe, to urządzenia pomiarowe, które wymagają bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem w celu zebrania danych. Proces ten opiera się na wykorzystaniu sondy pomiarowej, która styka się z powierzchnią obiektu, aby pobrać współrzędne poszczególnych punktów. Te współrzędne są następnie przekształcane w zbiór danych, tworząc chmurę punktów reprezentującą geometrię skanowanego obiektu. Jedną z głównych zalet skanerów dotykowych jest ich wysoka precyzja - pozwalają one na niezwykle dokładne odwzorowanie kształtów i detali, co czyni je cennym narzędziem w wielu dziedzinach, takich jak inżynieria odwrotna czy kontrola jakości.

Mimo swojej precyzyjności, skanery dotykowe mają pewne ograniczenia. Przede wszystkim ich zastosowanie może być nieodpowiednie w przypadku delikatnych, kruchych lub cennych obiektów, które mogą ulec uszkodzeniu w wyniku kontaktu fizycznego. Dla tego typu obiektów preferowane są metody bezdotykowe, które nie narażają powierzchni na ryzyko uszkodzeń. W związku z tym, wybór odpowiedniego rodzaju skanera zależy nie tylko od wymaganej dokładności pomiarów, ale także od specyfiki materiału i stanu obiektu, który ma zostać zeskanowany.



Fig. 6 Skaner inwazyjny [24]

2.3.3. Skanery bezinwazyjne

Skanery bezdotykowe, zwane również bezinwazyjnymi (Fig. 7), to nowoczesne urządzenia pozwalające na tworzenie cyfrowych modeli obiektów bez konieczności fizycznego kontaktu z nimi. Skanowanie bezdotykowe wykorzystuje różne technologie, takie jak światło strukturalne, promieniowanie laserowe, mikrofałe radiowe czy fale świetlne w zakresie podczerwieni. Dzięki temu metoda ta jest nieinwazyjna i bezpieczna, co oznacza, że podczas skanowania nie ma ryzyka uszkodzenia delikatnych lub cennych obiektów, co jest szczególnie ważne w dziedzinach takich jak archeologia, sztuka czy medycyna.

Jedną z najczęściej stosowanych technologii w skanerach bezdotykowych jest światło strukturalne[25]. W tej metodzie na obiekt rzutowana jest siatka wzorów świetlnych, która deformuje się w zależności od kształtu powierzchni. Kamery rejestrują te zmiany, a oprogramowanie przekształca dane na model 3D. Skanery oparte na świetle strukturalnym są szybkie i pozwalają na skanowanie obiektów o różnych rozmiarach i kształtach, ale mogą mieć trudności z dokładnym odwzorowaniem powierzchni błyszczących lub przezroczystych.

Skanery laserowe [26] to kolejna popularna technologia stosowana w skanowaniu 3D. W tej metodzie światło laserowe emitowane z urządzenia odbija się od powierzchni skanowanego obiektu, a czujniki analizują czas, jaki zajmuje powrót promienia do skanera. Na tej podstawie obliczana jest odległość między urządzeniem a każdym punktem na powierzchni obiektu, co pozwala na dokładne odwzorowanie jego

geometrii. Skanery laserowe są bardzo precyzyjne i stosowane są w wielu dziedzinach, w tym w inżynierii, architekturze i ochronie dziedzictwa kulturowego. Mają jednak pewne ograniczenia, takie jak trudności z dokładnym odwzorowaniem bardzo małych szczegółów lub skanowaniem w intensywnym świetle dziennym.

Mikrofale radiowe [27] i podczerwień to mniej popularne, ale wciąż stosowane technologie w bezdotykowym skanowaniu 3D. Mikrofale radiowe są używane w bardziej specjalistycznych przypadkach, takich jak skanowanie dużych obiektów, gdy dokładność laserów może być niewystarczająca. Natomiast podczerwień jest stosowana w sytuacjach, gdzie wymagana jest szybka analiza bez ryzyka uszkodzenia obiektu, np. w przemyśle motoryzacyjnym czy medycynie.

Skanowanie bezdotykowe ma wiele zalet, które sprawiają, że jest szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach. Jednym z najważniejszych atutów tej technologii jest to, że pozwala na skanowanie delikatnych i cennych obiektów bez ryzyka ich uszkodzenia. Jest to niezwykle ważne w dziedzinach takich jak archeologia czy konserwacja zabytków, gdzie skanery pozwalają na dokumentację i analizę bez konieczności dotykania lub przenoszenia obiektów. Skanery bezdotykowe są również znacznie szybsze niż ich dotykowe odpowiedniki, co sprawia, że proces skanowania dużych obiektów lub wielu przedmiotów jest bardziej efektywny czasowo.

Współrzędnościowe metody pomiarowe [28] są kolejnymi wartymi uwagi metodami pobierania informacji o kształcie obiektów. Polegają na precyzyjnym przybliżaniu sondy pomiarowej do badanego obiektu w celu zarejestrowania współrzędnych poszczególnych punktów na jego powierzchni. W maszynach współrzędnościowych (CMM) o konstrukcji portalowej ruchoma część urządzenia – portal wraz z pinolą – przesuwa się w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, umożliwiając pełen zakres pomiarowy w przestrzeni roboczej. Sonda i trzpień, zamocowane na wychylno-obrotowej głowicy, po zetknięciu z wyznaczonym punktem obiektu rejestrują jego dokładne współrzędne. Proces ten jest powtarzany wielokrotnie dla różnych punktów na powierzchni, tworząc szczegółowy zbiór punktów opisujących kształt i strukturę badanego elementu. Jednocześnie głowice odczytowe liniałów na każdej osi maszyny rejestrują dokładne położenie sondy, co pozwala na bardzo precyzyjne odwzorowanie całej geometrii obiektu. Dzięki takiej technologii CMM oferuje znacznie więcej możliwości niż zwykłe pomiary odległości – umożliwia

zaawansowaną analizę, dokładne odwzorowanie skomplikowanych kształtów oraz pełną kontrolę jakości produktów wykorzystywaną w inżynierii, produkcji przemysłowej i kontroli jakości.



Fig. 7 Bezinwacyjny skander 3D [29]

2.3.4. Fotogrametria

Fotogrametria [9] to technika bazująca na tworzeniu chmury punktów na podstawie zdjęć obiektu. Proces fotogrametrii polega na pozyskiwaniu informacji o obiektach poprzez analizę zdjęć analizowanego obiektu. W zależności jaki obiekt jest badany fotografie wykonuje się albo z różnych kątów i perspektyw albo wzdłuż obiektu. Aby uzyskać najlepsze wyniki, konieczne jest wykonanie serii zdjęć wokół modelu tak, aby każdy punkt na obiekcie był widoczny na co najmniej dwóch fotografiach. Następnie te zdjęcia są importowane do specjalistycznego oprogramowania, które identyfikuje wspólne punkty i generuje na ich podstawie chmurę punktów, tworząc trójwymiarową reprezentację obiektu. Chmura punktów jest przekształcana w model siatki, który zawiera informacje o powierzchniach obiektu, a następnie teksturowany przy użyciu oryginalnych zdjęć, co nadaje modelowi realistyczny wygląd. Technika fotogrametrii jest dedykowana dla wszystkich skal chmur punktów od małoskalowych aż po wielkoskalowe.

Grafika Fig. 8 przedstawia metodę tworzenia zdjęć w celu uzyskania odwzorowania terenu na podstawie fotogrametrii. Przedstawiono na niej pokrycie zdjęć

wzdłuż trasy lotu oraz w poprzek, tak aby na zdjęciach znajdowały się elementy nakładające się, co umożliwi ich połączenie.

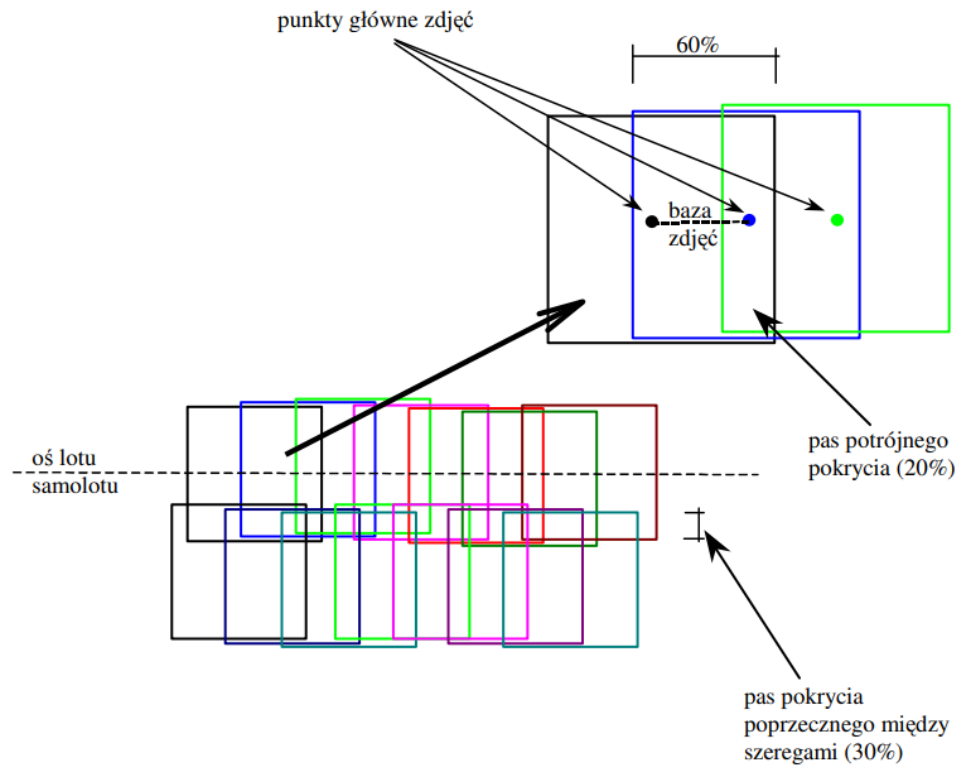


Fig. 8 Sposób wykonania szeregowych zdjęć lotniczych ([30])

Fotogrametria jest wszechstronną metodą, która może być stosowana zarówno do tworzenia chmur punktów w średniej, jak i małej skali. Jej głównymi zaletami są ekonomiczność, dostępność oraz możliwość wykorzystania w wielu różnych typach projektów – zarówno prostych, jak i zaawansowanych [31]. W porównaniu do innych metod, takich jak skanowanie laserowe czy skanery 3D, fotogrametria jest znacznie tańsza i można ją wykonać przy użyciu standardowego aparatu fotograficznego oraz dostępnego oprogramowania.

Jednakże fotogrametria ma też pewne ograniczenia. Może być mniej precyzyjna w porównaniu do skanowania laserowego, a sam proces fotografowania i przetwarzania zdjęć jest czasochłonny, co może stanowić wyzwanie przy bardziej zaawansowanych projektach. Dodatkowo, wymaga odpowiednich warunków oświetleniowych, aby uzyskać dokładne i spójne wyniki.

2.3.5. Ogólnodostępne chmury punktów

Dostępne źródła chmur punktów stanowią cenny zasób, z którego można korzystać bez konieczności samodzielnego zbierania danych. Jednym z popularniejszych źródeł w Polsce jest geoportal (<https://www.geoportal.gov.pl/>) [32], który oferuje szeroki wachlarz informacji, w tym dane dotyczące numerów działek, zaludnienia, uzbrojenia infrastruktury oraz chmur punktów dla całego kraju. Dzięki temu użytkownicy mogą łatwo uzyskać dostęp do istotnych danych, co znacznie upraszcza procesy projektowe i analizy przestrzenne.

Podobne portale dostępne są również w innych krajach, które oferują różnorodne zasoby danych geograficznych. W Stanach Zjednoczonych popularnym źródłem jest USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), który udostępnia dane satelitarne oraz chmury punktów z różnych badań geodezyjnych. W Wielkiej Brytanii można korzystać z Ordnance Survey (<https://www.ordnancesurvey.co.uk/products>), który oferuje dane topograficzne i przestrzenne, w tym chmury punktów pochodzące z różnorodnych projektów skanowania terenu. W Australii GeoPortal (<https://portal.ga.gov.au/>) oferuje dostęp do danych geodezyjnych, w tym chmur punktów z projektów skanowania lidarowego.

Dzięki globalnej dostępności takich zasobów, specjaliści z różnych branż mają możliwość wykorzystania danych geograficznych z różnych regionów świata, co umożliwia lepsze porównania i analizy w kontekście projektów międzynarodowych, badań naukowych oraz strategii rozwoju przestrzennego. Korzystanie z już istniejących chmur punktów staje się więc nie tylko praktyczne, ale także efektywne, wspierając zrównoważony rozwój i innowacje w wielu dziedzinach.

2.3. Klasyfikacja chmury punktów

W przypadku chmur punktów istotnym aspektem jest klasyfikacja danych. Jeżeli w danym zbiorze punktów są one odpowiednio sklasyfikowane, możliwe jest przeprowadzenie efektywnej filtracji [33]. Dzięki temu można usunąć punkty, które nie są istotne dla danej analizy, co pozwala na uproszczenie modelu i zwiększenie jego efektywności. Eliminacja niepotrzebnych danych zmniejsza również ryzyko wprowadzenia błędnych lub nieistotnych informacji, co poprawia precyzję końcowych wyników analizy.

Klasyfikacja chmur punktów (Fig. 9, Fig. 10) umożliwia segmentację danych na kategorie, co pozwala na precyzyjne i szybkie usunięcie zbędnych informacji. Przykładowo, w zbiorze danych zawierającym chmurę punktów zarejestrowaną w środowisku miejskim, punkty odpowiadające ruchomym obiektom, takim jak pojazdy, mogą być odfiltrowane, aby skupić się na statycznych elementach infrastruktury [34], [35].

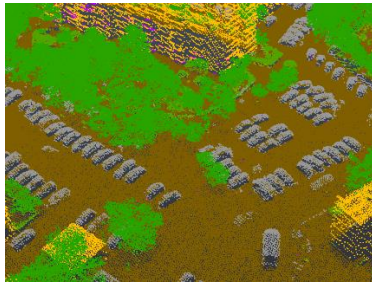


Fig. 9 Chmura punktów ze wszystkimi klasami

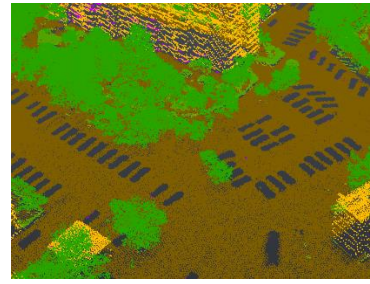


Fig. 10 Chmura punktów z wyłączonymi niektórymi klasami

Dodatkowo, implementacja procedur klasyfikacji i filtracji w procesie przetwarzania chmur punktów pozwala na zoptymalizowanie późniejszych etapów analizy, takich jak generowanie modeli terenu czy wykresów widoczności. Precyzyjna klasyfikacja i filtracja danych prowadzą do uzyskania bardziej dokładnych i wiarygodnych wyników.

Można wyróżnić kilka metod klasyfikacji punktów z chmury punktów. Pierwszą, podstawową, ale rzadko stosowaną metodą jest metoda manualna. Polega ona na ręcznym ocenianiu przynależności punktu do danej grupy. Ze względu na dużą liczbę punktów, jest to zbyt pracochłonne, dlatego nie jest to metoda powszechnie stosowana.

Inna metoda bazuje na uczeniu maszynowym[35]. Przy pomocy tej metody klasyfikacja opiera się na pięciu podstawowych krokach:

1. Kolekcja danych
2. Czyszczenie danych
3. Definiowanie modelu i parametrów
4. Trenowanie i testowanie modelu
5. Przewidywanie wyników

Dla klasyfikacji chmur punktów proces szkolenia wykorzystuje model uczenia nadzorowanego. Definicja parametrów jest niezwykle istotna dla uczenia nadzorowanego i ma dwa cele: opracowanie danych, które będą wykorzystywane jako dane wejściowe algorytmu oraz poprawa wydajności w czasie poprzez dostosowanie parametrów.

Punkty można zakwalifikować do kilku różnych grup:

- punkty reprezentujące niską roślinność, tj. w zakresie 0-0.40 m,
- punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0.40-2.00 m,
- punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2.00 m,
- punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie,
- szum,
- punkty reprezentujące obszary wód,
- punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia.

Dzięki takiej klasyfikacji można w łatwy sposób odfiltrować wysoką roślinność (drzewa), które zasłaniają interesujące elementy jedynie w lecie. Dodatkowo punkty należące do grupy „szumy” umożliwiają pierwszy poziom odfiltrowywania elementów niepożądanych, którymi mogą być np. ptaki czy linie wysokiego napięcia. Elementy tego typu wprowadzają istotne błędy w wykresach widoczności, które będą opisane w późniejszych rozdziałach.

2.4. Inne wykorzystywane typy danych

2.4.1. Ortofotomapa

Ortofotomapa [36], [37]Fig. 11) to rodzaj mapy, która powstaje w wyniku przekształcenia zdjęć lotniczych lub satelitarnych w obraz o odwzorowaniu kartometrycznym, co oznacza, że obrazy są skalibrowane i przedstawiają rzeczywisty układ geograficzny terenu. W przeciwieństwie do zwykłych fotografii lotniczych, ortofotomapy są korygowane pod kątem zniekształceń wynikających z ukształtowania terenu, kątów nachylenia obiektywu aparatu oraz innych zniekształceń, wynikających z optyki i perspektywy.

Ortofotomapy łączą w sobie dokładność tradycyjnych map topograficznych z bogactwem informacji, jakie dostarczają fotografie. Dzięki temu stanowią nieocenione

narzędzie w wielu dziedzinach, takich jak urbanistyka, zarządzanie przestrzenne, rolnictwo precyzyjne, geodezja, a także monitorowanie zmian środowiskowych.



Fig. 11 Ortofotomapa

2.4.2. NMT

Numeryczny model terenu (NMT) [38] (Fig. 12) to cyfrowa, dyskretna reprezentacja ukształtowania terenu stworzona na bazie przefiltrowanej chmury punktów, polegająca na odwzorowaniu wysokości w poszczególnych punktach siatki na danym obszarze. Model ten opiera się na pomiarach punktów wysokościowych i algorytmach interpolacyjnych, które umożliwiają określenie wysokości w dowolnym punkcie modelowanego obszaru. NMT stanowi niezbędne narzędzie w analizach topograficznych, kartograficznych, hydrologicznych oraz wielu innych dziedzinach, wymagających dokładnych danych o ukształtowaniu powierzchni ziemi.

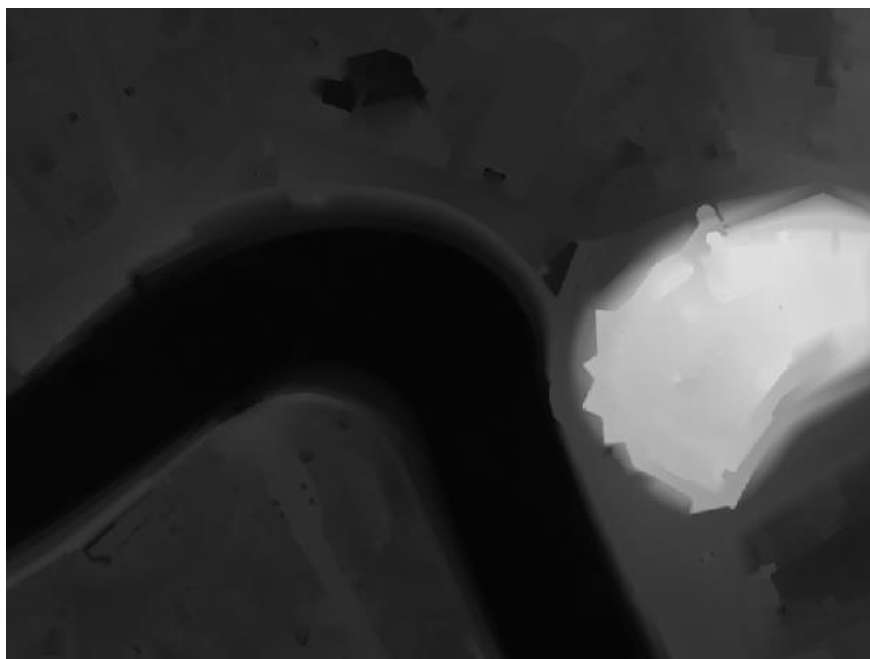


Fig. 12 Wizualizacja numerycznego modelu terenu

W Polsce podstawowy NMT określony przez Standard II [10] jest opracowywany w siatce o rozdzielczości $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, co pozwala na uzyskanie bardzo szczegółowych informacji o ukształtowaniu terenu. Taki model jest regularnie aktualizowany na podstawie danych pozyskanych z lotniczego skaningu laserowego (ALS - *Airborne Laser Scanning*). ALS, dzięki technologii LIDAR pozwala na uzyskanie niezwykle precyzyjnych pomiarów wysokości w dużych obszarach, nawet w trudno dostępnych terenach. Systematyczna aktualizacja danych jest kluczowa, zwłaszcza w kontekście monitorowania zmian terenu oraz prowadzenia projektów inżynierskich.

Na terenach miejskich, gdzie szczegółowość danych jest bardzo istotna, NMT opracowywany jest również na podstawie pomiarów stereoskopowych. Proces ten odbywa się w ramach produkcji ortofotomapy o wysokiej rozdzielczości, gdzie piksel obrazu ma wielkość **10 cm** lub mniejszą. Pomiar stereoskopowy pozwala na precyzyjne odwzorowanie ukształtowania terenu w gęsto zabudowanych lub skomplikowanych topograficznie obszarach, co ma kluczowe znaczenie w planowaniu przestrzennym, inżynierii lądowej oraz innych zastosowaniach wymagających dokładnej wiedzy o terenie.

Oprócz modeli o wysokiej rozdzielczości, w Polsce opracowywany jest również NMT w siatce $5\text{ m} \times 5\text{ m}$. Taki model jest tworzony głównie na podstawie pomiarów stereoskopowych w ramach produkcji ortofotomapy, gdzie rozdzielczość piksela wynosi 25 cm . Tego rodzaju model jest używany do analiz na większą skalę, które nie wymagają tak dużej precyzji, jak modele o siatce $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, ale wciąż oferują odpowiednią dokładność dla większości zastosowań kartograficznych i geodezyjnych.

Numeryczny model terenu jest szeroko wykorzystywany w wielu dziedzinach, takich jak planowanie przestrzenne [39], inżynieria hydrotechniczna [40] (np. modelowanie powodzi), geologia, rolnictwo precyzyjne, ochrona środowiska [41] oraz zarządzanie zasobami naturalnymi. Dzięki dokładnym danym o wysokości terenu możliwe jest np. modelowanie przepływów wód, analizowanie zagrożeń erozyjnych czy ocena dostępności terenów pod nowe inwestycje. Ponadto, NMT jest integralnym elementem systemów informacji geograficznej (GIS), wspierając różnorodne analizy przestrzenne oraz zarządzanie danymi geograficznymi.

2.4.3. NMPT

Numeryczny model pokrycia terenu (NMPT Fig. 13) [42] to cyfrowe odwzorowanie powierzchni terenu, które uwzględnia wszystkie obiekty znajdujące się na niej, takie jak budynki, drzewa, mosty, wiadukty oraz inne elementy infrastruktury. Został on zaprezentowany na Fig. 13 i przedstawia dokładnie ten sam obszar co wcześniej wspomniany NMT (Fig. 12). NMPT tak jak NMT powstał na podstawie chmury punktów i pozwala na dokładną analizę przestrzenną obszaru, biorąc pod uwagę zarówno naturalne, jak i sztuczne struktury, co czyni go niezbędnym narzędziem w takich dziedzinach jak urbanistyka, zarządzanie przestrzenią, inżynieria lądowa oraz geodezja. Wilson i Gallant [43] opisują NMPT jako „narzędzie do zrozumienia i analizy procesów powierzchniowych poprzez dostarczanie cyfrowego modelu terenu”, natomiast Moore [44] opisuje cyfrowy model terenu, jako „reprezentację powierzchni Ziemi uzyskaną z danych teledetekcyjnych lub pomiarów naziemnych, wykorzystywaną do analizy terenu.”

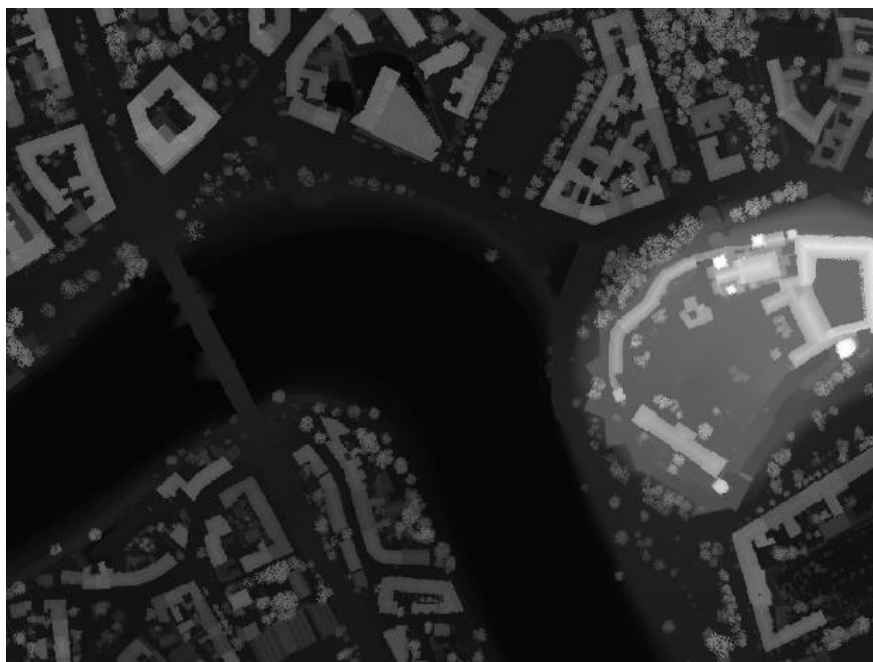


Fig. 13 Ilustracja numerycznego modelu pokrycia terenu

W Polsce NMPT jest opracowywany z dużą precyzją, przy czym rozdzielczość modelu zależy od charakteru terenu. Na obszarach miejskich, gdzie gęstość zabudowy i infrastruktury jest wyższa, stosuje się siatkę o rozdzielczości $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ [10]. Taka rozdzielczość umożliwia szczegółowe odwzorowanie elementów, takich jak budynki, ulice czy drzewa, co jest kluczowe w analizach przestrzennych w środowisku miejskim. Na pozostałych terenach, mniej zurbanizowanych, stosuje się siatkę o rozdzielczości $1,0 \times 1,0 \text{ m}$, co również zapewnia wysoką precyzję, umożliwiając analizę elementów pokrycia terenu na dużą skalę.

NMPT jest niezwykle przydatny w badaniu ekspozycji na światło słoneczne oraz wzorców cieni w środowiskach miejskich, co ma znaczenie dla planowania infrastruktury, takiej jak drogi, mosty i sieci użyteczności publicznej. Ponadto, cyfrowe modele terenu NMPT są szeroko stosowane w modelowaniu hydrologicznym do przewidywania przepływu wody i identyfikacji obszarów zagrożonych powodzią. Urbanistyczni planiści korzystają z tych danych, aby projektować systemy odwadniające, ochrony przeciwpowodziowej oraz tworzyć przepisy budowlane, które minimalizują ryzyko powodzi na zagrożonych terenach [45].

Dzięki szczegółowym danym dotyczącym pokrycia terenu, możliwe jest również monitorowanie zmian krajobrazu oraz planowanie nowych inwestycji, takich jak infrastruktura drogowa czy budynki, z uwzględnieniem ich wpływu na otoczenie. NMPT,

integrując informacje o elementach pokrycia terenu, stanowi kluczowy komponent systemów informacji przestrzennej (GIS), umożliwiając zaawansowane analizy i optymalizację działań w wielu sektorach gospodarki oraz administracji publicznej.

3. WYKRES WIDOCZNOŚCI

3.1. Wykres widoczności

Widoczność jest kluczowym zagadnieniem w wielu dziedzinach nauki, technologii oraz praktycznych zastosowaniach, takich jak systemy monitoringu bezpieczeństwa, inżynieria ruchu czy planowanie przestrzenne. Choć pojęcia takie jak natężenie światła, barwa czy siła światła są powszechnie znane i używane w codziennym życiu, mówi się także o obszarach, w które to światło dociera. Modele funkcjonalne światła mogą być wykorzystywane do optymalizacji rozmieszczenia źródeł światła, minimalizowania obszarów cienia, optymalizowania natężenia oświetlenia w miejscach pracy oraz poprawy funkcjonalności oświetlenia. Ma to szczególne zastosowanie w projektowaniu przestrzeni użytkowych, gdzie kluczowa jest ergonomia i efektywne wykorzystanie światła, a także w systemach wspierających bezpieczeństwo i orientację w terenie, takich jak oświetlenie dróg, obszarów publicznych czy obiektów przemysłowych.

Warto doprecyzować, że modelowanie światła jest skuteczną metodą wyznaczania stref widocznych, pozwalającą na określenie obszarów dostępnych dla punktowego źródła światła, a tym samym widocznych z punktu położenia światła. Takie podejście umożliwia dokładne odwzorowanie relacji między źródłem światła a przeszkodami, co jest kluczowe w analizach widoczności. Analiza propagacji światła w przestrzeni przy zastosowaniu jej w systemach informacji geograficznej ma istotne znaczenie w optymalizacji widoczności zwłaszcza w kontekście planowania przestrzennego.

Jednym z podstawowych pojęć opisujących przestrzenie, do których dociera światło, jest wykres widoczności [46] Fig. 14. Wykres widoczności jest to graficzna reprezentacja przestrzeni, widocznych i niewidocznych z danego miejsca [47]. Reprezentacją graficzną jest obraz binarny, na którym obszary widoczne są reprezentowane jako białe piksele, natomiast niewidoczne obszary jako piksele czarne. Tego rodzaju reprezentacja umożliwia precyzyjną analizę zasięgu widoczności w postaci macierzy wartości 0 i 1.

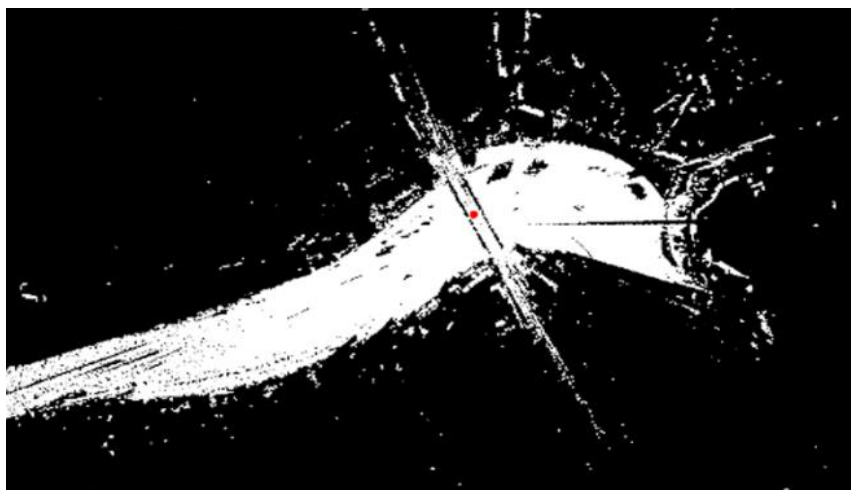


Fig. 14 Wykres widoczności

Wykresy widoczności są użyteczne w analizach oświetleniowych, optymalizacji widoczności obiektów architektonicznych w celu minimalizacji ich negatywnego wpływu na otoczenie oraz w badaniach terenowych, gdzie konieczne jest określenie, które obszary są zasłonięte przez przeszkody terenowe lub budynki. Sam termin pojawił się kilkadziesiąt lat temu, co zostało odnotowane przez Tandy [48] oraz Benedikta [49] w ich pracach na temat przestrzeni i wizualizacji w kontekście badań nad przestrzenią i krajobrazem.

Rozwinięciem tej koncepcji jest mapa widoczności zaprezentowana na Fig. 15 [50], która powstaje poprzez połączenie ze sobą, przy użyciu dodawania lub zaznaczenia na różne kolory wielu wykresów widoczności, reprezentujących różne punkty. Mapa widoczności pokazuje przestrzenie, które są widoczne z wielu punktów w określonym obszarze. Może być wykorzystywana do określania, jakie obszary są widoczne z perspektywy obserwatora poruszającego się po określonej ścieżce lub obszarze. To narzędzie pozwala na szerszą analizę przestrzenną, obejmującą np. widoczność z różnych miejsc na danym terenie, co może być niezwykle przydatne w takich przypadkach jak planowanie turystyki, zarządzanie widocznością reklam, określanie ciągów widokowych czy badanie wpływu nowych inwestycji na otaczający krajobraz. Stosowane jest w planowaniu przestrzennym, w tym w badaniach dotyczących ochrony krajobrazu [51]. Przykładowo, w turystyce ważne jest, aby wiedzieć, z których punktów widoczny jest zabytek, pomnik czy inne atrakcyjne obiekty, co może pomóc w zarządzaniu ruchem turystycznym oraz optymalizacji rozmieszczenia infrastruktury [52].

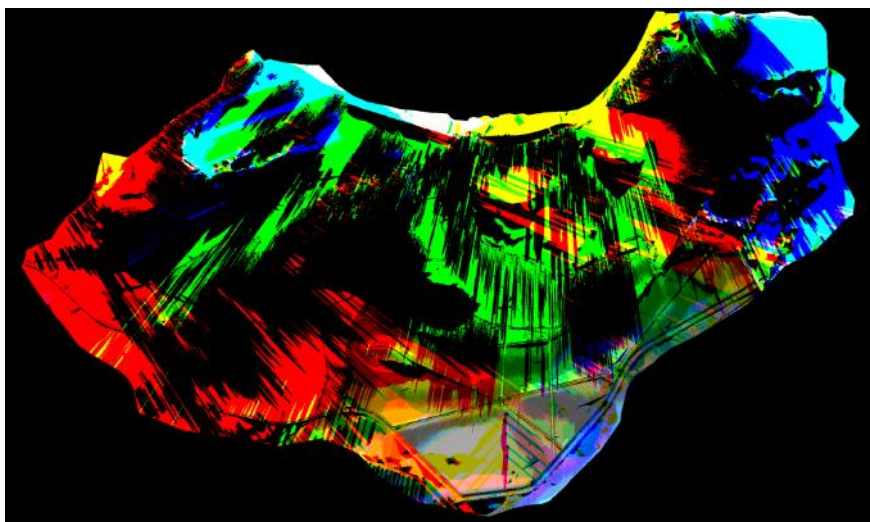


Fig. 15 Mapa widoczności ([53])

3.2. Wykorzystanie wykresów widoczności

Wykorzystanie technologii fotogrametrii, ortofotomap, wykresów widoczności i numerycznych modeli terenu odgrywa kluczową rolę w procesie planowania przestrzennego, zwłaszcza w miastach [54]. Współczesne miasta rozwijają się dynamicznie, a odpowiednie zarządzanie przestrzenią staje się jednym z najważniejszych wyzwań urbanistyki. Tworzenie planów zagospodarowania przestrzennego, które uwzględniają zarówno nowe inwestycje, jak i istniejącą zabudowę oraz krajobraz, wymaga precyzyjnych danych i narzędzi, umożliwiających analizę przestrzenną.

Jednym z kluczowych aspektów planowania przestrzennego jest odpowiednie umiejscowienie nowych budynków mieszkalnych czy obiektów użyteczności publicznej, w sposób, który harmonijnie współgra z otaczającą przestrzenią [55]. Nowe inwestycje nie powinny negatywnie wpływać na istniejącą architekturę ani przysłaniać ważnych elementów otoczenia, takich jak historyczne budynki, zabytki, parki czy inne cenne elementy krajobrazu. W tym kontekście narzędzia do wizualizacji przestrzennej, takie jak ortofotomapy czy modele 3D, odgrywają kluczową rolę. Za ich pomocą można z wyprzedzeniem symulować, jak nowa zabudowa będzie wpływać na otoczenie, zarówno pod kątem estetycznym, jak i funkcjonalnym.

Na przykładzie rozbudowy stadionów sportowych, które coraz częściej stawiają wysokie i masywne konstrukcje, takie jak reflektory oświetlające boiska, można zauważyć wyzwania związane z ich wpływem na otoczenie [56]. Choć reflektory są

istotne dla funkcjonowania obiektów sportowych, często nie bierze się pod uwagę ich wpływu na estetykę i odbiór okolicznych zabytków. Wysokie konstrukcje mogą przysłaniać cenne historyczne budynki, czy też krajobraz, co ma negatywny wpływ na atrakcyjność turystyczną oraz krajobraz kulturowy miasta.

Analiza widoczności powstała na bazie modeli trójwymiarowych może obejmować tworzenie wykresów i symulacji [57], które pokazują w jaki sposób nowopowstałe obiekty wpłyną na widoczność innych elementów przestrzeni [58]. Przykładowo, można wizualizować cień rzucany przez wysokie konstrukcje lub sprawdzić, jak reflektory oświetlające wpływają na widoczność zabytków. W taki sposób można minimalizować konflikty między nowoczesną infrastrukturą a historycznym dziedzictwem miasta, co z kolei zwiększa jego atrakcyjność oraz spójność wizualną.

Wprowadzenie takich analiz i wizualizacji do procesu planowania przestrzennego pozwala nie tylko na lepsze zrozumienie, jak nowe inwestycje wpłyną na miasto, ale także na podejmowanie bardziej świadomych decyzji, które biorą pod uwagę zarówno funkcjonalność, jak i estetykę. Zastosowanie technologii przestrzennych pozwala na tworzenie harmonijnych, estetycznych i funkcjonalnych przestrzeni miejskich, które szanują zarówno nowoczesne potrzeby, jak i dziedzictwo kulturowe miasta [59]. Dzięki temu miasta mogą rozwijać się w sposób zrównoważony, a ich mieszkańcy oraz turyści mogą cieszyć się atrakcyjnym i dobrze zaplanowanym otoczeniem.

3.2.1. Potrzeba planowania przestrzennego

Planowanie przestrzenne odgrywa istotną rolę w kształtowaniu środowiska. Jego celem jest nie tylko dbanie o zagospodarowanie przestrzeni optymalne pod względem ekonomicznym, ale także harmonijne łączenie funkcjonalności z estetyką. Brak spójnego podejścia w tej dziedzinie prowadzi do chaosu urbanistycznego, degradacji walorów krajobrazowych i pogorszenia jakości życia mieszkańców. Nieprzemyślane inwestycje, takie jak wysokie budynki zasłaniające atrakcyjne elementy krajobrazu (Fig. 16), zakłócają harmonię przestrzeni i obniżają doznania estetyczne. W takich przypadkach zastosowanie narzędzi analitycznych, takich jak wykresy widoczności, staje się kluczowe. Pozwalają one na etapie projektu zasymulować, które elementy krajobrazu pozostaną dostępne wizualnie z różnych punktów przestrzeni, a które zostaną przesłonięte przez nową zabudowę.



Fig. 16 Przykład inwestycji wpływającej na percepcję krajobrazu ([60])

Aby skutecznie wspierać architektów krajobrazu, narzędzia informatyczne, z których korzystają powinny być w pełni kompatybilne z środowiskami GIS, które stanowią podstawę pracy w tej dziedzinie. Wyniki analiz powinny operować na układach współrzędnych zgodnych z GIS, co umożliwi ich integrację z innymi danymi przestrzennymi. W miarę rosnącej wielkości dostępnych zbiorów danych kluczowe jest, aby narzędzia te były skalowalne i wydajne, co pozwala na płynne przetwarzanie dużych ilości informacji.

Istotnym aspektem takich narzędzi jest również szybkość generowania wyników. Współczesne procesy decyzyjne często wymagają analiz w czasie rzeczywistym lub w określonych ramach czasowych, w których możliwe jest wykorzystanie wyników w procesie projektowym. Ponadto wykorzystuje się do nich modele przestrzeni nasycone ogromną ilością danych. Dlatego generowanie wykresów widoczności musi odbywać się w sposób efektywny zarówno pod względem szczegółowości jak i akceptowalnego czasu uzyskiwania wyników.

Wykresy widoczności znajdują zastosowanie w projektowaniu urbanistycznym, wspierając m.in. planowanie usytuowania i gabarytów budynków, rozmieszczanie obiektów publicznych czy kształtowanie terenów zielonych. Narzędzia te wspomagają procesy projektowe, w których możliwe jest uwzględnienie zarówno potrzeb użytkowników, optymalne wykorzystanie zasobów przestrzeni i środowiska, wymogów związanych z ochroną krajobrazu, a także estetyką, ale również umożliwiają zachowanie i podkreślenie wyjątkowego charakteru miejsca. Dzięki nim można zachować

równowagę między nowoczesnym rozwojem a ochroną walorów kulturowych i przyrodniczych. W efekcie narzędzia te przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju miast, dbając zarówno o komfort mieszkańców, jak i atrakcyjność przestrzeni dla odwiedzających.

3.2.2. Inne przykłady

Innym równie istotnym aspektem otaczającej przestrzeni są prywatne domy, gdzie bezpieczeństwo ma istotne znaczenie dla komfortu życia mieszkańców. Wiele osób decyduje się na zamontowanie kamer monitorujących otoczenie swojego domu, aby zwiększyć bezpieczeństwo. Jednak, aby te systemy działały efektywnie, kluczowe jest optymalne rozmieszczenie kamer, które zapewni pełne pokrycie terenu i minimalizację martwych punktów. Na grafice Fig. 17 przedstawiono model, na którym kolory oznaczają różne obszary widoczności względem kamery (wykres widoczności). Kolorem czerwonym oznaczono przestrzeń niewidoczną dla kamery, zielonym — przestrzeń widoczną z pozycji początkowej kamery, natomiast kolorem szarym — przestrzeń widoczną przy możliwych obrotach kamery [61].

Dobrze rozplanowane rozmieszczenie kamer, w oparciu o takie analizy, pozwala nie tylko na pełne zabezpieczenie terenu, ale także na efektywne wykorzystanie sprzętu, ograniczając potrzebę instalacji zbędnych urządzeń. Taka analiza może być wsparta technologią, która na podstawie dokładnych danych geograficznych, kątów widoczności kamer i przeszkód w otoczeniu, generuje optymalny plan rozmieszczenia kamer, aby uzyskać maksymalny zakres ochrony.

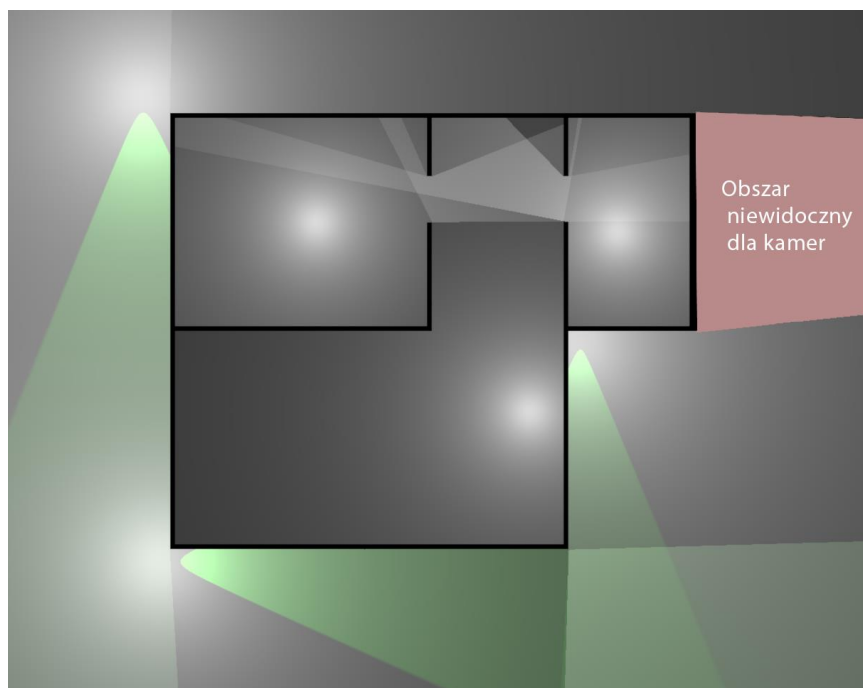


Fig. 17 Wykres widoczności kamer

Idąc dalej, można nawiązać do rozwijającej się dynamicznie branży fotowoltaiki, która jest istotnym elementem współczesnej transformacji energetycznej. Właściwe ustawienie paneli fotowoltaicznych ma kluczowe znaczenie dla ich efektywności w produkcji energii. Panele powinny być skierowane w kierunku południa pod odpowiednim kątem, aby maksymalnie wykorzystać promieniowanie słoneczne.

Jednym z wyzwań przy instalacji paneli jest jednak obecność otaczających elementów, takich jak drzewa, budynki czy inne struktury, które mogą rzucać cień na panele. Nawet niewielkie zacienienie może znacząco obniżyć ich wydajność (Fig. 18). W tym kontekście niezwykle przydatne stają się wykresy oraz mapy widoczności, które pozwalają dokładnie przeanalizować, w jaki sposób te elementy mogą wpływać na ekspozycję paneli na słońce w różnych porach dnia.

Dzięki takiej analizie możliwe jest optymalne rozmieszczenie paneli fotowoltaicznych, aby minimalizować wpływ cieni i zapewnić maksymalną efektywność energetyczną. Narzędzia te pomagają również w aranżacji przestrzeni wokół paneli – np. w decyzji o usunięciu lub przycięciu drzew, bądź ustawieniu paneli w taki sposób, aby unikać zacienienia w najbardziej newralgicznych godzinach słonecznych. Odpowiednie planowanie może znacząco zwiększyć ilość produkowanej energii, co przekłada się na szybszy zwrot z inwestycji i bardziej efektywne wykorzystanie przestrzeni.

Takie podejście jest szczególnie ważne w miastach lub terenach o gęstej zabudowie, gdzie dostęp do pełnej ekspozycji na światło słoneczne może być ograniczony przez otaczające budynki.



Fig. 18 Przykład złego umieszczenia fotowoltaiki [62]

Następnym punktem, w którym można wykorzystać opisywane analizy to weryfikacja, czy do mieszkań lub budynków w ogóle dociera słońce [63]. Nawiązując do przepisów budownictwa każde mieszkanie musi mieć dostęp do światła słonecznego. Dzięki wykresom w łatwy sposób można sprawdzić, czy oraz ile tego światła dociera do mieszkania, co przekłada się na jego atrakcyjność.



Fig. 19 Przykład złego nasłonecznienia [64]

4. BADANIE WIDOCZNOŚCI

4.1. Przegląd metod badania widoczności

Badanie widoczności jest dynamicznie rozwijającym się obszarem analizy przestrzennej, który zyskał na znaczeniu wraz z postępem technologii geodezyjnych, fotogrametrycznych oraz systemów informacji geograficznej (GIS). W miarę jak narzędzia te stają się coraz bardziej zaawansowane, metody wyznaczania widoczności również ewoluują, dostarczając coraz bardziej precyzyjnych i kompleksowych wyników.

Wraz z rozwojem technologii pojawiają się nowe podejścia i narzędzia, które znacząco poszerzają możliwości badania widoczności. Dziś możliwe jest tworzenie szczegółowych analiz przestrzennych, które pozwalają na uwzględnienie zmiennych, takich jak kąt padania promieni słonecznych, położenie obiektów w przestrzeni czy czasowy wpływ warunków atmosferycznych na widoczność. Dalszy rozwój tej dziedziny pozwala na coraz dokładniejsze prognozy i symulacje, co ma kluczowe znaczenie w takich obszarach jak urbanistyka, planowanie infrastruktury drogowej czy projektowanie terenów zielonych.

W tym rozdziale omówione zostały najważniejsze metody wyznaczania widoczności.

4.1.1. Metody manualne

Początkowe metody analizy widoczności były manualne i opierały się na prostych technikach, które miały na celu odwzorowanie terenu w formie makiet lub rysunków. Jedną z pierwszych metod było tworzenie makiet, które reprezentowały obszar geograficzny w zmniejszonej skali. Na takiej makiecie umieszczano punkt świetlny, np. małą żarówkę, w miejscu, które miało symulować punkt obserwacyjny [65] Fig. 20. Światło emitowane z tego punktu oświetlało fragmenty makiety, co pozwalało określić, które obszary były widoczne, a które zasłonięte przez przeszkody, takie jak wzgórza czy budynki. Choć metoda ta była niedokładna, była pierwszym krokiem w analizie widoczności.



Fig. 20 Zakres pola widoczności wyznaczonego przez żarówkę umieszczoną na makiecie obszaru. [65]

Kolejnym krokiem było stosowanie nici do symulowania linii widzenia [66]. Z punktu obserwacyjnego na makiecie rozwijano nici w kierunku różnych punktów terenu, sprawdzając, czy na drodze między nimi a obserwatorem znajdują się przeszkody. Jeśli nić napotykała przeszkodę, oznaczało to, że dany fragment terenu był niewidoczny. Ta technika pozwalała na precyzyjne odwzorowanie linii widoczności, ale wyznaczanie obszarów widocznych było żmudne.

Inną manualną metodą była analiza na podstawie map konturowych [67]. Mapy te przedstawiały ukształtowanie terenu za pomocą linii wysokościowych. Na mapach ręcznie rysowano linie widoczności od punktu obserwacyjnego do różnych punktów, sprawdzając, czy linia nie przecina wyższych linii konturów. Jeśli przecinała, oznaczało to, że dany punkt był zasłonięty. Była to bardziej dokładna metoda, choć wymagała dużej precyzji w rysowaniu i interpretacji danych.

Ręczne rysowanie profili terenu było kolejną metodą, która polegała na tworzeniu przekrojów pionowych przez krajobraz [47]. Profil terenu pozwalał na ocenę widoczności na danym odcinku, wskazując, które fragmenty krajobrazu były zasłonięte. Metoda ta była pracochłonna, ale użyteczna na mniejszych obszarach.

W geodezji stosowano także teodolity [68], urządzenia optyczne do pomiaru kątów poziomych i pionowych. Geodeta, mierząc kąty wznoszenia i opadania w terenie,

mógł określić, które fragmenty krajobrazu były widoczne z danego punktu. Była to jedna z dokładniejszych metod, ale wymagała czasochłonnych pomiarów w terenie.

Linijka Słońca (Fig. 21) [69] [70] to następna tradycyjna metoda wyznaczania pola widoku na zasadzie kąta pionowego. Diagram Linijki Słońca umożliwia odczyt kąta padania promieni słonecznych oraz długości cienia rzucanego przez przeszkody określonej godzinie, co pomaga w projektowaniu budynków z odpowiednim dostępem do światła słonecznego. Diagram ten jest narzędziem wektorowym, ułatwiającym wyznaczenie minimalnych odległości między budynkami oraz analizę usytuowania obiektów względem stron świata. Dzięki temu projektanci mogą łatwo określić, gdzie znajduje się słońce na początku i końcu wymaganego, najczęściej 3-godzinnego, czasu nasłonecznienia. Analizując cień rzucany na dane okno w konkretnych godzinach, projektant może wyznaczyć linie zabudowy i określić optymalną lokalizację budynków, co wspiera zapewnienie odpowiedniego nasłonecznienia w projektowanych mieszkaniach i innych przestrzeniach.

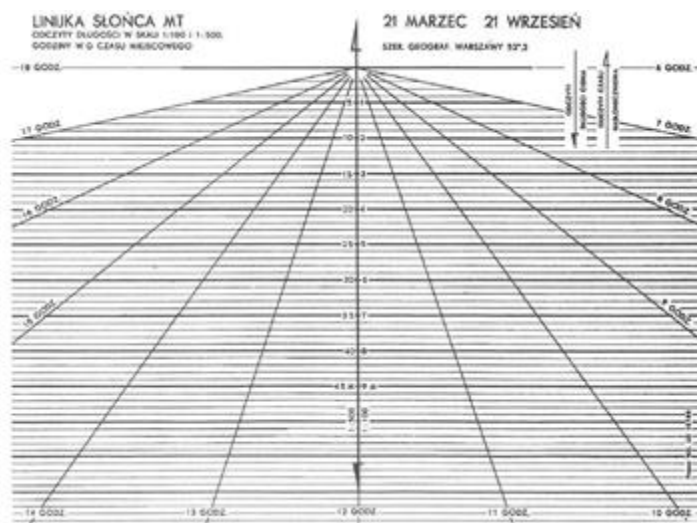


Fig. 21 Linijka Słońca [70]

Mimo swojej prostoty, manualne metody analizy widoczności miały wiele ograniczeń. Ich dokładność zależała od precyzji makiet, map czy pomiarów, a także umiejętności manualnych osoby przeprowadzającej analizę. Wprowadzenie cyfrowych technologii, takich jak systemy GIS czy cyfrowe modele terenu, zrewolucjonizowało analizę widoczności, eliminując wiele problemów związanych z pracą manualną.

4.1.2. Visibility Polygon

Algorytm Visibility Polygon to narzędzie analizy widoczności w przestrzeni dwuwymiarowej, które znajduje szerokie zastosowanie w grafice komputerowej, architekturze oraz systemach nadzoru. Według Luisa Barby [71], wielokąt widoczności jest fundamentalnym pojęciem w geometrii obliczeniowej i jednym z pierwszych problemów badanych w kontekście widoczności na płaszczyźnie. Pierwsze zastosowanie tej metody zostało opisane przez B. Joe i R.B. Simpsona w artykule [72], w którym przedstawili poprawki do algorytmu wyznaczania wielokąta widoczności zaproponowanego przez D.T. Lee [73]. Algorytmy te mają kluczowe znaczenie dla zagadnień związanych z analizą widoczności w przestrzeni dwuwymiarowej i znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak robotyka, GIS oraz projektowanie grafiki komputerowej. Jego głównym celem jest precyzyjne modelowanie obszarów widocznych z określonego punktu w przestrzeni, z uwzględnieniem obecności przeszkód, takich jak ściany czy budynki. W efekcie działania algorytmu powstaje wielokąt widoczności, który obejmuje wszystkie punkty, możliwe do zobaczenia z danego miejsca obserwacji.

Na grafice Fig. 22 po lewej stronie widoczny jest wielokąt P wraz z punktem obserwacyjnym q . Punkty wierzchołkowe oznaczone białymi kółkami reprezentują wierzchołki odbite (*reflex vertices*) względem punktu q , co oznacza, że kąt wewnętrzny przy tych wierzchołkach jest większy niż π . Pozostałe wierzchołki oznaczono na czarno.

Grafika po prawej stronie przedstawia wielokąt widoczności $Vis P(q)$ z punktu obserwacyjnego q . Część zacieniowana na niebiesko to obszar, który jest widoczny z punktu q . Analiza rozpoczyna się od wyznaczenia półprostej z punktu q w kierunku pozytywnej osi X i sprawdzeniu, ile razy przetnie się z krawędziami wielokąta. Jeśli zostanie znaleziona nieparzysta liczba przecięć punkt q znajduje się wewnątrz tego wielokąta. W analizowanej scenie może być wiele wielokątów przesłaniających widoczność, które także winny wziąć udział w operacji. Na przykładowym rysunku znaleziono jedno przecięcie p_0 . Następnie sprawdzeniu podlegają kolejne wierzchołki w określonym porządku (tu CCW). Z punktu q prowadzone są przez nie półproste i sprawdzane są przecięcia z krawędziami wielokąta. Jeśli nie ma więcej przecięć punkt jest brzegowy. Jeśli jest przecięcie, którego odległość do q jest mniejsza niż do analizowanego punktu, to punkt jest w cieniu. Jeśli odległość jest większa, to punkt przecięcia z krawędzią wielokąta wyznacza krawędź cienia. Widać, że wierzchołek p_4 rzuca krawędź cienia, oznaczony jako "Shadow (p_4, P)", czyli od niej zaczyna się obszar

niewidoczny z punktu q . Czerwone punkty oznaczają wierzchołki odbite, które znajdują się na przecięciu promienia z krawędzią wielokąta, pomiędzy obszarami widocznymi i niewidocznymi.

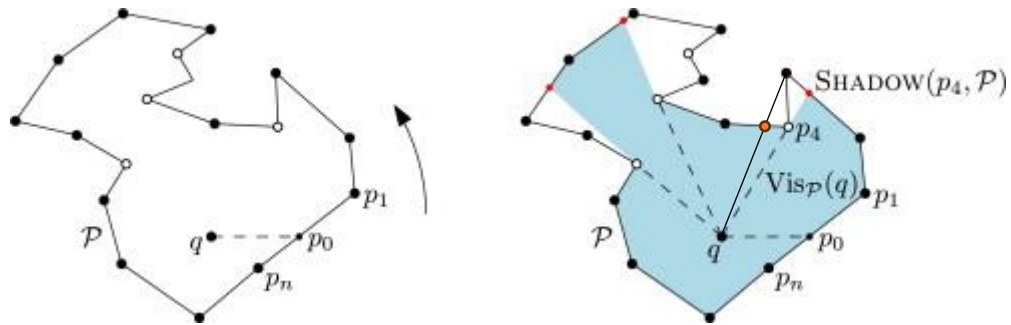


Fig. 22 Po lewej: ogólne ustawienie, wierzchołki odbite względem punktu q są zaznaczone białym punktem (pozostałe wierzchołki są czarne). Po prawej: wielokąt widoczności [74].

Rozszerzone możliwości algorytmu Visibility Polygon mają szczególne znaczenie w projektowaniu przestrzeni publicznych, optymalizacji układów nadzorczych oraz modelowaniu percepcji i kolizji w grach komputerowych. Dzięki precyzyjnemu określeniu granic widoczności, możliwe jest tworzenie przestrzeni z myślą o maksymalnej dostępności wizualnej, co wpływa na funkcjonalność i komfort użytkowania.

4.1.3. Isovist 2D

Jedną z pierwszych koncepcji oceny widoczności była metoda isovist, zaproponowana przez Tandy'ego w roku 1967[48], która stała się istotnym punktem odniesienia w badaniach nad percepcją przestrzeni. W 1979 roku Michael Benedikt [49] rozszerzył tę koncepcję, wprowadzając ją do analiz przestrzennych i przyczyniając się do jej rozwoju w naukach o przestrzeni oraz architekturze. Isovist odnosi się do obszaru widzialnego z wybranego punktu obserwacyjnego, określanego jako *vantage point*, wraz z określeniem lokalizacji tego punktu.

Metoda isovist polega na identyfikacji wszystkich elementów przestrzeni, widocznych z konkretnego punktu. W analizach tej metody zastosowano różne parametry, takie jak powierzchnia, obwód, hermetyczność, skośność czy kolistość, które pomagają zrozumieć charakter i właściwości badanej przestrzeni. Określały one, jak duża

część przestrzeni jest widoczna, głębokość obserwowanej przestrzeni oraz jej kształt. Dzięki tym parametrom możliwe jest stworzenie tzw. pól isovist (ang. *isovist fields*), które mapują właściwości przestrzeni.

Na podstawie pól isovist powstały wykresy widoczności (*visibility graphs*), które stanowią jedno z najważniejszych narzędzi w analizie struktury przestrzeni. Wykresy widoczności reprezentują analizowaną przestrzeń w wektorowym formacie danych, umożliwiając obliczenie widoczności pomiędzy punktami w całym środowisku. W praktyce oznacza to tworzenie sieci powiązań między punktami obserwacyjnymi w formie grafu, gdzie krawędzie grafu reprezentują linie widoczności między nimi.

Takie podejście umożliwia dogłębną analizę wzorców widoczności, pozwalając zrozumieć, jak przestrzeń jest postrzegana i doświadczana przez użytkowników. Wykresy widoczności okazały się niezwykle przydatne w analizie architektonicznej i urbanistycznej, szczególnie w kontekście planowania przestrzeni, projektowania wnętrz, oceny bezpieczeństwa czy przewidywania ruchu użytkowników. Analiza tych grafów pozwala na tworzenie bardziej funkcjonalnej i intuicyjnej przestrzeni, opartej na rzeczywistych wzorcach widoczności i relacji między punktami obserwacyjnymi.

4.1.4. Isovist 3D

Technologiczny postęp w analizach przestrzennych ujawnił ograniczenia tradycyjnego algorytmu isovist, który pierwotnie działał w dwóch wymiarach, nie biorąc pod uwagę wysokości obiektów. W efekcie isovist nie oddawał w pełni złożoności przestrzeni, ponieważ obiekty o różnych wysokościach były rozpatrywane jedynie na płaszczyźnie rzutu, co prowadziło do błędnych wniosków na temat widoczności.

Odpowiedzią na te braki była modyfikacja algorytmu do zastosowań trójwymiarowych, co pozwoliło na precyzyjniejsze analizy m.in. przestrzeni miejskiej [75]. Dostosowano isovist do potrzeb trójwymiarowych analiz, bazując na ideach zaproponowanych przez Lyncha (1960). Podejście oparło się na indeksie otwartości przestrzeni (*Spatial Openness, SO*), definiowanym jako objętość widocznej części sfery otaczającej dany punkt [76] oraz na trójwymiarowej linii widoczności (*line of sight, LOS*), której punkty mają stałą wysokość horyzontalną, która jest podawana kątem od płaszczyzny horyzontalne [77]

Na bazie tych założeń stworzono trójwymiarową mapę widoczności, generując linie widoczności dla różnych kątów pionowych w układzie horyzontalnym. Następnie, wielokrotne analizy widoczności dla różnych punktów obserwacyjnych pozwoliły zbudować macierz iso-vist-matrix, która określa, z ilu miejsc dany punkt jest widoczny. To umożliwiło wyznaczenie widoczności każdego punktu w przestrzeni.

Grafika Fig. 23 przedstawia wykres widoczności w układzie horyzontalnym z oznaczeniem obszarów widocznych i niewidocznych, opartą na analizie linii w układzie horyzontalnym przy założonych różnych kątach pionowych[75]. Na grafice Fig. 23 zaznaczono kąty $L1$, $L2$, $L3$ i $L4$, które wyznaczają kierunki wysyłanych linii w układzie horyzontalnym, pozwalających określić widoczność poszczególnych elementów otoczenia. Wysokości $H1$, $H2$ i $H3$ reprezentują różne budynki lub obiekty w przestrzeni, przy czym $H3$ jest najwyższą z uwzględnionych wartości. Wartość H_{min} określa minimalny przyrost wysokości, który pozwala obiektowi stać się widocznym z danej perspektywy. Punkty wskazują punkty przecięcia linii widoczności z obiektami, pomagając określić, które elementy są widoczne przy różnych kątach obserwacji.

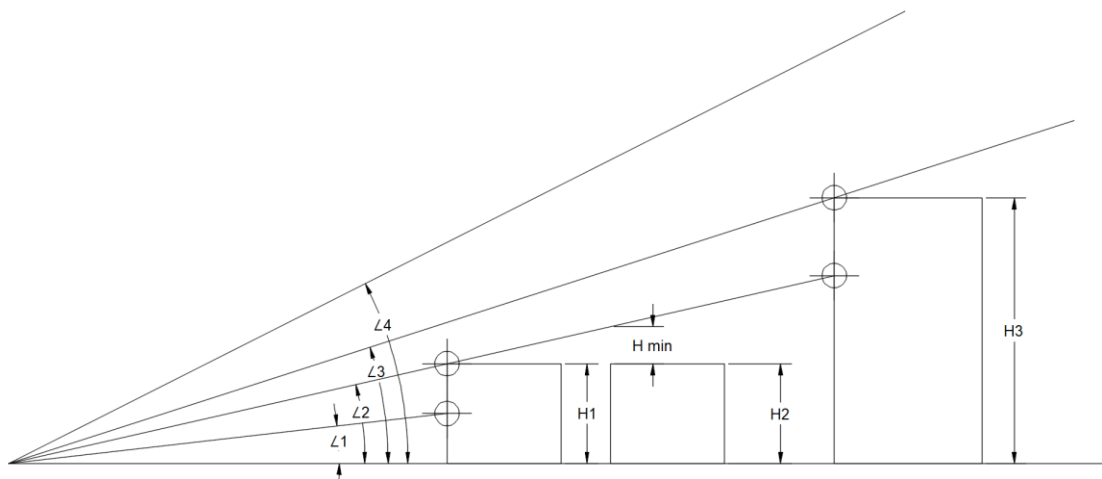


Fig. 23 Obliczanie isovist 3D na NMT w odniesieniu do przestrzeni widocznych i ukrytych.

4.1.5. Wykres widoczności na bazie ray tracingu i cyfrowego modelu terenu

Metoda bazująca na modelu cyfrowym terenu i analizie przestrzeni, do której dociera światło, to zaawansowana technika wykorzystywana do generowania wykresów widoczności (Fig. 14) [78], [79], [80], [81]. W oparciu o cyfrowe modele terenu NMT,

NMPT lub chmury punktów oraz algorytm ray tracingu [82], możliwe jest dokładne śledzenie promieni światła, co pozwala na precyzyjne określenie obszarów oświetlonych i tych, które znajdują się w cieniu. Ray tracing, czyli technika śledzenia promieni, jest szeroko stosowana w grafice komputerowej do tworzenia fotorealistycznych obrazów, ale ma także zastosowanie w analizie widoczności przestrzennej, gdzie symuluje ścieżki promieni świetlnych i bada ich interakcje z przeszkodami, takimi jak budynki czy wzniesienia terenu.

Głównym założeniem tej metody jest to, że promienie światła emitowane z określonego punktu, np. źródła światła lub obserwatora, rozchodzą się we wszystkich kierunkach. Algorytm śledzi, jak te promienie oddziałują z otoczeniem, identyfikując, gdzie trafiają na przeszkody, a gdzie mogą przemieszczać się swobodnie. Obszary, do których promienie docierają bez przeszkód, są oznaczane jako widoczne i oświetlone, natomiast tam, gdzie promienie są blokowane, powstają cienie, a te obszary są oznaczane jako niewidoczne. W praktyce metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w planowaniu przestrzennym, architekturze oraz symulacjach w grafice komputerowej.

Cyfrowe modele terenu i pokrycia są kluczowym elementem tej techniki. Umożliwiają one precyzyjne odwzorowanie ukształtowania terenu, co pozwala na dokładną analizę wpływu wzniesień, dolin, roślinności czy budynków na widoczność w danym obszarze. Dzięki wykorzystaniu tych danych możliwe jest realistyczne symulowanie zachowania światła, co pozwala na tworzenie wykresów widoczności z dowolnego punktu w przestrzeni. Modele cyfrowe terenu są tworzone na podstawie szczegółowych danych geodezyjnych, co sprawia, że analiza widoczności staje się bardzo dokładna.

Ray tracing, w kontekście analizy widoczności, działa na zasadzie śledzenia promieni świetlnych od punktu obserwatora lub źródła światła do otaczających go obiektów. Promienie te są śledzone, aż natrafią na przeszkody, takie jak ściany, drzewa, wzniesienia terenu czy inne struktury. W momencie, gdy promień napotyka przeszkodę, zostaje zatrzymany, co oznacza, że dalsza część przestrzeni za tą przeszkodą nie jest widoczna. W ten sposób algorytm buduje dokładny wykres widoczności, wskazując, które fragmenty przestrzeni są dostępne wzrokowo z punktu obserwacji, a które są zasłonięte.

4.1.6. Algorytm XDRAW

Algorytm XDraw (Zhu et al., 2019) wyznaczania wykresów widoczności oparty na siatce NMPT wykorzystuje metodę analizującą piksele mapy, zaczynając od punktu centralnego, z którego promieniście rozszerza się obszar analizy. Siatka pikseli reprezentuje teren, gdzie każdy piksel odpowiada określonej wysokości w modelu cyfrowym terenu.

Algorytm działa poprzez wyznaczanie promieni biegnących od punktu centralnego do kolejnych pikseli na mapie. Dla każdego piksela sprawdzane jest, czy promień ten napotyka na przeszkodę, czyli inny, wyższy punkt na swojej drodze. Jeśli nie ma wyższej przeszkody, piksel uznawany jest za widoczny z punktu centralnego. W przeciwnym przypadku promień zostaje zablokowany, co oznacza, że ten fragment terenu jest zasłonięty. Algorytm porównuje sąsiednie piksele na zasadzie 8-sąsiedztwa z wyłączeniem pikseli analizowanych w poprzednim kroku.

W efekcie algorytm tworzy wykres widoczności, gdzie każdy piksel jest oznaczony jako widoczny lub niewidoczny w zależności od tego, czy linia wzroku od punktu centralnego do tego miejsca napotyka przeszkodę. Proces ten uwzględnia zmieniającą się topografię terenu, co pozwala na precyzyjną analizę widoczności w odniesieniu do ukształtowania powierzchni.

Aby przedstawić dokładne działanie algorytmu należy wprowadzić pojęcie linii widzenia (LOS - (line-of-sight)) (Fig. 24). LOS definiuje się jako linię łączącą dwa punkty, punkt obserwacyjny oraz punkt docelowy. Jeśli LOS przecina teren, to punkt docelowy jest niewidoczny. Jeśli nie, punkt jest widoczny. Równoważnym sposobem określenia widoczności jest obliczenie przewidywanej minimalnej widocznej wysokości w punkcie docelowym. Jeśli minimalna widoczna wysokość jest mniejsza niż rzeczywista wysokość, punkt docelowy jest widoczny. W przeciwnym razie jest niewidoczny. Procedurę tę nazywa się bezpośrednią metodą LOS.

Zaznaczony punkt v (Fig. 24) określa punkt obserwacyjny, który znajduje się powyżej terenu. Punkty t_1 oraz t_2 to punkty znajdujące się na terenie. Metoda LOS określa widoczność tych punktów poprzez porównanie ich przewidywanej minimalnej wysokości widocznej z faktyczną wysokością. Wysokość punktu t_1 jest większa niż jego przewidywana minimalna wysokość widoczna (zaznaczona czarną kropką), dlatego punkt t_1 jest widoczny. Wysokość punktu t_2 jest mniejsza niż jego przewidywana

minimalna wysokość widoczna, co oznacza, że punkt t_2 jest niewidoczny. Wysokość LOS H_2 jest równa minimalnej wysokości widzenia dla punktu t_2 a wysokość H_1 określa minimalną wysokość widzenia dla punktu t_1 .

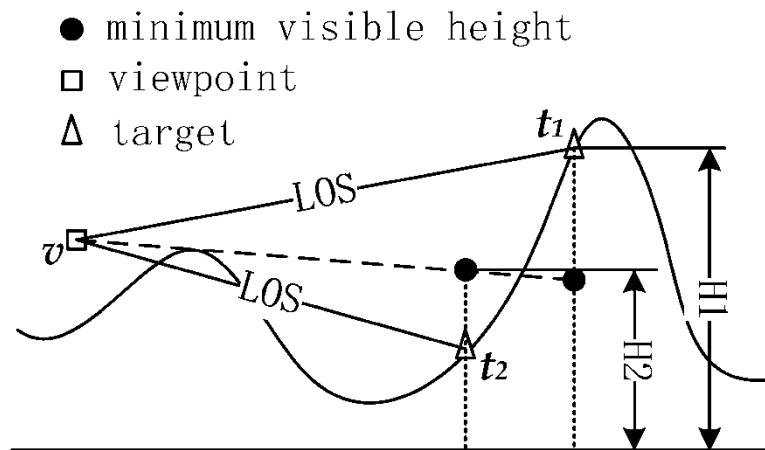


Fig. 24 Wysokość linii widzenia (LOS)[83]

Algorytm XDraw (Fig. 25) oblicza wykres widoczności w trzech etapach:

1. Na początku inicjalizowana jest pomocnicza siatka, która rejestruje wysokość linii widzenia (LOS). Zakłada się, że osiem sąsiadujących punktów wokół punktu obserwacyjnego jest widocznych.
2. Następnie, dla celów w ośmiu kierunkach (2 pionowych, 2 poziomych i 4 ukośnych), oblicza się widoczność przy użyciu bezpośredniej metody linii widzenia (LOS).
3. Na końcu, dla celów w 8-sąsiedztwie analizuje się widoczność cyklicznie i koncentrycznie przechodząc od punktu obserwacyjnego do granicy analizowanego obszaru. Każdy punkt opiera się na dwóch najbliższych punktach siatki z poprzedniego cyklu, aby obliczyć widoczność i wysokość LOS. Te dwa punkty nazywane są punktami referencyjnymi.

Dzięki procesowi opisanemu w punktach 1-3 zostały odfiltrowane punkty widoczne od niewidocznych. Przefiltrowane punkty tworzą reprezentację obszaru widoczności, który jest końcowym wynikiem analizy widoczności.

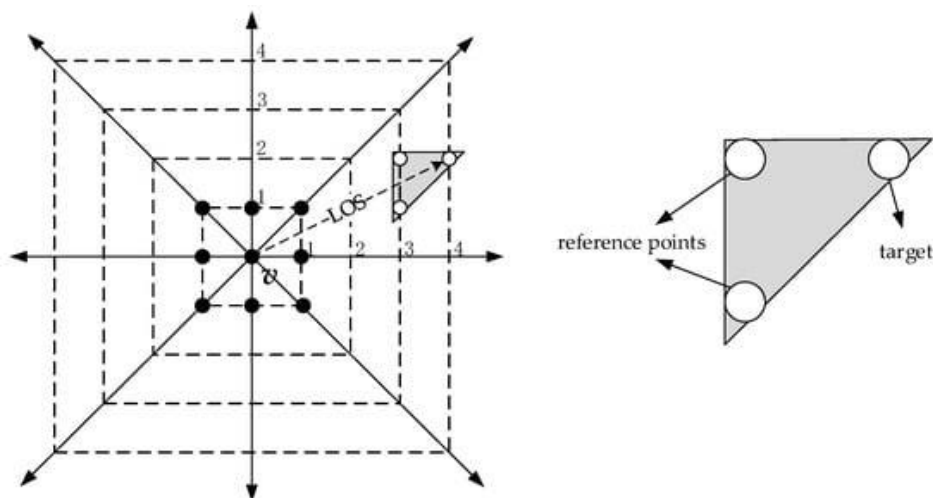


Fig. 25 XDraw [83]

4.1.8. QLA 360

Metoda QLA 360 (Quantitative Landscape Assessment) [84] to ilościowa technika służąca do oceny wpływu planowanych inwestycji na krajobraz, wykorzystująca zaawansowane narzędzia GIS, trójwymiarowe modele wizualne oraz cyfrowe bazy wysokościowe. W jej ramach analizuje się dane przestrzenne, takie jak chmura punktów, zasoby bazy BDOT10k (Baza Danych Obiektów Topograficznych) i panoramiczne obrazy 360°, aby uzyskać dokładny obraz terenu. Podstawowym celem tej metody jest stworzenie trójwymiarowego modelu terenu wraz z pokryciem (3D NMPT), który szczegółowo odwzorowuje aktualne ukształtowanie terenu. Dzięki umieszczeniu wirtualnego obserwatora w modelu możliwa jest ocena widoku z perspektywy ludzkiego oka, zarówno przed, jak i po realizacji projektu. Metoda ta pozwala na dokładną ocenę zmian w krajobrazie oraz wpływu inwestycji na percepcję przestrzeni.

4.2. Przegląd funkcji do tworzenia wykresów widoczności w wybranych programach

4.2.1. QGIS

Jedną z efektywnych metod tworzenia wykresów widoczności jest wykorzystanie oprogramowania QGIS z zainstalowaną wtyczką Viewshed Analysis [85]. Metoda ta

znacząco upraszcza proces analizy widoczności, eliminując konieczność tworzenia złożonej siatki TIN (Triangulated Irregular Network) co w tradycyjnych podejściach wymaga sporych nakładów obliczeniowych. W przypadku tej metody analiza opiera się na danych rastrowych pochodzących z NMPT, gdzie każdy piksel odpowiada konkretnej wysokości terenu.

Metoda rozpoczyna się od określenia punktu obserwacji, a następnie analizuje linie widoczności, tworząc binarny wykres widoczności, który wyraźnie wskazuje obszary widoczne i niewidoczne z danego punktu. Wygenerowany w ten sposób wykres umożliwia precyzyjne określenie, które elementy terenu są widoczne, a które pozostają poza zasięgiem widoczności. Ta metoda jest szczególnie przydatna dla specjalistów zajmujących się analizą danych geodezyjnych, planowaniem przestrzennym czy projektowaniem krajobrazu, korzystających z szerokiego zakresu narzędzi oferowanych przez QGIS, ponieważ pozwala na szybkie i efektywne tworzenie wykresów widoczności, uzupełniających zasób danych przestrzennych określonego projektu czy opracowania.

4.2.2. Ray tracing 3DsMax

Jednym z bardziej popularnych programów wykorzystywanych w grafice komputerowej jest 3DsMax. Posiada wbudowaną funkcjonalność, która umożliwia wykorzystanie metody generowania wykresu widoczności na bazie ray tracingu. Metoda ta polega na zaimportowaniu powierzchni terenu, która generowana jest na podstawie NMPT lub siatki TIN. Powierzchnia jest tworzona za pomocą algorytmu Delaunay'a, który łączy punkty chmury w trójkąty, tworząc trójwymiarowy model terenu. Po utworzeniu powierzchni wyznacza się punkt obserwacji, z którego generowany jest wykres widoczności. Cała scena jest następnie renderowana w widoku ortogonalnym, co pozwala na utworzenie dwuwymiarowego wykresu widoczności, gdzie odcienie szarości reprezentują miejsca widoczne, a czarne – niewidoczne. Aby uzyskać jednoznaczny wykres, należy przeprowadzić operację binaryzacji z progiem 1. Wówczas obszary widoczne zostaną zaznaczone na biało, a niewidoczne na czarno

4.2.3. AutoCAD Civil 3D

AutoCAD Civil 3D, kolejne oprogramowanie z rodziny firmy Autodesk, jest dedykowane między innymi do projektowania infrastruktury technicznej i drogowej. Wyposażono je w zestaw funkcji umożliwiających modelowanie terenu oraz

przeprowadzanie różnorodnych analiz na jego bazie. Dodatkowo, program zawiera wbudowane narzędzie do wyznaczania widoczności wzdłuż modelowanego korytarza lub na określonym obszarze. Niestety, wyniki uzyskiwane za pomocą tego narzędzia charakteryzują się niską jakością i dokładnością, co sprawia, że nie nadają się do zaawansowanych ekspertyz. W efekcie, jego zastosowanie ogranicza się głównie do wstępnych analiz projektowych, gdzie precyzja nie odgrywa istotnej roli.

5. WYBRANA METODA TWORZENIA WYKRESU WIDOCZNOŚCI NA BAZIE RAY TRACINGU I CYFROWEGO MODELU POWIERZCHNI I POKRYCIA TERENU.

Tworzenie wykresów widoczności to wieloetapowy proces, który wymaga uwzględnienia wielu zmiennych i odpowiedniej sekwencji działań. Każdy z kroków tego procesu jest starannie zdefiniowany i charakteryzowany, aby zapewnić jak największą precyzję wyników. Wymaga to dokładnego opracowania danych przestrzennych, wyboru odpowiednich algorytmów oraz ich poprawnej implementacji, co pozwala na uzyskanie dokładnych modeli widoczności z różnych punktów obserwacji.

5.1. Wybrana metoda badania widoczności

W prezentowanej pracy wykorzystano metodę opartą na cyfrowym modelu powierzchni i pokrycia terenu oraz algorytmie śledzenia promieni. Metoda ta bazuje na wykorzystaniu powierzchni TIN, która w najdokładniejszy sposób odwzorowuje ukształtowanie przestrzeni, umożliwiając reprezentację skomplikowanych kształtów z dokładnością, z jaką zostały zdefiniowane lub pomierzone. Dzięki temu pozwala na pełne wykorzystanie danych z chmury punktów z maksymalną dokładnością, co jest istotne w kontekście analizy złożonych powierzchni, będącej jednym z głównych tematów pracy. Do takiego modelu przestrzeni można wprowadzać przekształcenia, projektowane obiekty, wariantowe rozwiązania projektowe. Ich reprezentacje powierzchniowe stanowią tę samą strukturę danych.

Ray tracing jest w stanie dokładnie śledzić promienie sprawdzając widoczność obiektów, nawet w przypadku bardzo złożonych powierzchni, co zapewnia wysoką jakość i precyzję wyników. Dodatkową zaletą algorytmu ray tracingu jest jego działanie w oparciu o rozdzielczość obrazu. Oznacza to, że precyzję wyznaczania widoczności można regulować w zależności od ustawień rozdzielczości renderingu. Dzięki temu, w zależności od potrzeb projektu, rozdzielczość renderowania może być odpowiednio dostosowana, aby uzyskać wyższą precyzję na wykresach, na których jest to wymagane. Rozdzielczość renderowania określa również wymagania względem jednostek

obliczeniowych. Wymagania C dla P pikseli w obrazie i N obiektów w scenie są proporcjonalne do:

$$C = P * N \quad (5.1.)$$

gdzie:

- P to liczba pikseli w renderowanym obrazie,
- N to liczba obiektów (np. trójkątów w siatce) w scenie.

Zatem zwiększenie rozdzielczości renderowania prowadzi do zwiększenia liczby obliczeń niezbędnych do wygenerowania finalnego obrazu, co bezpośrednio wpływa na czas przetwarzania oraz obciążenie jednostek obliczeniowych. W zależności od dostępnych zasobów obliczeniowych, rozdzielczość może być dostosowywana w celu osiągnięcia kompromisu między jakością a wydajnością obliczeniową.

Ray tracing wyróżnia się także dużymi możliwościami zrównoleglenia obliczeń, co czyni go optymalnym rozwiązaniem w kontekście przyszłych zastosowań, zwłaszcza na dużą skalę. Ray tracing dobrze radzi sobie z nieregularnymi kształtami terenu i nie wprowadza uproszczeń, które mogłyby prowadzić do utraty precyzji.

Wybrany algorytm renderingu nie opiera się na symulacji rzeczywistych zachowań światła zgodnych z zasadami optyki fizycznej, ponieważ nie uwzględnia efektów takich jak wygaszanie natężenia wraz z odległością. Główna zasada tej techniki polega na śledzeniu promieni od obserwatora (zazwyczaj kamery) w kierunku obiektów w scenie, a nie odwrotnie, jak mogłoby się wydawać intuicyjnie. Kluczowym elementem tego procesu jest płaszczyzna rzutowania, która jest teoretyczną powierzchnią, na którą rzutowany jest obraz trójwymiarowej sceny w celu uzyskania dwuwymiarowego obrazu. Płaszczyzna jest zlokalizowana pomiędzy kamerą a sceną.

W ray tracingu (Fig. 26) proces renderowania rozpoczyna się od wyznaczenia promienia pierwotnego opisanego przez równania parametryczne prostej, która jest prowadzona od środka rzutu przez dany piksel znajdujący się na płaszczyźnie rzutowania do wszystkich obiektów na scenie w celu znalezienia tego, z którym promień przetnie się jako pierwszy. Należy zaznaczyć, że obiektami w scenie są między innymi wszystkie trójkąty siatki co w przypadku zaawansowanych modeli jest bardzo dużą liczbą.

Do obliczenia przecięć należy wykorzystać równania parametryczne prostej:

$$\begin{aligned}
x &= x_0 + t(x_1 - x_0), & y &= y_0 + t(y_1 - y_0), & z &= z_0 + t(z_1 - z_0), \\
\Delta x &= x_1 - x_0, & \Delta y &= y_1 - y_0, & \Delta z &= z_1 - z_0, \\
x &= x_0 + t \Delta x & y &= y_0 + t \Delta y & z &= z_0 + t \Delta z
\end{aligned}
\tag{5.2.}$$

Gdzie:

x_0, y_0, z_0 – współrzędne środka rzutu P_0 ,

x_1, y_1, z_1 – współrzędne obliczanego piksela na rzutni P_1 ,

$t < 0$ dla punktów przed P_0 , czyli z tyłu, za środkiem rzutu,

$0 < t < 1$ dla punktów pomiędzy P_0 a P_1 ,

$t > 1$ dla punktów w głębi sceny, za rzutnią.

Dla każdego elementu siatki można określić powierzchnię wzorem.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{5.3.}$$

Po podstawieniu danych z równań parametrycznych prostej, wartość t czyli odległość przecięcia prostej z obiektem określamy wzorem:

$$t = \frac{(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{(A\Delta x + B\Delta y + C\Delta z)} \tag{5.4.}$$

Obiekt, którego t jest najmniejsze i dodatnie jest obiektem widocznym.

W kolejnym kroku sprawdzany jest promień wtórny pomiędzy źródłem światła a badanym obiektem. Źródło światła symuluje obserwatora, dla którego generowany jest wykres widoczności. Jeśli pomiędzy tymi strukturami nie występuje żaden inny element sceny, oznacza to, że dany obiekt jest oświetlony i tym samym widoczny z przez obserwatora.

Jasnożółte promienie zaznaczone na ilustracji Fig. 26 symbolizują promienie, które docierają ze środka rzutu do powierzchni obiektu przez płaszczyznę rzutowania. Również ich promień wtórny pomiędzy źródłem światła a badanym obiektem, który nie jest przecięty przez żadne inny obiekt. Promienie te niosą informacje o kolorze, teksturze i właściwościach materiału, z którego składa się powierzchnia i na ich podstawie jest określany kolor piksela.

Z kolei ciemnożółte promienie reprezentują promienie pierwotne, dla których promień wtórny został zablokowany przez obiekty w scenie, przez co jego trajektoria została przerwana i nie dociera do obiektu, stając się niewidocznym. Oznacza to, że dany obiekt nie jest oświetlony w sposób bezpośredni, ponieważ jego powierzchnia nie otrzymuje światła z określonego źródła w wyniku zasłony przez inne obiekty.

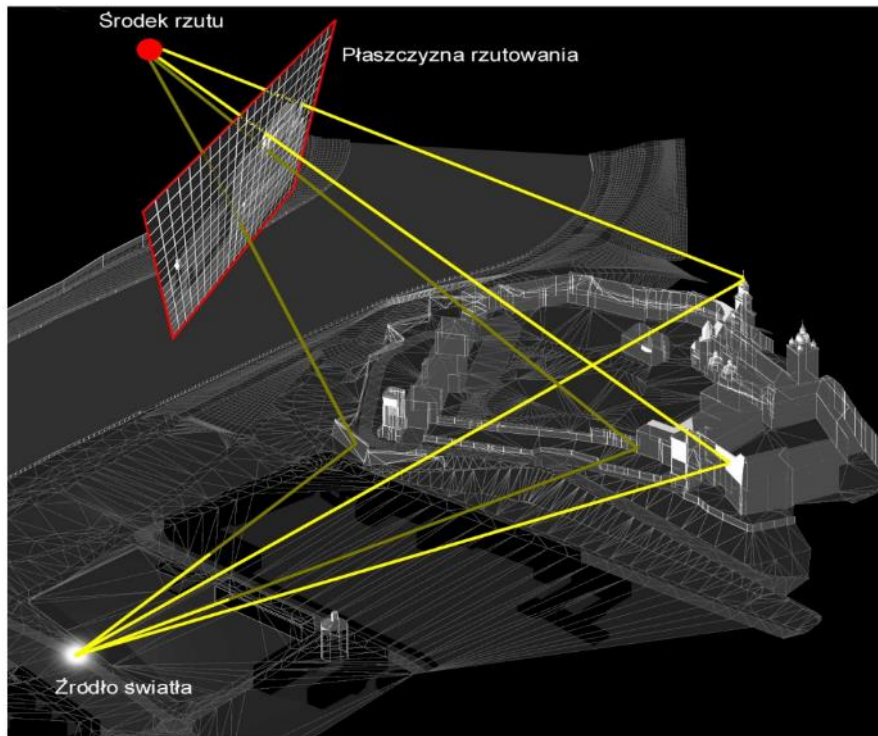


Fig. 26 Schemat algorytmu ray tracing [47]

Aby określić natężenie oświetlenia powierzchni badanego obiektu można posłużyć się wzorem oświetlenia algorytmie Appela[86]:

$$I = S(\cos(L))/D^2 \quad (5.5.)$$

Gdzie:

- I to natężenie światła odbitego w punkcie na powierzchni.
- S to intensywność źródła światła.
- L to kąt między normalną do powierzchni a kierunkiem padania światła.
- D to odległość między źródłem światła a oświetlanym punktem na powierzchni.

Ten wzór zakłada, że intensywność oświetlenia w danym punkcie maleje wraz z kwadratem odległości od źródła światła D^2 co odzwierciedla naturalne rozpraszanie

światła. Wartość $\cos(L)$ uwzględnia, jak powierzchnia jest ustawiona względem źródła światła, czyli jak dużo światła pada na daną powierzchnię w zależności od kąta padania.

Dla uproszczenia przy wykorzystaniu ray tracingu do wyznaczania wykresów widoczności można przedstawić ten wzór jako

$$I = S \quad (5.6)$$

Wynika to z tego, iż w badanym przypadku nie jest istotna ekspozycja powierzchni na światła, ponieważ ta powierzchnia będzie zawsze widoczna, chyba że będzie odwrócona lub zasłonięta. Dodatkowo przyjęto, że promienie modelujące widoczność rozchodzą się z niezmienną względem odległości intensywnością we wszystkich kierunkach przez co odległość od źródła również może być pominięta.

W analizie widoczności kluczową rolę odgrywa kierunek ustawienia płaszczyzny rzutowania, szczególnie w kontekście wykresów widoczności określających widoczny zakres. Aby wykres był miarodajny i dokładnie odwzorowywał obszar widoczny z określonego punktu, płaszczyzna rzutowania musi być rzucie ortogonalnym z góry do analizowanej powierzchni (Fig. 27). Tylko przy takim ustawieniu można precyzyjnie określić granice widoczności i prawidłowo przedstawić zasięg widoku lub zasięg cieni.

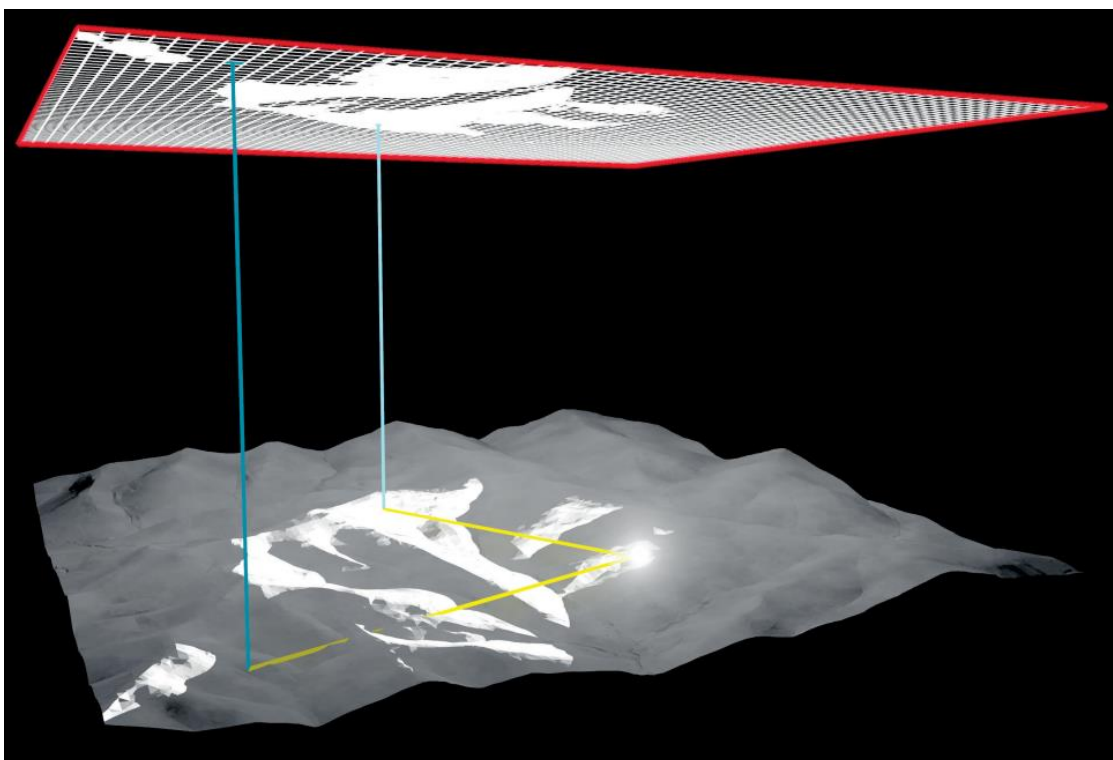


Fig. 27 Algorytm śledzenia promienia w rzutowaniu ortogonalnym [47]

Algorytm ray tracingu jest bardzo zaawansowany i może dodatkowo uwzględniać informacje o odbiciu lub rozproszeniu światła. W przypadku tworzenia wykresów widoczności pomija się te elementy, ponieważ mogą prowadzić do zniekształceń w wynikach analizy. Głównym problemem wynikającym z uwzględnienia światła odbitego i rozproszonego jest to, że mogą one docierać do obszarów, które w rzeczywistości nie są bezpośrednio widoczne dla obserwatora. Na przykład światło odbite od powierzchni może oświetlić miejsca zasłonięte z perspektywy obserwatora przez przeszkody, takie jak budynki czy drzewa. To zjawisko może prowadzić do błędnych wyników w analizie widoczności, ponieważ obszary, które wydają się oświetlone, mogą być w rzeczywistości niewidoczne dla ludzkiego oka.

5.2. Proces tworzenia wykresu widoczności - metoda

Pierwszym krokiem w procesie tworzenia wykresu widoczności wybraną przez autora metodą jest określenie przestrzeni, na której będzie przeprowadzana analiza, oraz zebranie odpowiednich danych, które posłużą jako podstawa do dalszych obliczeń. Kluczowe na tym etapie jest precyzyjne zdefiniowanie obszaru, w tym ustalenie jego granic oraz punktów obserwacyjnych. Może to być teren miejski, krajobraz naturalny lub przestrzeń wokół konkretnego obiektu, takiego jak budynek. Po wyborze obszaru należy przeprowadzić proces filtracji, który usunie niepotrzebne szумы z chmury oraz ewentualnie elementy niepożądane. Na podstawie przygotowanych danych należy stworzyć powierzchnię TIN.



Fig. 28 Chmura punktów

Wyróżnia się dwa typy powierzchni: powierzchnie objętościowe oraz powierzchnie siatkowe [87]. Powierzchnie objętościowe są istotnym elementem w procesie obliczeń prac ziemnych, szczególnie w kontekście budownictwa. Ich głównym celem jest określenie objętości danego terenu, co pozwala na dokładne oszacowanie ilości materiału, który musi zostać usunięty lub dodany w ramach prac ziemnych, takich jak wykopy czy nasypy. Dla obliczeń tego rodzaju oraz innych związanych z ukształtowaniem terenu kluczowe jest precyzyjne modelowanie powierzchni, co pozwala na stworzenie trójwymiarowej reprezentacji terenu. Z kolei powierzchnie siatkowe służą przede wszystkim do analizy ukształtowania terenu. Pozwalają na analizę wysokości terenu, nachyleń powierzchni oraz ekspozycji, co jest przydatne w planowaniu przestrzennym, inżynierii środowiskowej, projektowaniu infrastruktury czy w hydrotechnice. Powierzchnie siatkowe umożliwiają także badanie zjawisk takich jak erozja, przepływ wody czy stabilność zboczy, co ma bezpośrednie przełożenie na decyzje projektowe i zarządzanie środowiskiem.

W procesie tworzenia wykresów widoczności kluczowym elementem są powierzchnie siatkowe, które umożliwiają reprezentację ukształtowania terenu oraz obiektów na jego powierzchni. Powierzchnie siatkowe są podstawą dla algorytmów generujących wykresy widoczności, ponieważ pozwalają na efektywne odwzorowanie

różnic wysokości, które wpływają na wzajemną widoczność punktów w analizowanej przestrzeni. Można wyróżnić dwa główne typy: siatki bazujące na trójkątach TIN (Fig. 29) oraz siatki GRID. Siatka TIN charakteryzuje się większą dokładnością ponieważ do jej stworzenia wykorzystuje najmniejsze możliwe elementy siatki, którymi są trójkąty, co pozwala na bardziej szczegółowe odwzorowanie terenu. Natomiast siatka GRID (Fig. 30) opiera się na regularnych, kwadratowych komórkach o tej samej wielkości. Dzięki jednolitej strukturze siatka GRID jest łatwiejsza do przeprowadzania na niej analiz, ale charakteryzuje się mniejszą dokładnością. Z tego względu siatka TIN jest preferowana w analizach, takich jak tworzenie wykresów widoczności, gdzie precyzja ma kluczowe znaczenie.

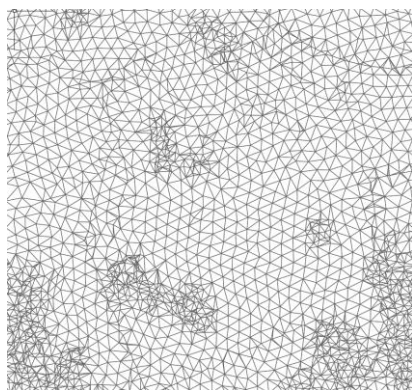


Fig. 29 Siatka TIN

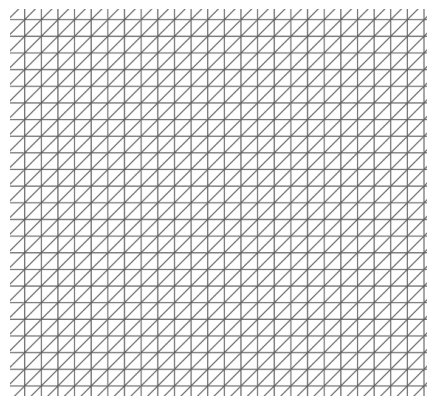


Fig. 30 Siatka GRID

Trójkąty w siatce TIN są generowane poprzez łączenie punktów w optymalny sposób za pomocą algorytmu Delaunay'a [88]. Triangulacja Delaunay'a, nazywana również triangulacją Delone, jest sposobem podziału przestrzeni R^n na ograniczoną liczbę n-sympleksów (w przypadku przestrzeni dwuwymiarowej są to trójkąty). Jest to struktura, w której sympleksy nie nakładają się na siebie ani się nie przecinają. Oznacza to, że każda para sympleksów dzieli między sobą wyłącznie wierzchołki, krawędzie, lub nie mają żadnych wspólnych elementów. Dodatkowo, istotnym warunkiem jest, aby przestrzeń zakreślona przez n-wymiarową hipersferę, opisaną na jednym z tych sympleksów, nie zawierała wierzchołków innych sympleksów poza tymi, które znajdują się na powierzchni hipersfery tak jak to zostało zaprezentowane na grafice Fig. 31.

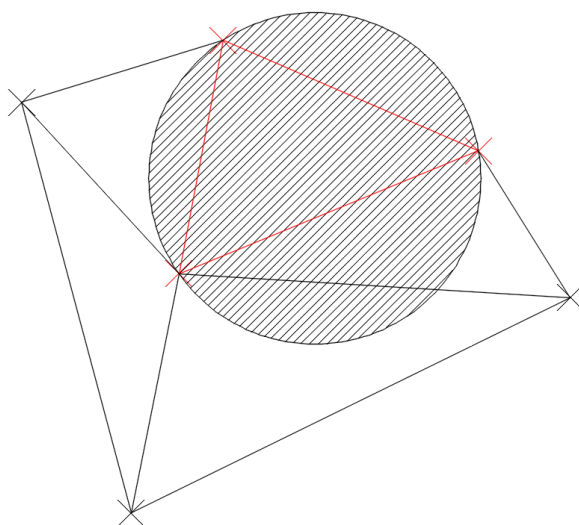


Fig. 31 Dwuwymiarowa hipersfera opisana na trójkącie.

Algorytm zapewnia, że minimalny kąt wewnętrzny każdego z trójkątów jest maksymalizowany. Dzięki temu unika się tworzenia wąskich i wydłużonych trójkątów, co sprawia, że siatka jest bardziej jednorodna i precyzyjna. Optymalna triangulacja zapewniana przez algorytm Delaunay'a umożliwia dokładniejsze odwzorowanie ukształtowania terenu. Precyzyjne odwzorowanie terenu za pomocą siatek TIN sprawia, że są one preferowaną metodą w procesach tworzenia wykresów widoczności. Umożliwiają one precyzyjne określenie, które obszary pozostają widoczne, a które są zasłonięte przez elementy krajobrazu lub zabudowy.

Precyzyjne odwzorowanie terenu przez siatki TIN wymagają znacznych zasobów obliczeniowych, a ich złożoność wzrasta wraz z liczbą punktów. Problem ten został szczegółowo omówiony w kolejnych rozdziałach. Warto jednak podkreślić, że mimo wysokiej dokładności uzyskanej na podstawie dostępnych danych, model powierzchni TIN nadal stanowi uproszczoną wersję rzeczywistego terenu.

Główną wadą chmury punktów jest brak punktów znajdujących się pod obiektami przysłaniającymi, na bazie których można by stworzyć siatkę patrząc ortogonalnie z góry, czyli z kierunku, z którego była tworzona chmura punktów. Dobrym przykładem ilustrującym ten problem jest drzewo (Fig. 32), które pod swoją koroną powinno mieć wolną przestrzeń, umożliwiającą dostrzeżenie obiektów znajdujących się za nim. Niestety, z powodu wspomnianego braku punktów terenu pod drzewem, siatka

łączy się z terenem naokoło, co powoduje, że obszar zasłaniany przez drzewo jest większy niż w rzeczywistości. Na przedstawionej ilustracji można dostrzec małe ostrosłupy symbolizujące latarnie, które nie zostały odwzorowane z pełną precyzją. To może wpływać na dokładność analizy oświetlenia i widoczności w danym obszarze. Warto jednak zwrócić uwagę na wysoką dokładność ukształtowania terenu, co jest istotnym aspektem w kontekście projektowania przestrzeni. Spadek terenu między asfaltowymi ścieżkami został odwzorowany z dużą dokładnością, co umożliwia realistyczne odtworzenie warunków naturalnych. Taka precyzja jest wymagana, ponieważ nawet niewielkie różnice w ukształtowaniu mogą znacząco wpływać na sposób, w jaki światło rozchodzi się w przestrzeni, a także na widoczność różnych obiektów w danym terenie.

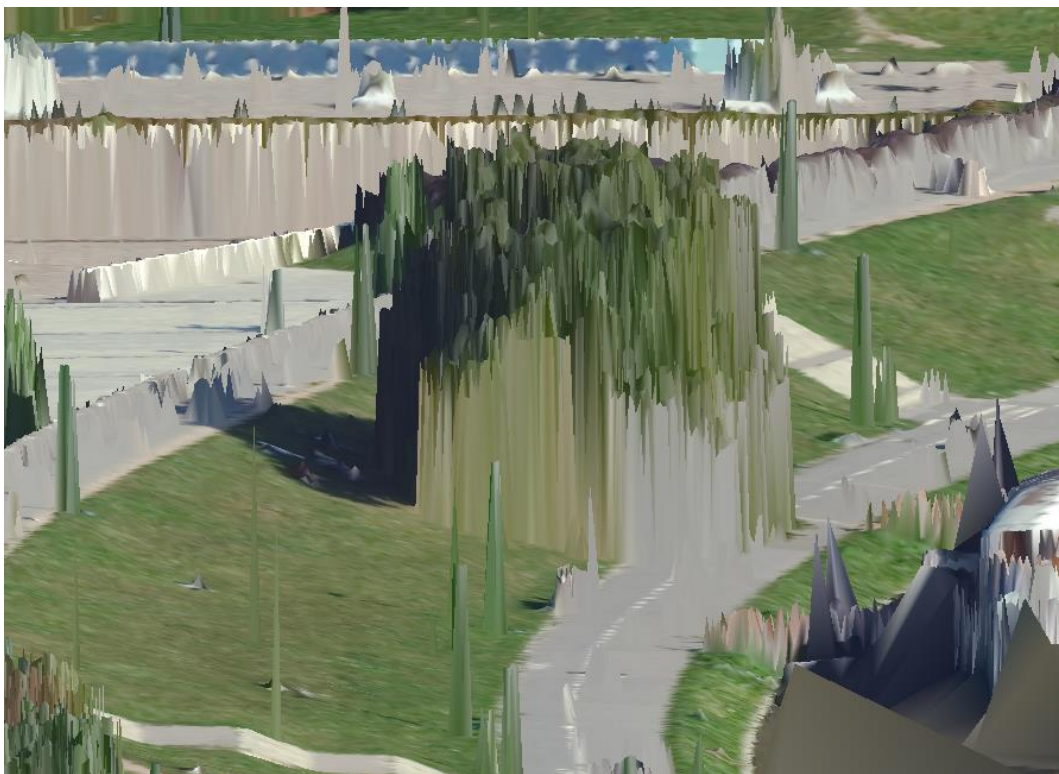


Fig. 32 Problem z odwzorowaniem obiektów na powierzchni TIN

Kolejnym krokiem tworzenia wykresu widoczności, jest umieszczenie punktu świetlnego w miejscu, z którego będzie wykonywany wykres (Fig. 33).

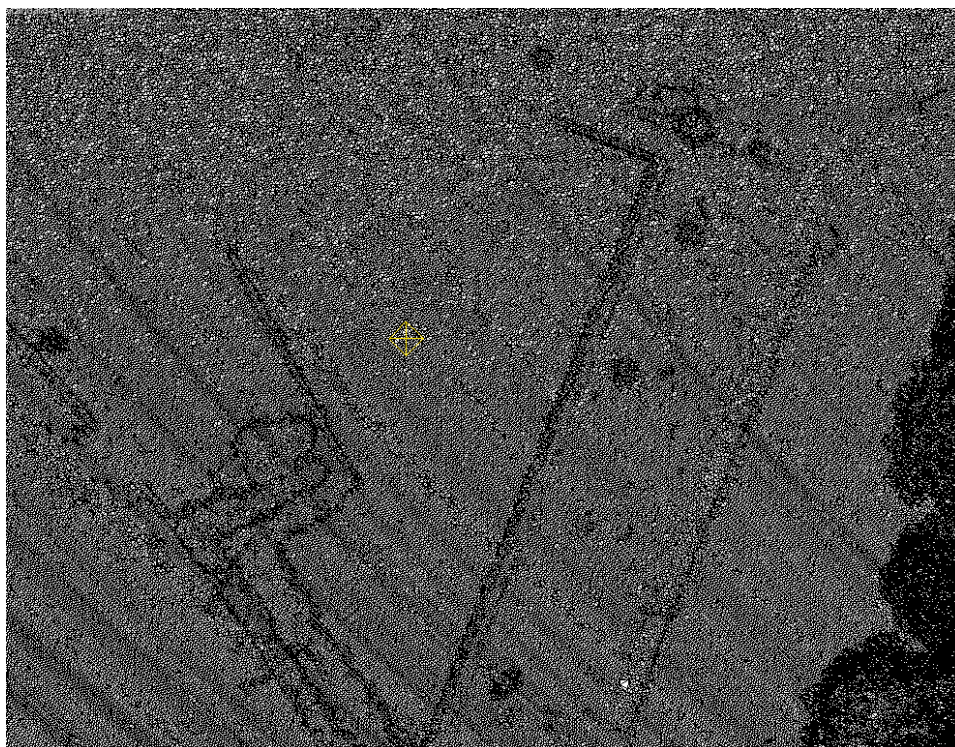


Fig. 33 Przykład części siatki TIN ze wstawionym punktem światła

Następnie wykonywany jest rendering sceny tj. przekształcenie na obraz dwuwymiarowy, przy wykorzystaniu algorytmu ray tracingu. Fig. 34, przedstawia miejsca do których dotrze światło oraz miejsca do których światło nie dotrze. Należy uwzględnić konieczność pominięcia wszystkich odbić światła, które mogłyby generować nieprawidłowe wyniki.

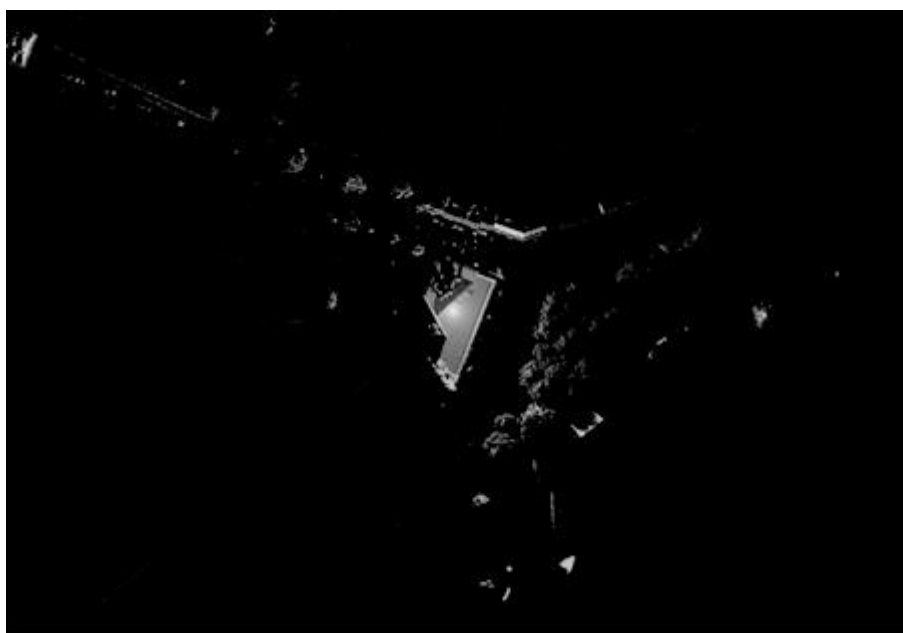


Fig. 34 Rendering sceny z punktem świetlnym

Ostatnim krokiem do uzyskania wykresu widoczności jest przeprowadzenie binaryzacji obrazu (Fig. 35) w celu jednoznacznego określenia przestrzeni widocznych i niewidocznych. Wynikiem takiego ciągu operacji jest precyzyjny wykres widoczności, który umożliwia analizę dostępności wizualnej.

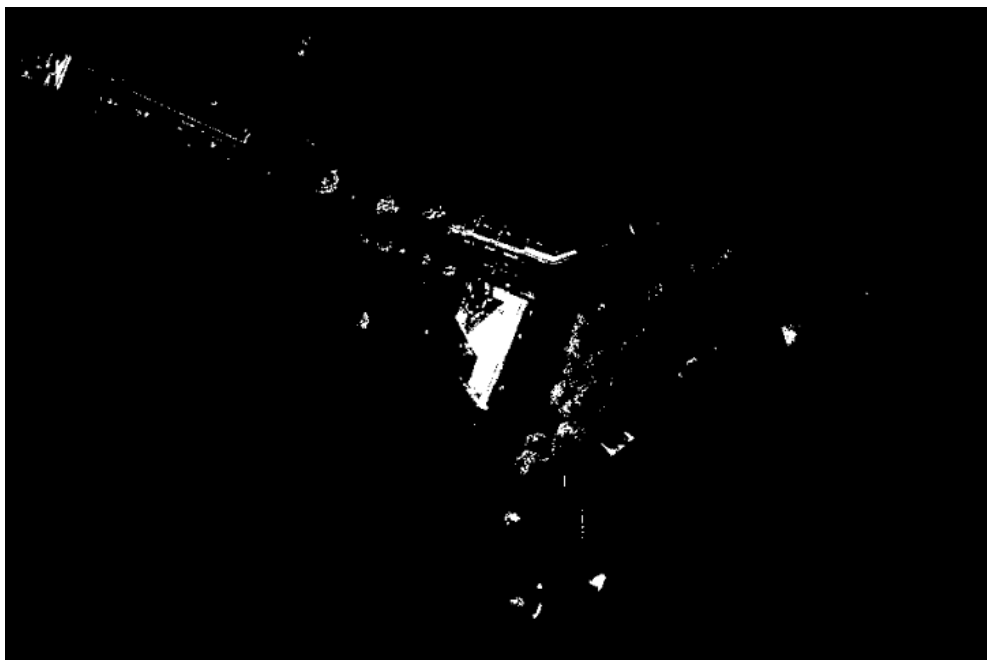


Fig. 35 Wykres widoczności – rendering po binaryzacji

Wedle informacji zawartych we wstępie do pracy, bazując na wykresach widoczności, można stworzyć mapę widoczności (Fig. 15). Jest to połączenie wielu wykresów widoczności wygenerowanych z różnych punktów, które łączone są w jedną całościową mapę, ukazującą np. widoczność wzdłuż drogi lub szlaku widokowego.

6. ANALIZA DOKŁADNOŚCI TWORZENIA WYKRESÓW WIDOCZNOŚCI NA BAZIE RÓŻNYCH TYPÓW DANYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę porównawczą dwóch dostępnych typów danych, służących do tworzenia wykresów widoczności: numerycznego modelu pokrycia terenu oraz chmury punktów. Pomimo szerokiego zastosowania NMPT jako danych wejściowych, istnieją pewne istotne ograniczenia związane z tą metodą, które mogą wpływać na dokładność wyników. Analiza obejmuje różne przypadki, w których korzystanie z NMPT może prowadzić do błędów w odwzorowaniu terenu, szczególnie w obszarach o skomplikowanej topografii.

W wielu pracach [78], [89], [90] wybór numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) jako źródła danych był podyktowany prostotą przetwarzania tego rodzaju informacji. Siatka stworzona na podstawie NMPT umożliwia efektywne wykorzystanie wybranych algorytmów widoczności, co przekłada się na szybkie uzyskiwanie wyników. Takie przyspieszenie ma szczególne znaczenie w badaniach, gdzie czas analizy jest kluczowy, zwłaszcza przy operacjach na dużych i skomplikowanych zbiorach danych. Jednym z celów pracy doktorskiej było wykazanie, że choć podejście bazujące na NMPT daje korzyści, to wyniki analizy mogą być obciążone istotnymi błędami. W szczególności w analizie obszarów charakteryzujących się wielkoskalowymi danymi występują zauważalne różnice w uzyskiwanych wynikach, które mogą znacząco wpłynąć na interpretację, zwłaszcza w przypadku analizy terenów o skomplikowanym ukształtowaniu. Implikuje to konieczność opracowywania bardziej precyzyjnych metod analiz, z wykorzystaniem chmur punktów. Główny cel pracy doktorskiej ma tutaj kluczowe znaczenie, ponieważ dostarcza opracowany efektywny proces tworzenia wykresów widoczności w oparciu o wielkoskalowe chmury punktów.

W ramach badania porównano precyzję i efektywność obu metod, uwzględniając różnorodne warunki terenowe i scenariusze zastosowania. Szczególną uwagę poświęcono temu, jak różnice między NMPT a chmurą punktów wpływają na generowane wykresy widoczności. Analiza wykazała, że chmura punktów oferuje znacznie większą

dokładność w odwzorowaniu detali terenu, co przekłada się na lepszą jakość analiz, zwłaszcza w przypadku złożonych i zróżnicowanych obszarów.

Zidentyfikowano konkretne przypadki, w których NMPT nie zapewnia wystarczającej precyzji, szczególnie w odwzorowaniu małych, ale istotnych elementów topograficznych. Chmura punktów, dzięki większej gęstości danych, umożliwia bardziej szczegółowe i wierne odwzorowanie terenu, co czyni ją bardziej odpowiednim narzędziem do analiz widoczności w wielu zaawansowanych zastosowaniach.

6.1. Metodyka

Każde z badań było wspierane przez serię analiz i wykresów widoczności opartych na NMPT oraz wielkoskalowych chmurach punktów. Analizy zapewniały dogłębne zrozumienie widoczności w obszarach miejskich charakteryzujących się swoją wielkoskalowością. Metody stosowane w przeprowadzonych badaniach widoczności były szczegółowe i wieloaspektowe, składające się z kilku odrębnych elementów:

1. Wykres widoczności na bazie NMPT: Wykres widoczności został opracowany na podstawie danych z modelu terenu. Ta wizualizacja pozwala na identyfikację widocznych i zasłoniętych elementów w danym obszarze.
2. Wykres widoczności na bazie chmury punktów, oznaczony jako PC: Analiza widoczności została przeprowadzona przy użyciu chmury punktów, w celu uzyskania bardziej szczegółowych danych, dotyczących widoczności w badanych obszarach.
3. Współczynnik widocznych pikseli: W celu uzyskania dokładnej ilościowej oceny widoczności, obliczono współczynnik widocznych pikseli do ogólnej liczby pikseli w badanych obszarach.
4. Nakładanie widoków: Wykresy widoczności uzyskane w krokach 1 i 2 zostały nałożone na siebie, co pozwoliło na porównanie i analizę różnic między nimi na jednym rastrze.
5. Różnica bezwzględna: Obliczono różnicę absolutną między obrazami uzyskanymi w kroku 4, aby ułatwić porównanie wykresów widoczności na podstawie NMPT i chmury punktów. To porównanie ujawniło obszary widoczne tylko na jednym z wykresów.

6. Odejmowanie: Analiza statystyczna widocznych pikseli wykazała ich większą liczbę na wykresach NMPT niż na wykresach chmury punktów. W związku z tym wykresy chmury punktów zostały odjęte od wykresów NMPT, aby ustalić zakres różnic między nimi.
7. Mapy hipsometryczne: Wygenerowano mapy hipsometryczne na obu typach danych, aby zilustrować rozbieżności w wysokościach między danymi NMPT a danymi chmury punktów.

6.2. Dane

Do badań zostały wybrane punkty zlokalizowane w przestrzeni miejskiej Krakowa (Tabela 1). Każdy z wybranych punktów został starannie dobrany, aby umożliwić szczegółową analizę widoczności w ich otoczeniu. Współrzędne geograficzne podane są w systemie WGS84.

Tabela 1 Punkty używane do obliczania widoczności

Nr	Nazwa punktu	Szerokość geograficzna	Długość geograficzna	Opis
1	Pomnik	50.029013	19.961229	Widok z małego wzgórza ograniczony elementami pokrycia terenu
2	Kopiec Krakusa	50.038056	19.958445	Widok z punktu widokowego wskazanego w dokumentach planistycznych

6.2.1. Punkt 1 - Pomnik Ofiar Faszyzmu

Punkt 1 (Tabela 1 - Pomnik) znajduje się wzdłuż krawędzi starego wału fortyfikacyjnego Krakowa z XIX wieku. Otoczony fosą, szczyt wału przypomina sześciokąt. Wnętrze wału tworzy zagłębienie o głębokości 1,5 m, które jest widoczne z korony. W zachodniej części usypano wzgórze z wapienia, na którym zbudowano wał. Było to miejsce niemieckiego obozu koncentracyjnego KL Płaszów podczas II wojny światowej. Na pamiątkę ofiar na wale wzniesiono kamienny pomnik (Fig. 36). Struktura ta znajduje się blisko punktu 1, w odległości 6 metrów i działa jako obiekt ograniczający widok z tego punktu. Dodatkowo, trzy małe drzewa w pobliżu blokują widok. Wysokie

zarośla na wschodzie, północy i zachodzie również zasłaniają dalszy widok. Na południe od punktu znajduje się szeroka arteria komunikacyjna, za którą znajdują się różne budynki miejskie. Niemniej jednak, szczyt wału jest na tyle wysoki, aby widzieć powierzchnie dachów niższych budynków.



Fig. 36 Pomnik Ofiar Faszyzmu



Fig. 37 Wykres widoczności bazujący na NMPT

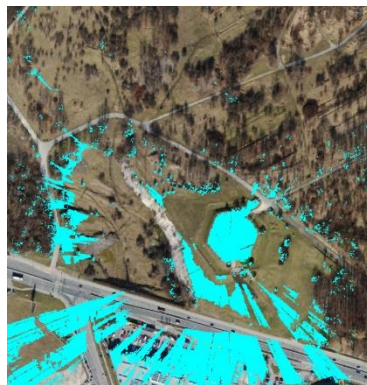


Fig. 38 Wykres widoczności bazujący na chmurze punktów

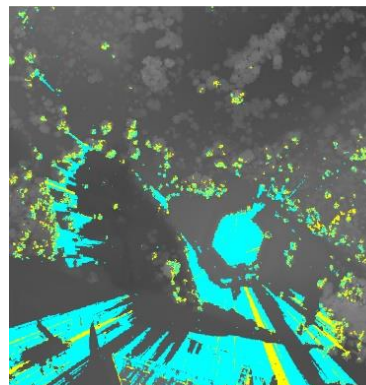


Fig. 39 Złożenie wykresów

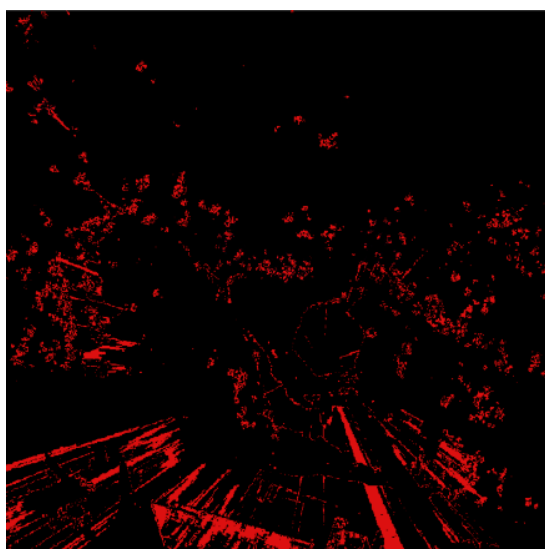


Fig. 40 Różnica bezwzględna wykresów

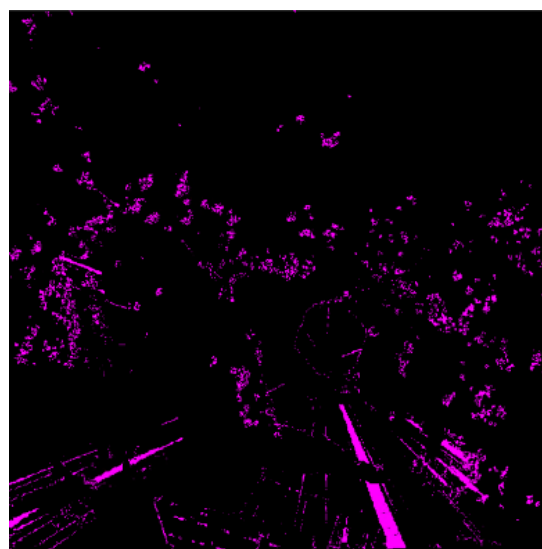


Fig. 41 Odejmowanie wykresów (chmura punktów - NMPT)

Analiza porównawcza dwóch wykresów widoczności wygenerowanych za pomocą chmury punktów (Fig. 38) oraz NMPT (Fig. 37) dla Pomnika Ofiar Faszyzmu ujawniła istotne różnice w wykrywaniu widocznych obszarów. Widoczny obszar na wykresie widoczności uzyskanego z chmury punktów wykazał większą liczbę promienistych podziałów, które są konsekwencją niewielkich obiektów zasłaniających widok. Bardziej zgeneralizowany model NMPT wykluczył te obiekty, dlatego nie dają tych promieni na tym wykresie. W odległości około sześciu metrów od punktu widokowego, Pomnik Ofiar Faszyzmu tworzy pustą przestrzeń na wykresie widoczności PC, ale nie na wykresie widoczności NMPT. Ponadto obserwuje się wpływ drzew

rosnących na wzgórzu, które zasłaniają ściany. Prowadzi to do wniosku, że wykres widoczności stworzony na podstawie chmury punktów jest bardziej precyzyjny, ponieważ zawiera więcej szczegółów istotnych w bliskiej odległości. W przypadku małego obszaru obserwacyjnego, bez możliwości ruchu w celu ominięcia przeszkody, staje się to istotnym problemem. W tym przypadku tak nie jest, ale jest to częsta sytuacja w krajobrazie miejskim. Widoczny obszar jest bardziej zwarty i mniej rozdrobniony na wykresie widoczności uzyskanej na podstawie NMPT. W obszarach, gdzie powierzchnia modelu PC jest widoczna, powierzchnia modelu NMPT tworzy przeszkody, jak pokazano na analizie wizualnej (Fig. 40, Fig. 41), oraz innej liczbie pikseli (Tabela 2). W tabeli przedstawiono liczbą oraz procentową różnicę pikseli widocznych która świadczy o istotnych różnicach wynoszących 5%. W porównaniu z wykresem Fig. 41, zauważalne jest, że wykres Fig. 40 obejmuje liczbę pikseli i tym samym, większą powierzchnię. Można oczekiwać, że te wykresy będą się zgadzać, biorąc pod uwagę, że model PC jest bardziej szczegółowy i zawiera elementy, które blokują widok w bliskiej odległości. Różnica między nimi może być przypisana uproszczeniu modelu NMPT, na przykład pewne obszary są widoczne w modelu PC, ale nie w NMPT i odwrotnie.

Tabela 2: Różnica i odejmowanie dla analizy widoczności na podstawie DEM i chmury punktów

Nr	Nazwa punktu	Liczba pikseli (Różnica)	% pikseli (Różnica)	Liczba pikseli (Odejmowanie)	% pikseli (Odejmowanie)
1	Pomnik	41 048	5.94%	24 511	3.55%
2	Kopiec Krakusa	37 163	4.94%	29 291	3.89%

W badaniu zostały dodatkowo ane dwie mapy hipsometryczne (Fig. 42, Fig. 43) dla wybranego punktu wraz z zakresami rzędnych Fig. 44. Jedna mapa została wygenerowana z NMPT, a druga z danych chmury punktów. Analiza koncentruje się na poziomie szczegółowości, reprezentacji powierzchni i różnicach statystycznych między dwiema mapami, które są kluczowe dla dokładnej analizy widoczności.

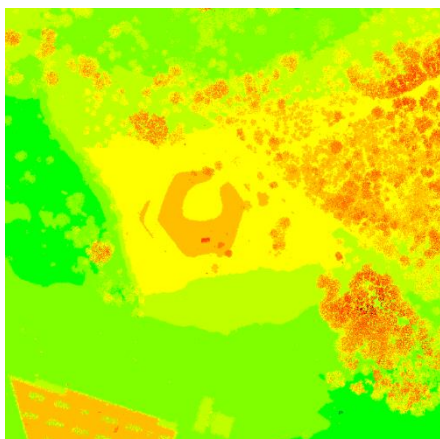


Fig. 42 Mapa hipsometryczna NMPT

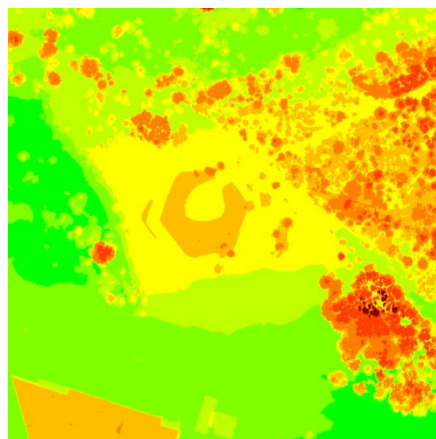


Fig. 43 Mapa hipsometryczna PC

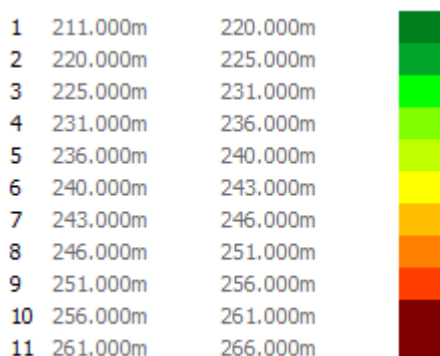


Fig. 44 Zakresy rzędnych

Mapa hipsometryczna uzyskana z danych chmury punktów wykazuje większą szczegółowość i wyrazistość, w tym reprezentację pojedynczych drzew, dzięki wyższej rozdzielczości i dokładności pomiarów chmury punktów. W przeciwieństwie do tego, mapa oparta na NMPT zapewnia bardziej zgeneralizowaną reprezentację powierzchni, z tendencją do wygładzania wielu mniejszych cech. Różnica ta jest widoczna przy badaniu określonych punktów na mapie, gdzie dane chmury punktów wykazują więcej nieregularności powierzchni w porównaniu z bardziej gładką reprezentacją NMPT.

Podsumowanie analizy dla pierwszego punktu wskazuje na znaczące różnice w wynikach uzyskanych przy użyciu różnych danych wejściowych. Porównanie wykresów widoczności generowanych z chmury punktów i cyfrowego modelu powierzchni ujawnia, że model oparty na chmurze punktów dostarcza bardziej szczegółowych i precyzyjnych informacji, zwłaszcza w kontekście bliskich odległości i obecności przeszkód. Z kolei model NMPT, poprzez generalizację pomija istotne detale i prowadzi do mniej precyzyjnych wyników widoczności. Podobne różnice są widoczne

w mapach hipsometrycznych, gdzie chmura punktów oferuje większą wyrazistość i dokładność, podczas gdy model NMPT przedstawia bardziej uogólnioną powierzchnię.

6.2.2. Punkt 2 - Kopiec Krakusa

Jednym z najbardziej eksponowanych punktów widokowych w Krakowie jest Kopiec Krakusa (Fig. 45, Fig. 46, Tabela 1 - punkt numer 2). Kopiec ten znajduje się na wczesnośredniowiecznym kurhanie. Położony na wysokości 271 metrów nad poziomem morza, kopiec jest porośnięty roślinnością niską. Jego podstawa leży około 40 metrów od stromego zbocza kamieniołomu o głębokości 42 metrów. Kopiec ma średnicę 57 metrów u podstawy, wysokość 16 metrów od podstawy i płaski wierzchołek o średnicy 8 metrów. Obecnie nie ma przeszkód widokowych w bliskim zasięgu. Jedynym powodem, dla którego stoki i podstawa kopca nie są widoczne z punktu widokowego na jego wierzchołku, jest płaszczyna wierzchołka (Fig. 47, Fig. 48). Ponadto widok jest naturalnie ograniczony przez zbocze kamieniołomu.

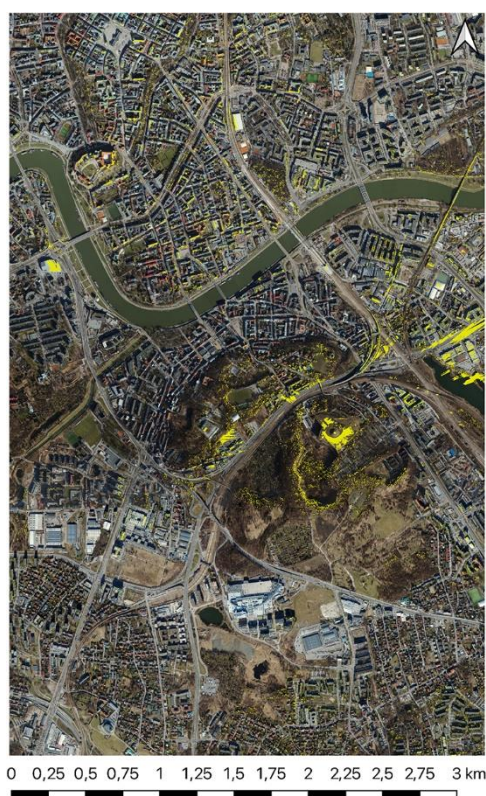


Fig. 45 Wykres widoczności wygenerowany dla Kopca Krakusa (punkt 2) na podstawie danych NMPT dla dużego obszaru badawczego nałożony na widok satelitarny (przestrzenie widoczne zaznaczone na żółto)

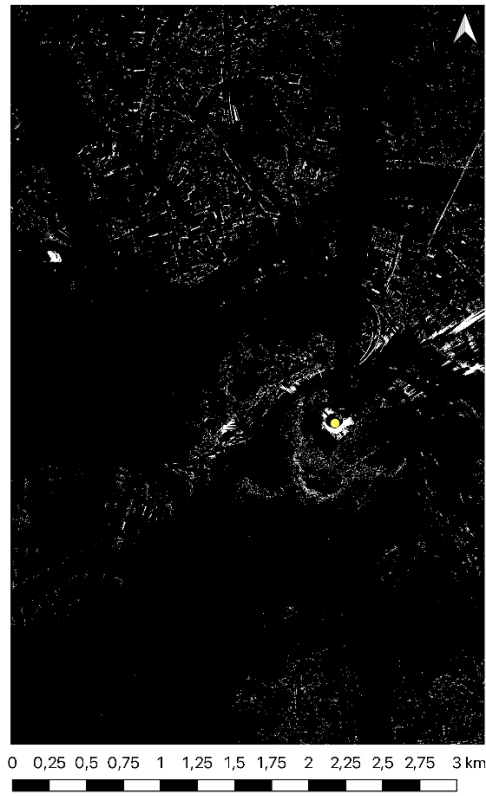


Fig. 46 Wykres widoczności wygenerowany dla Kopca Krakusa (punkt 2) na podstawie danych NMPT dużego obszaru badawczego

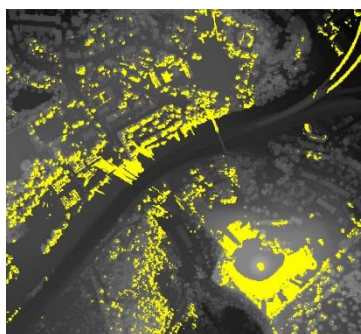


Fig. 47 Wykres widoczności bazujący na NMPT

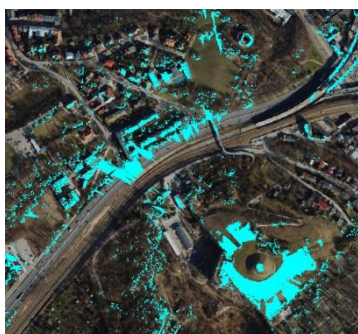


Fig. 48 Wykres widoczności bazujący na chmurze punktów

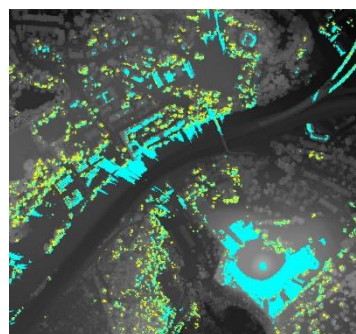


Fig. 49 Złożenie wykresów

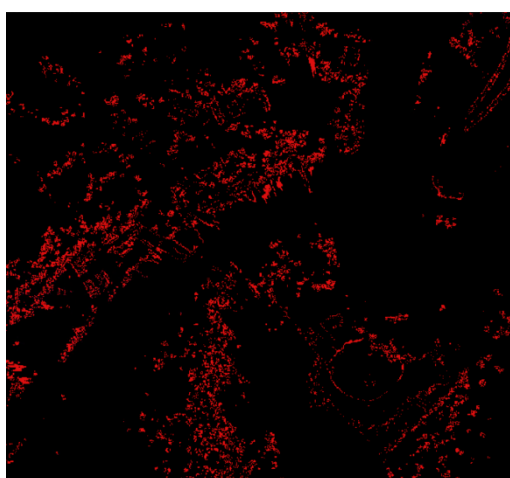


Fig. 50 Różnica bezwzględna wykresów

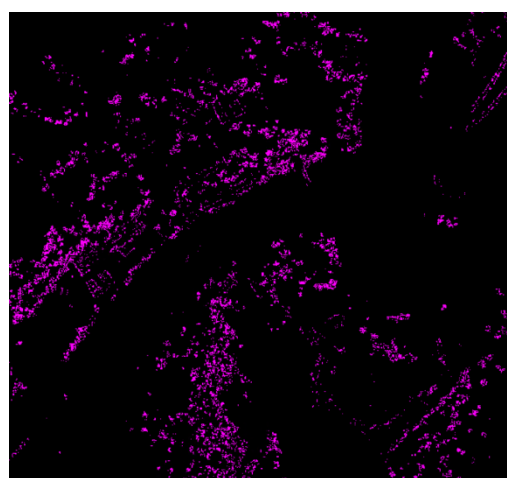


Fig. 51 Odejmowanie wykresów (chmura punktów - NMPT)

Generalizacja modelu NMPT jest główną przyczyną różnic między wynikami analiz widoczności. Obserwowane różnice numeryczne w precyzji analiz widoczności (Tabela 2) potwierdzają, że generalizacja zawarta w modelach NMPT prowadzi do mniej dokładnych wyników w porównaniu z bardziej szczegółowymi analizami widoczności opartymi na danych z chmur punktów. Ta korelacja między poziomem generalizacji a zakresem rozbieżności podkreśla wpływ generalizacji NMPT na dokładność analizy widoczności. Dodatkowo, w obszarach miejskich o złożonym układzie budynków, analiza widoczności oparta na NMPT wskazuje pewne obszary jako widoczne, podczas gdy w rzeczywistości są one zasłonięte przez struktury, których uproszczony NMPT nie jest w stanie dokładnie odwzorować.

Brak jest promienistych podziałów w obszarze widoczności, ponieważ w pobliżu pozycji na szczycie wzgórza żadne obiekty nie blokują widoku. Niewielka

liczba krzewów i drzew rosnących poniżej wzgórza daje podobne efekty kształtowe na obu wykresach Fig. 51 Odejmuwanie wykresów Fig. 47, Fig. 48.

Analiza informacji przedstawionych w Tabeli 2 pokazuje, że liczba pikseli różnicujących dwa wykresy jest stosunkowo duża. Wynika to z faktu, że punkt widokowy znajduje się na znacznej wysokości ponad wierzchołkami drzew. W wyniku rozszerzenia siatki do najwyższych punktów chmury, wierzchołki drzew są silniej reprezentowane w NMPT co można zaobserwować na Fig. 52, gdzie szczyty drzew są koloru reprezentującego wyższą wartość rzędną.

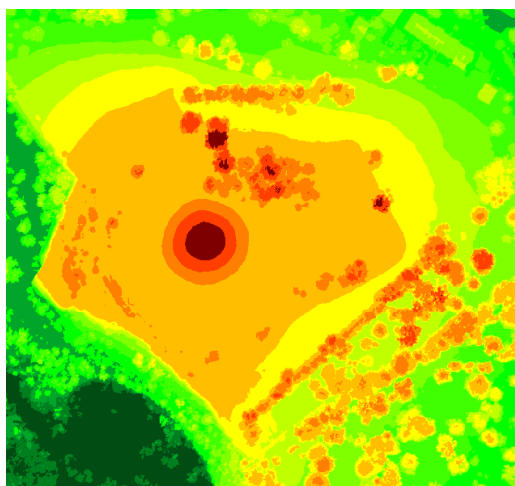


Fig. 52 Mapa hipsometryczna NMPT

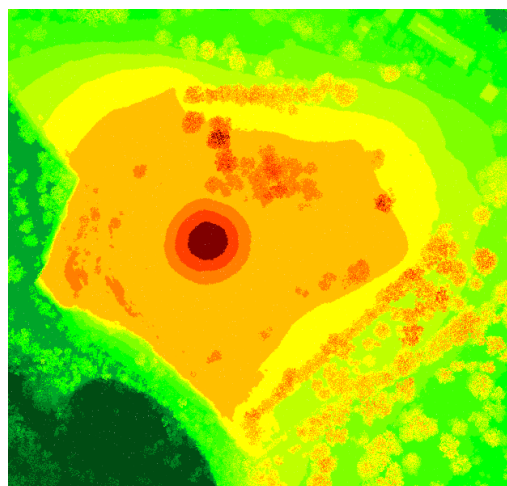


Fig. 53 Mapa hipsometryczna PC

1	211.000m	216.000m
2	216.000m	221.000m
3	221.000m	226.000m
4	226.000m	231.000m
5	231.000m	236.000m
6	236.000m	241.000m
7	241.000m	246.000m
8	246.000m	251.000m
9	251.000m	256.000m
10	256.000m	261.000m
11	261.000m	266.000m
12	266.000m	271.000m



Fig. 54 Zakresy rzędnych

Hipsometria kopca w przypadku obu modeli prezentuje się podobnie. Wzgórze i kopiec są ukształtowane ze zmianami nachylenia powierzchni, które w ten sam sposób są oznaczone na mapach hipsometrycznych bazujących na różnych typach danych.

Powierzchnia kopca i obszar wokół niego mają identyczny kształt (Fig. 52, Fig. 53, Fig. 54).

Analiza wykresów widoczności generowanych z danych NMPT oraz chmury punktów ujawnia, że model NMPT, będący bardziej uogólnionym, nie oddaje detali, takich jak efekty związane z roślinnością, co wpływa na interpretację widoczności. Porównanie widoków wykazuje znaczną liczbę różnic w pikselach między danymi NMPT a chmurą punktów, co jest związane z wysokością punktu widokowego i różnicami w reprezentacji wierzchołków drzew. W kontekście hipsometrii, oba modele dostarczają podobnych wyników, z drobnymi różnicami w przedstawieniu krawędzi kamieniołomu, co podkreśla potrzebę dokładnego uwzględnienia specyfiki danych wejściowych dla precyzyjnej analizy widoczności i ukształtowania terenu.

6.3. Wyniki

Seria porównań widoczności została przeprowadzona w dwóch lokalizacjach w obrębie dużego obszaru miejskiego. Badanie obejmowało wybór punktów w różnych strefach miejskich w celu uzyskania kompleksowego przeglądu otoczenia z każdej lokalizacji. Rozdział przedstawia szczegółową analizę dwóch odrębnych lokalizacji, z których każda oferuje unikalną perspektywę na krajobraz miejski:

1. Małe wzgórze z otwartym widokiem
2. Typowy punkt widokowy dla turystów

Statystyki przedstawione w Tabeli 3 potwierdzają różnorodność widoków. Zakres widoku jest wskazany przez wartość w kolumnie "Całkowita liczba pikseli". Jest to liczba pikseli zawartych w prostokącie wykresu zdefiniowanym przez najdalsze widoczne punkty z danej lokalizacji w każdym z czterech podstawowych kierunków (północ, południe, wschód, zachód). Kolumna oznaczona "Widoczne piksele" wskazuje liczbę pikseli zidentyfikowanych jako widoczne przez algorytm generowania widoczności. Wysoka liczba w tej kolumnie oznacza szeroki, nieprzesłonięty widok, podczas gdy niska liczba oznacza widok bardziej kameralny, sąsiedzki. Stosunek widocznych do całkowitych pikseli jest pokazany przez wartość "% widocznych pikseli". W tej kolumnie wyżej wartościowane są widoki otwarte, a niżej widoki ograniczone.

Liczba widocznych pikseli w wykresach widoczności utworzonych przy użyciu chmury punktów była konsekwentnie mniejsza niż ta uzyskana na podstawie cyfrowego modelu powierzchni we wszystkich przypadkach. Ta rozbieżność była w dużej mierze spowodowana generalizacją modelu i wybranym algorytmem obliczania widoczności, jak omówiono wcześniej w analizie wyników dla każdego punktu. Układ wykresu PC był bardziej rozdrobiony i zawierał znaczną ilość szczegółów. Wykresy uwzględniały zagłębienia między drzewami i małymi budynkami, co skutkowało pojawieniem się "okien widokowych" - małych obszarów, które są widoczne - w tych miejscach.

Tabela 3: Wyniki analizy widoczności na podstawie NMT i chmury punktów wyrażone w pikselach

Nr	Nazwa punktu	Pow. (km ²)	Całk. liczba pikseli	Widoczne piksele (NMT)	% widocznych pikseli (NMT)	Widoczne piksele (PC)	% widocznych pikseli (PC)
1	Pomnik	0.249	691 392	99 556	14.40%	91 582	13.25%
2	Kopiec Krakusa	0.271	752 463	81 997	10.90%	60 578	8.05%

6.3.1. Czas potrzebny na obliczenie wykresów widoczności

Czas potrzebny na obliczenie wykresów widoczności był dokładnie mierzony. Całkowity czas obliczeń obejmuje również wykonanie potrzebne do stworzenia siatki, która została wygenerowana z danej chmury punktów w przypadku przetwarzania chmury punktów (PC).

Obliczenia były przeprowadzane na komputerze o następującej specyfikacji:

- Procesor: Intel(R) Core(TM) i9-14900K CPU @ 3.20 GHz
- Pamięć: 64.0 GB (Dostępne: 63.8 GB)
- Grafika: Zintegrowana UHD Graphics 770

Warto zauważyć, że operacje były wykonywane wyłącznie na procesorze, bez wsparcia przetwarzania GPU. Dzięki temu zmierzone czasy dokładnie odzwierciedlają wydajność CPU w obsłudze tych zadań.

Tabela 4 Czas potrzebny na stworzenie wykresu widoczności w zależności od metody renderowania

Metoda	Czas
Chmura punktów [m:s]	98:52
NMT [m:s]	9:03

Czasy przetwarzania podane w Tabeli 4 wskazują, że tworzenie wykresów widoczności na podstawie chmury punktów jest czasochłonnym procesem. Celem badań jest ustalenie, czy warto skrócić czas przetwarzania przez użycie NMPT jako wejścia, mimo potencjalnie mniej szczegółowych i precyzyjnych wyników.

Wedle powyższej analizy można stwierdzić, że przetwarzanie wielkoskalowych chmur punktów jest znacznie bardziej złożoną operacją obliczeniową niż przetwarzanie danych wykorzystujących cyfrowy model powierzchni (NMPT). Wynika to z faktu, że wielkoskalowe chmury punktów zawierają znacznie większą ilość danych, co zwiększa złożoność procesów obliczeniowych. Jednak dzięki dużej liczbie punktów, analiza przeprowadzana z ich użyciem cechuje się maksymalną dokładnością.

Widoki bazujące na danych pochodzących z chmur punktów dostarczają bardziej precyzyjnych wyników i zawierają informacje, które NMPT może pomijać. Tego rodzaju dokładność jest szczególnie ważna w analizach widoczności w środowiskach miejskich, gdzie precyzyjne odwzorowanie terenu i obiektów jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników. Chmury punktów pozwalają na lepsze zrozumienie struktury terenu, co może być nieocenione w planowaniu przestrzennym, inżynierii lądowej oraz innych dziedzinach wymagających szczegółowej analizy topograficznej.

7. RADIALNY PODZIAŁ CHMURY PUNKTÓW

W pracy z wielkoskalowymi chmurami punktów jednym z największych problemów jak i zalet jest ilość danych przez nie dostarczana. W wielu pracach przedstawiono różne podejścia do tego problemu [91] [51], [78]. Jednym z głównych podejść jest wykorzystanie danych bazujących na chmurze punktów, czyli NMPT lub NMT, które są uproszczeniem chmury punktów, zostało to dokładnie opisane w rozdziale 6.

Innym podejściem do uproszczenia chmury punktów jest ograniczenie liczby punktów, co można osiągnąć za pomocą różnych metod, opartych na wielu kryteriach. Do najprostszych należy eliminacja punktów losowych lub analiza odległości między punktami. Metoda eliminacji punktów losowych charakteryzuje się prostotą, jednak ze względu na jej losowy charakter może prowadzić do usunięcia istotnych informacji, które mogą być kluczowe dla dalszej analizy. Mimo to, metoda ta cieszy się dużą popularnością, szczególnie w środowiskach do zarządzania chmurami punktów, takich jak Cloud Compare [92] które oferują ją w swoich funkcjach. Inne metody, opisane w literaturze, obejmują te oparte na identyfikacji punktów według cech charakterystycznych [93], wyodrębnianiu punktów uznanych za najbardziej istotne [94] lub punktów opisujących kształt obiektu [95]. Są to bardziej zaawansowane podejścia, które umożliwiają lepszą selekcję punktów, jednak wymagają szczegółowej analizy chmury punktów, często wielokrotnej, co wydłuża czas przetwarzania. Ponadto, techniki te, mimo swojej efektywności, nie zostały szeroko zaimplementowane w ogólnodostępnych programach, co ogranicza ich stosowalność. W związku z tym, choć zaawansowane metody stanowią obiecujące narzędzie do precyzyjnego przetwarzania chmur punktów, to ich zastosowanie w praktyce napotyka na istotne trudności związane z dostępnością odpowiednich narzędzi oraz wydajnością procesów obliczeniowych. Z kolei popularne środowiska, takie jak wspomniane Cloud Compare, udostępniają jedynie podstawowe metody, takie jak redukcja punktów na podstawie analizy odległości czy usuwanie punktów losowych, co choć skutkuje zmniejszeniem zbioru, nie zapewnia oczekiwanej precyzji.

Jednym z głównych wyzwań było opracowanie metody umożliwiającej efektywne zarządzanie dużymi zbiorami punktów, która nie prowadziłaby do utraty

istotnych informacji. W ramach tego założenia, kluczowym wyzwaniem było zapewnienie maksymalnej precyzji przetwarzania danych przy jednoczesnym zachowaniu ich integralności. Zamiast upraszczać dane przez usuwanie punktów na podstawie prostych kryteriów, skoncentrowano się na opracowaniu rozwiązania, które umożliwi pełne wykorzystanie dostępnych informacji, nie tracąc wartościowych danych, które mogą mieć znaczenie w dalszej analizie.

W przypadku, gdy żadna z metod ograniczenia liczby punktów nie została zastosowana, a liczba punktów, na podstawie których należy stworzyć wykres widoczności, jest zbyt duża, konieczne staje się zastosowanie alternatywnego podejścia. Takim podejściem jest podział chmury punktów na części, a następnie wykonanie częściowych wykresów widoczności na bazie tych podziałów. Kolejnym krokiem jest złożenie wszystkich elementów w całość, tworząc kompletny wykres widoczności. Autor wyróżnił różne metody podziału: podział kwadratowy, prostokątny, na bazie wieloboku, podział sferyczny, podział radialny oraz inne. Wybór odpowiedniej metody podziału jest kluczowy, aby nie zakłócić procesu tworzenia wykresu widoczności i zapewnić spójność wyników.

Wynika to z zależności metody podziału od wybranej metodologii tworzenia wykresu widoczności, która bazuje na ray tracingu. Istotnym elementem tego procesu jest zapewnienie, że każdy wycinek powierzchni jest skierowany do punktu centralnego, co gwarantuje precyzję obliczeń i spójność wyników. Tego typu podejście pozwala na uzyskanie realistycznego obrazu widoczności, minimalizując błędy, wynikające z niewłaściwego odwzorowania geometrii terenu lub obiektów w przestrzeni. Podział kwadratowy, prostokątny czy oparty na wielobokach nie spełniają tego wymogu, ponieważ mogą prowadzić do fragmentacji danych i utrudniać dokładne tworzenie wykresu. Choć podział sferyczny może być rozwiązaniem, to jednak może prowadzić do błędów związanych z różnymi fragmentami budynków na różnych wysokościach, które mogą pojawić się w tych częściach.

W związku z tym, najlepszym rozwiązaniem okazał się podział radialny (Fig. 55), który jest zgodny z metodą renderowania powierzchni opartą na śledzeniu promienia ray tracing, co zostało dokładnie opisane w rozdziale 5. Ta metoda polega na wysyłaniu promienia od punktu centralnego, a wybrany podział radialny nie zakłóca jego przebiegu, co czyni go optymalnym rozwiązaniem.



Fig. 55 Podział radialny chmury punktów

7.1. Wyznaczenie radialnych części:

Wyznaczenie radialnych części chmury punktów polega na podziale przestrzeni wokół punktu obserwacji na określone radialne sektory. Poniżej przedstawiono algorytm tego procesu krok po kroku:

- 1. Określenie punktu obserwacji:**

- Wybór punktu widokowego P_c , który będzie środkiem podziału. Jest to punkt, względem, którego będą wyznaczone kąty kierunków.
2. **Wyznaczenie kątów kierunków:**
- Zdefiniowanie liczby podziałów, na bazie której będzie wyznaczony kąt minimalny \angle_{min} i kąt maksymalny \angle_{max} , które określają zakres kąta, w jakim będą znajdować się punkty należące do danej części radialnej.
3. **Przeglądanie punktów chmury:**
- Dla każdego punktu P_i w chmurze punktów:
 - Oblicz kąt \angle_i pomiędzy prostą OX przechodzącą przez punkt widokowy P_c a prostą przechodzącą przez punkt widokowy P_c i punkt P_i
 - Jeśli kąt \angle_i zawiera się pomiędzy \angle_{min} a \angle_{max} , zalicz punkt P_i do bieżącej części radialnej.

Wynikiem takich operacji w przypadku dziesięciu części radialnych jest dziesięć wycinków chmury punktów. Grafika Fig. 56 prezentuje jedną z części.



Fig. 56 Podział chmury punktów na wycinek radialny

Na bazie chmury punktów tworzy się powierzchnię TIN (Fig. 57) oraz umieszcza światło w punkcie, z którego będzie generowany wykres widoczności.



Fig. 57 Powierzchnia TIN na bazie radialnego wycinka chmury punktów wraz z punktem świetlnym

Na bazie wycinków przeprowadza się proces renderowania wg. algorytmu opisanego w rozdziale 5 (Fig. 58).

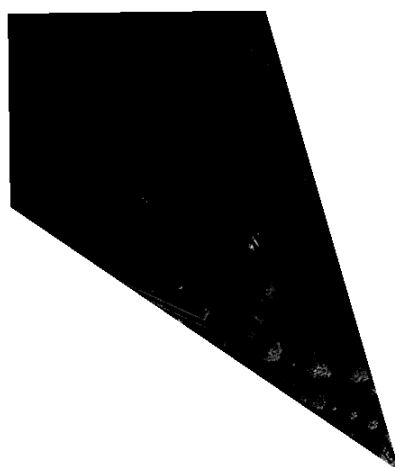


Fig. 58 Wyrenderowany wycinek radialny

Następnie na wynikowym renderingu przeprowadza się proces binaryzacji z progiem 1, w celu wskazania obszarów widocznych i niewidocznych (Fig. 59).

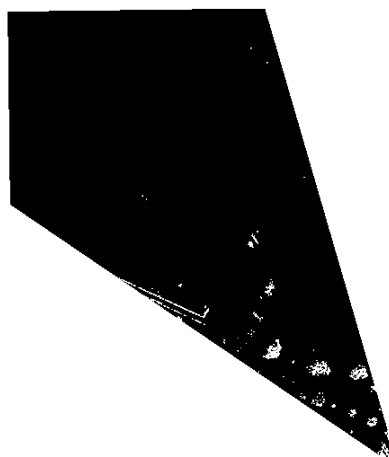


Fig. 59 Wycinek radialny po procesie binaryzacji – wykres widoczności na bazie wycinka radialnego

Niestety, jednym z problemów związanych z generowaniem wykresów widoczności na bazie wycinków radialnych są nieprawidłowości pojawiające się na krawędziach wycinków (Fig. 60, Fig. 61), które stają się widoczne w procesie ich łączenia. Wprowadzają one błędne informacje, co skutkuje zniekształceniem wyników. Te nieprawidłowości, często określane jako „białe drzazgi”, pojawiają się wzdłuż granic podziału radialnego (Fig. 62). Ich przyczyną jest nieciągłość chmury punktów, na podstawie której tworzona jest powierzchnia widoczności. Na granicach wycinków tworzone są elementy powierzchni zaznaczone na kolor czerwony na grafice Fig. 63. Są to trójkątne powierzchnie łączące w tym przypadku skrajne punkty chmury. Problem polega na tym, że trójkąty te są nieprawidłowe, wynika to z podziału chmury punktów. Poprzez zastosowanie podziału chmura traci swoją ciągłość i w miejscach podziału powierzchnia jest tworzona w sposób niepoprawny, jest to spowodowane brakiem punktów, które zostały przydzielone do innej części (Fig. 63).

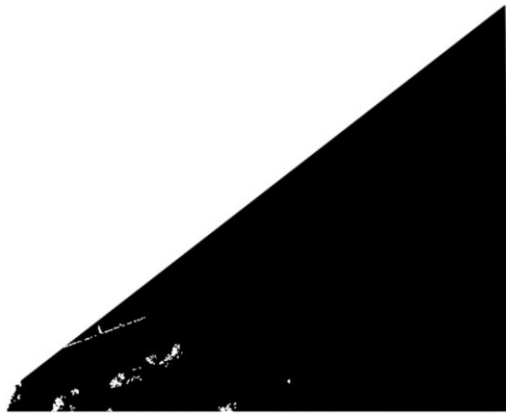


Fig. 60 Wycinek 1

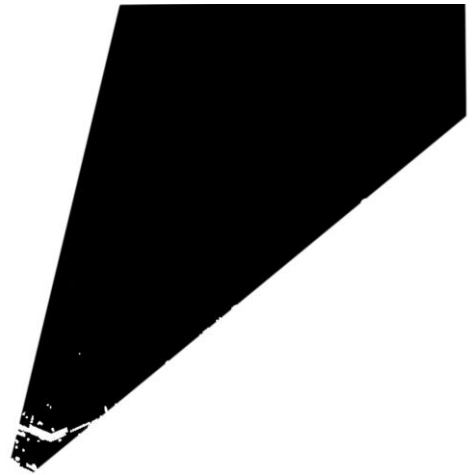


Fig. 61 Wycinek 2



Fig. 62 Połączenie wycinków z zaznaczonymi "białymi strzałami"

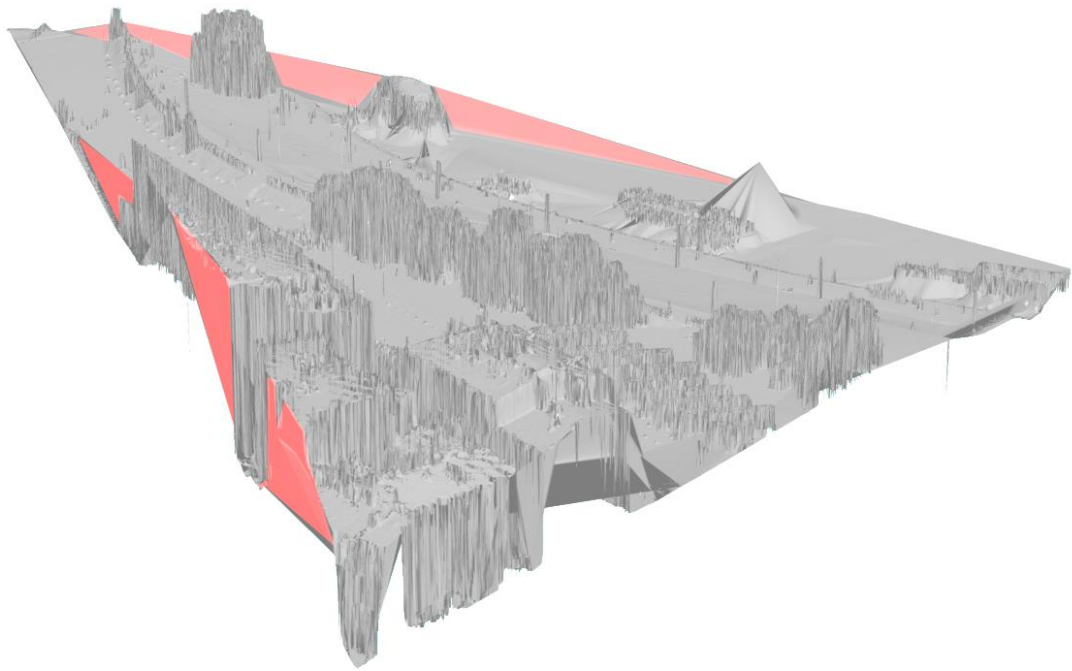


Fig. 63 Powierzchnia TIN z zaznaczonymi błędnymi wielokątami

Aby rozwiązać ten problem, zaproponowano metodę nakładkową, która polega na podziale chmury punktów na wycinki radialne, które nachodzą na siebie (Fig. 65), a następnie na zastosowaniu operacji erozji (Fig. 64), na krawędziach częściowych wykresów widoczności bazujących na wynikowych renderingach. Dzięki temu rozwiązaniu każdy wycinek radialny ma nieco większy zasięg kątowy niż w tradycyjnym podziale, co zapewnia nakładanie się sąsiednich wycinków. Nakładanie oraz erozja umożliwiają wyeliminowanie przerw w ciągłości powierzchni, co pozwala na uniknięcie tworzenia niepożądanych „białych drzazg”, czyli błędnych danych na granicach wycinków.

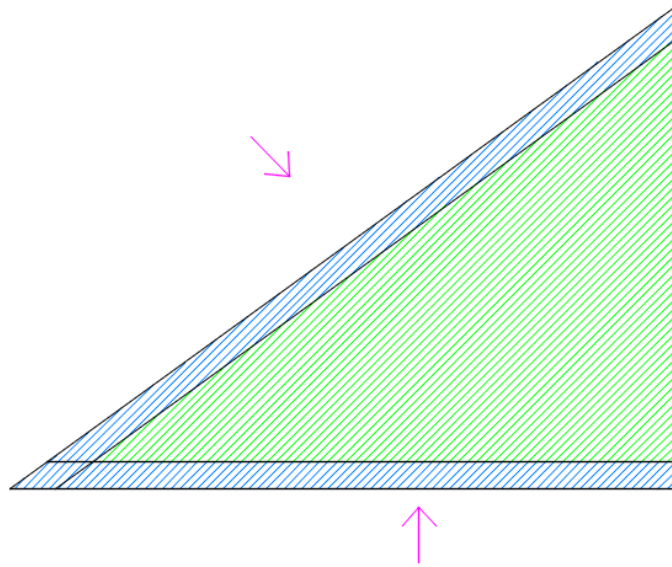


Fig. 64 Wycinek radialny z zaznaczoną erozją

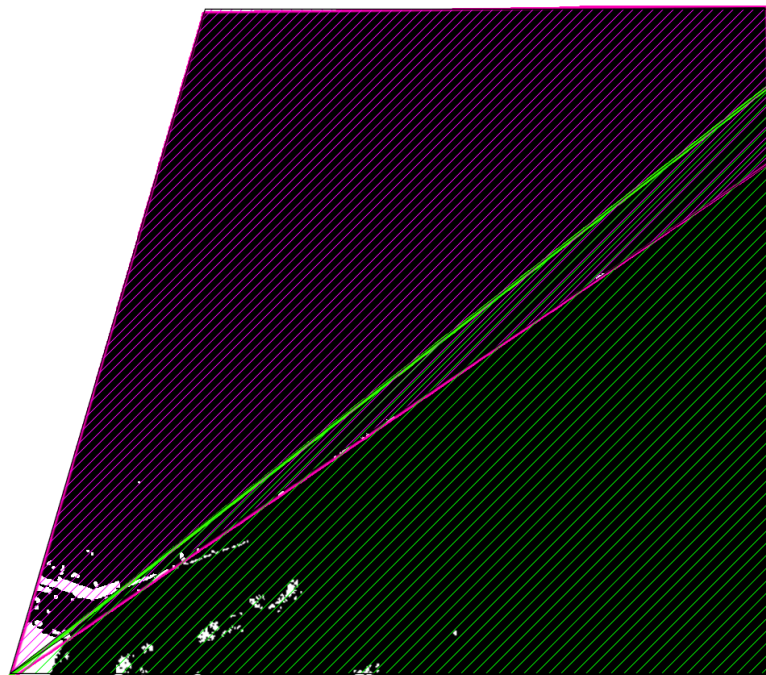


Fig. 65 Wycinki radialne połączone nakładkowo

Następnym krokiem w procesie generowania wykresu widoczności jest połączenie wszystkich wycinków radialnych w jeden, spójny wykres. Na tym etapie pojawia się kolejna niedokładność, wynikająca z przeprowadzonej wcześniej operacji erozji. Pomimo, że erozja skutecznie usuwa niepożądane elementy na zewnętrznych

krawędziach wycinków, powoduje ona jednak powstawanie szczelin w centralnej części wykresu. Na grafice Fig. 66 zaprezentowany został zwykły podział radialny, a na grafice Fig. 67 podział nakładkowy z zaznaczonym kierunkiem erozji.

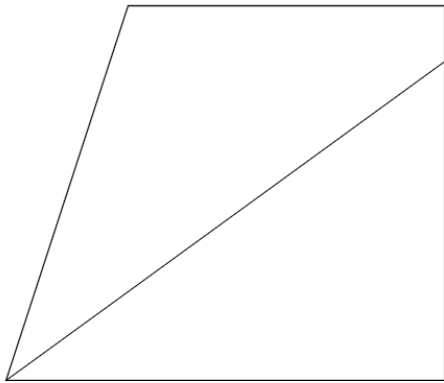


Fig. 66 Podział radialny

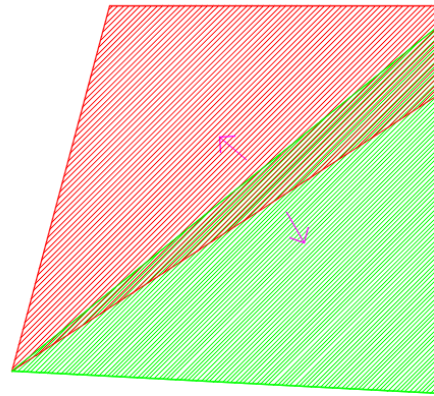


Fig. 67 Podział radialny z nakładką oraz zaznaczonym prostopadłym kierunkiem erozji

Zjawisko to jest szczególnie widoczne w miejscu, gdzie wycinki radialne zbiegają się w centrum. Ponieważ powiększenie wycinków następuje biegunowo, natomiast erozja działa równoległe na całej powierzchni renderowanego wycinka, w centralnym punkcie wykresu mogą pojawiać się przerwy. Szczeliny oznaczone kolorem niebieskim (Fig. 68) prowadzą do braku pełnej ciągłości w obszarze, gdzie wycinki powinny się stykać.

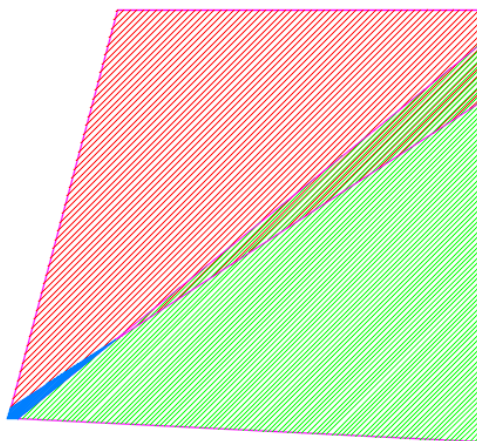


Fig. 68 Podział po przeprowadzonej erozji z zaznaczonym fragmentem pustej przestrzeni

Rozwiązaniem tego problemu jest stworzenie małego, lokalnego wykresu widoczności w centralnym punkcie (Fig. 69), z którego generowany jest główny wykres. Ten dodatkowy, wewnętrzny wykres ma na celu wypełnienie pustych przestrzeni, które powstają w wyniku wcześniejszych operacji erozji (Fig. 70). Chmura punktów, która tworzy mały wykres widoczności, jest generowana już na etapie podziału całego obszaru na wycinki radialne, co zapewnia jej spójność z pozostałymi danymi przestrzennymi. Promień chmury jest wyliczany na podstawie wzoru 7.3..

W kolejnym kroku na wewnętrznym wykresie również przeprowadzana jest operacja erozji, aby uniknąć przekłamań na krawędziach. Dzięki temu podejściu możliwe jest utrzymanie ciągłości danych w centralnej części wykresu, gdzie w poprzednich etapach pojawiały się szczeliny. Mały wykres widoczności skutecznie wypełnia te puste przestrzenie, eliminując błędy wynikające z nieprecyzyjnych obliczeń w centralnym punkcie. W rezultacie otrzymywany jest spójny i dokładny model widoczności, który uwzględnia wszystkie kluczowe obszary, zarówno na peryferiach, jak i w centrum analizowanego obszaru.

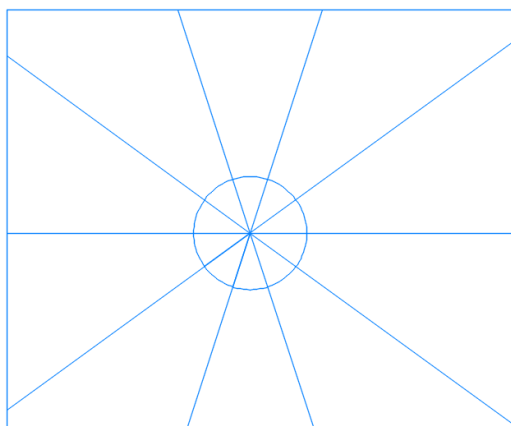


Fig. 69 Podział na wycinki radialne wraz z chmurą centralną

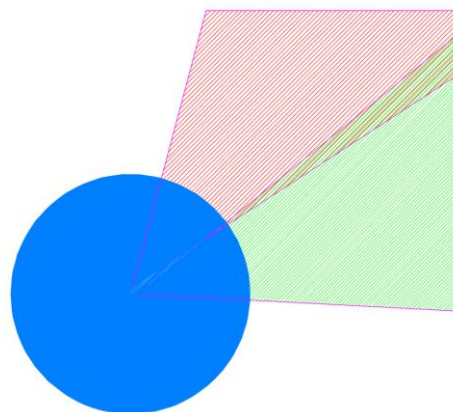


Fig. 70 Wypełnienie pustych przestrzeni przez chmurę centralną

Parametry dotyczące promienia wewnętrznej chmury punktów, na bazie której powstaje mały wykres widoczności są zależne od kilku zmiennych:

- (Kat) – kąt wynikający z liczby części, na którą jest podzielona chmura (360/części)
- (Wch) – wysokość chmury punktów
- ($Szch$) – szerokość chmury punktów
- ($Roz X$) – rozmiar renderingu po osi X
- ($Roz Y$) – rozmiar renderingu po osi Y
- (Epx) – wielkość erozji w px

Na podstawie wysokości, szerokości, rozmiaru renderingu oraz wartości erozji w pikselach, wyliczana jest wartość erozji w jednostkach chmury:

- ($Sz - er - m$) - szerokość erozji w metrach (7.1.),
- ($W - er - m$) - wysokość erozji w metrach W-er-m (7.2.).

W zależności czy chmura jest szersza czy wyższa to ta wartość jest brana pod uwagę w wyliczeniach (Fig. 71, Fig. 72).

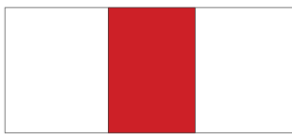


Fig. 71 Wysokość chmury obejmuje cały rendering



Fig. 72 Szerokość chmury obejmuje cały rendering

Wzór na wyliczenie szerokości erozji w m:

$$\bullet \quad (Sz - er - m) = (Szch * Epx) / RozX \quad (7.1.)$$

Wzór na wyliczenie wysokości erozji w m:

$$\bullet \quad (W - er - m) = (Wzch * Epx) / RozY \quad (7.2.)$$

Wzór na promień małej chmury

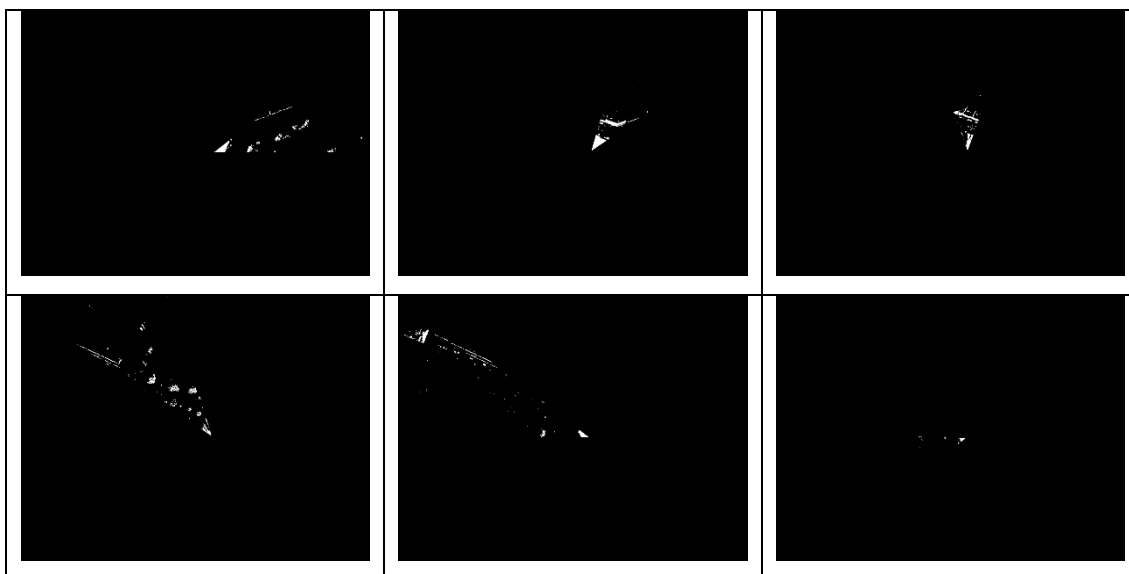
$$\bullet \quad R = (Sz - er - m) / SIN\left(\left(\frac{Kat}{2}\right) * PI / 180\right) \quad (7.3.)$$

Po przeprowadzeniu wszystkich wymienionych operacji i połączeniu dociętych wycinków radialnych wraz z wycinkiem centralnym powstaje jeden pełny wykres widoczności (Fig. 73). Na grafikach zamieszczonych w Tabeli 5 przedstawiono wszystkie częściowe wykresy widoczności, wygenerowane w wyniku podziału chmury punktów na wycinki radialne oraz wykres centralny obejmujący swoim zakresem wyłącznie obszar centralny. Grafiki Fig. 74, Fig. 75 ilustrują porównanie złożenia częściowych wykresów po zastosowaniu operacji erozji i pełnego wykresu uzupełnionego o wykres centralny.



Fig. 73 Wykres widoczności powstały na bazie wycinków radialnych

Tabela 5 Częściowe wykresy widoczności



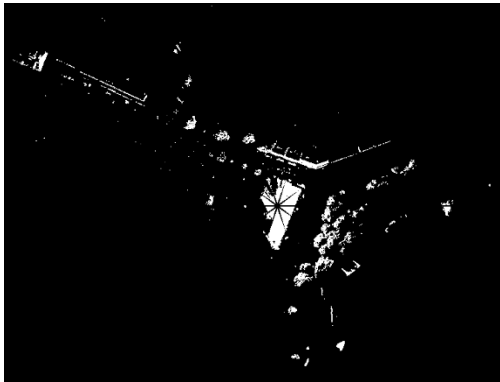
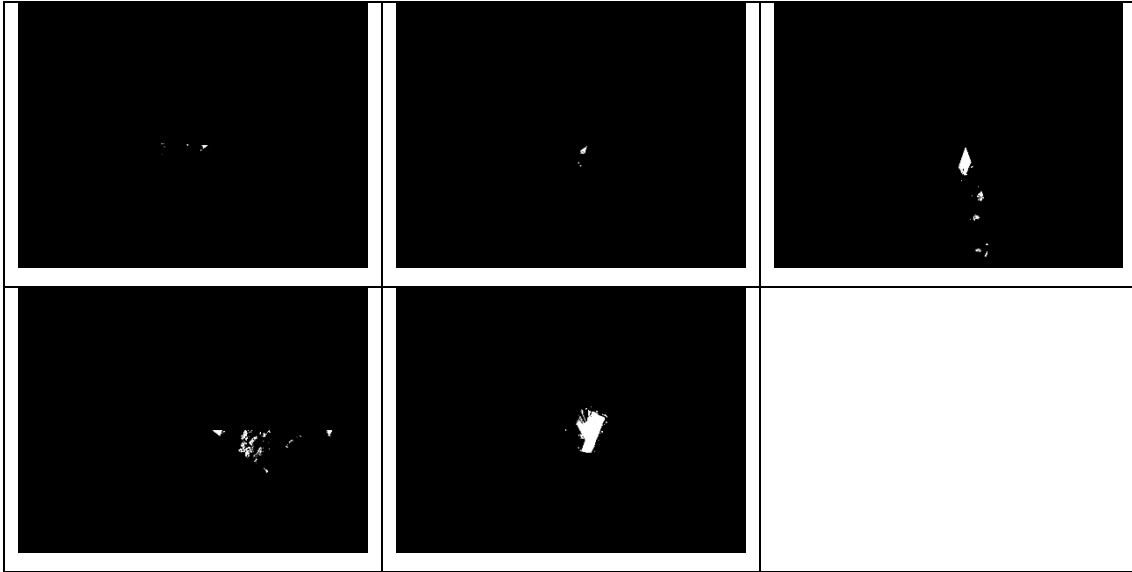


Fig. 74 Wykres widoczności bez części centralnej

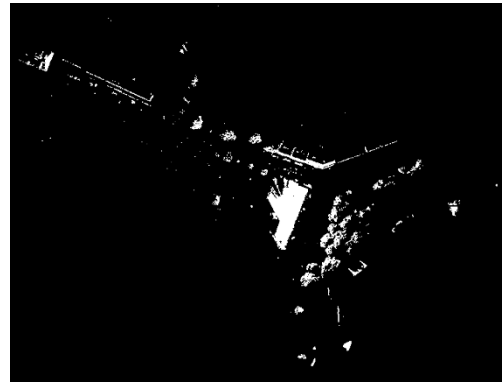


Fig. 75 Wykres widoczności uzupełniony o część centralną

Niestety, takie rozwiązanie jest bardzo czasochłonne co zostało zaprezentowane w kolejnym rozdziale. Jest to spowodowane tym, iż sam podział chmury punktów metodą punkt po punkcie, wymaga sprawdzenia kąta między osią OX a półprostą wyznaczoną przez punkt obserwacji i badany punkt oraz porównania go z wyznaczonym zakresem kątowym, miliony razy. Dodatkowo, samo tworzenie wykresów widoczności na podstawie radialnych wycinków, wykonywane sekwencyjnie na jednej maszynie obliczeniowej, również wymaga dużego nakładu czasowego. Problemy te wymagały dokładnej analizy i przedstawienia sugerowanych rozwiązań, które zostały zaprezentowane w kolejnych rozdziałach.

7.2. Dokładność wykresów widoczności bazujących na wycinkach radialnych

W każdej metodzie przetwarzania danych, w tym w tworzeniu wykresów widoczności, jakakolwiek ingerencja w dane wiąże się ze zmianą dokładności wyników. Zjawisko to jest nieuniknione, jednak stosując odpowiednie techniki, można zminimalizować tę utratę. Podział chmury punktów na części radialne stanowi jeden z takich sposobów, który ogranicza błędy, a jednocześnie pozwala na efektywne przetwarzanie danych przestrzennych.

Aby dokładniej pokazać, jak podział radialny wpływa na dokładność wyników, przeprowadzono badanie porównawcze, w którym oceniano dokładność tworzenia wykresów widoczności zarówno przy zastosowaniu klasycznej metody NMPT, jak i metody podziału radialnego pełnej chmury punktów. W ramach tego badania porównano różnicę pikseli w stosunku do wykresu widoczności bazującego na chmurze punktów bez podziału, w celu zobrazowania wpływu obu metod na jakość wyników.

W Tabeli 6 przedstawiono wyniki wedle których różnica w liczbie widocznych pikseli między analizowanymi wykresami bazującymi na nie podzielonej chmurze punktów oraz podzielonej wynosi jedynie 103px natomiast w przypadku chmury niepodzielonej i NMPT wynosi 2842px co wskazuje na znaczną przewagę metody podziału radialnego nad wykorzystaniem NMPT. Natomiast pogłębiona analiza wykazała, że różnica bezwzględna – rozumiana jako suma lokalnych rozbieżności w rozmieszczeniu pikseli – jest znacznie większa i sięga 2349 (0,52%) pikseli w przypadku porównania metody bez podziału i metody z podziałem chmury punktów, oraz aż 5802 (1,27%) pikseli w zestawieniu z metodą NMPT.

Tabela 6 Porównanie dokładności wycinków radialnych

	Liczba widocznych px	Różnica widocznych px	Różnica bezwzględna (px)	Procent różnicy bezwzględnej
NMPT	13 502	103	5802	1,27%
PC podział radialny	10 557	2842	2349	0,52%
PC bez podziału	10 660		-	-

Na podstawie grafik Fig. 76 oraz Fig. 77 przeanalizowano wpływ tych różnic na jakość generowanych wykresów widoczności. W przypadku metody podziału radialnego rozbieżności mają postać pojedynczych, rozproszonych pikseli, które nie wpływają istotnie na ogólną geometrię wykresu i mogą być traktowane jako szum wynikający z interpolacji lub dyskretyzacji. Natomiast w przypadku metody NMPT, różnice przyjmują formę rozległych, skoncentrowanych skupisk, znacząco odbiegających od przebiegu referencyjnego. Taka deformacja prowadzi do błędnej interpretacji zasięgów widoczności i obniża wiarygodność analiz.

Błąd w przypadku podziału radialnego wynika z metody tworzenia powierzchni TIN opisanej w rozdziale 5. Metoda ta opiera się na łączeniu punktów chmury według algorytmu Delaunay'a, który generuje trójkąty. Połączenia w algorytmie Delaunay'a są deterministyczne, co oznacza, że na tych samych danych zawsze powstaje identyczna struktura siatki. W analizowanym przypadku problem pojawia się na etapie ograniczenia danych wejściowych jedynie do punktów należących do wycinka radialnego. Proces ten polega na wykorzystaniu punktów w określonym zakresie kątowym, co prowadzi do redukcji liczby punktów używanych w triangulacji. Wynikiem tej selekcji jest zmiana struktury siatki TIN, ponieważ w danym zakresie kątowym wykorzystywany jest inny punkt początkowy algorytmu Delaunay'a. W efekcie, generowana powierzchnia TIN różni się od tej, która powstałaby z pełnego zbioru danych, co skutkuje lokalnymi różnicami w wynikach analizy widoczności.

W świetle powyższych ustaleń, ocena jakości wykresów widoczności nie powinna opierać się wyłącznie na wartościach liczbowych, takich jak liczba różniących się pikseli. Kluczowe znaczenie ma analiza przestrzenna, ukazująca charakter i rozmieszczenie błędów, gdyż dopiero ona umożliwia kompleksową ocenę poprawności danego rozwiązania.

Pomimo że według prostego wskaźnika liczby rozbieżnych pikseli wykres utworzony na podstawie podziału chmury punktów jest ponad dwukrotnie dokładniejszy od wariantu NMPT, to jego zgodność topologiczna i przestrzenna z danymi referencyjnymi jest istotnie wyższa. Potwierdzają to jednoznacznie zaprezentowane wizualizacje (Fig. 76 ,Fig. 77), które ukazują różnice nie tylko ilościowe, ale przede wszystkim jakościowe.

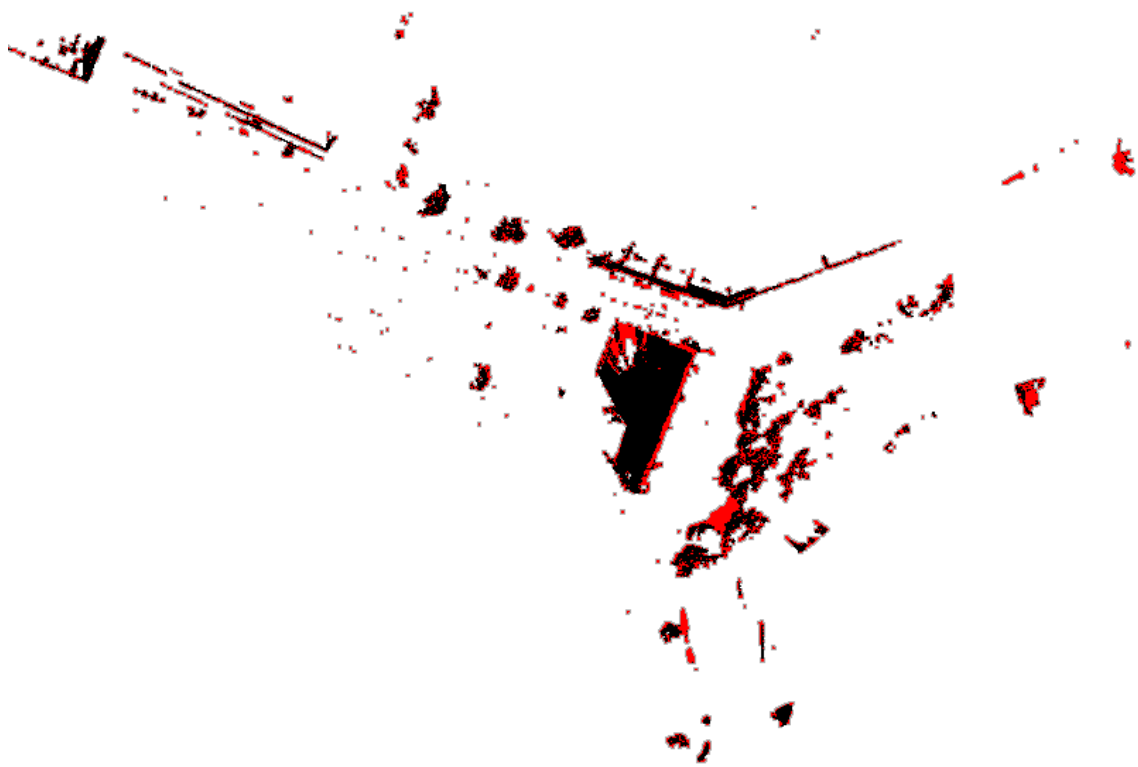


Fig. 76 Różnica wykresu widoczności bazującego na NMPT zaznaczona na czerwono z wykresem bazującym na pełnej chmurze punktów.



Fig. 77 Różnica wykresu widoczności bazującego na wycinkach radialnych chmury punktów zaznaczona na czerwono z wykresem bazującym na pełnej chmurze punktów.

7.3. Czas tworzenia wykresu widoczności na bazie wycinków radialnych

W celu przedstawienia wyników podziału chmury punktów obejmującej swoim zakresem zamek królewski na Wawelu, zawierającej 13 066 188 punktów, przeprowadzono badanie wydajności. Wyniki pokazały, że cały proces zajmuje łącznie 772,21 sekundy. Czas ten obejmuje wczytanie punktów do pamięci, podział na wycinki radialne oraz chmurę centralną, stworzenie częściowych powierzchni TIN, zapis, stworzenie renderingów, binaryzacja oraz złożenie wykresów częściowych w pełny wykres widoczności. Parametry komputera, na którym był tworzony wykres widoczności zostały przedstawione w Tabeli 7.

Tabela 7 Parametry komputera

Typ podzespołu	Parametry
Procesor	i7-11800H -Taktowanie 2.3GHz 8 rdzenie 16 wątków
RAM	32 GB DDR 4 3200MHz
Dysk	SSD prędkość odczytu 7450 MB/s, zapisu 6900 MB/s

8. ZMIANA STRUKTURY DANYCH

Struktury danych są jednym z najważniejszych zagadnień informatyki, ponieważ wpływają na sposób, w jaki systemy komputerowe radzą sobie z różnorodnymi operacjami przetwarzania zasobów. Każda struktura umożliwia organizację informacji w taki sposób, aby umożliwić efektywne przeprowadzanie operacji takich jak wyszukiwanie, wstawianie, usuwanie czy sortowanie. Właściwy dobór struktury danych nie tylko wpływa na wydajność systemu, ale również na jego zdolność do skalowania i radzenia sobie z rosnącą ilością informacji.

W praktyce, efektywne zarządzanie danymi wymaga zrozumienia kompromisów związanych z różnymi strukturami danych, ponieważ każda z nich optymalizuje pewne aspekty kosztem innych. Struktury te mogą być stosowane w szerokim zakresie aplikacji, od najprostszych algorytmów do najbardziej złożonych systemów. Dla programistów, analiza potrzeb i wymagań danej aplikacji jest kluczowa do podjęcia decyzji o tym, która struktura danych najlepiej pasuje do zadania.

W tym kontekście, znajomość różnych podejść do organizacji danych umożliwia budowanie rozwiązań, które są zarówno efektywne, jak i łatwe do utrzymania. Choć niektóre struktury są bardziej uniwersalne, inne sprawdzają się lepiej w określonych scenariuszach, gdzie ważna jest szybkość działania lub oszczędność pamięci.

8.1. Struktura danych chmury punktów.

Punkty w chmurze są przechowywane w kolejności, w jakiej zostały zeskanowane, co w przypadku lotniczego skanowania laserowego oznacza zapis w sekwencji odpowiadającej ich rejestracji podczas przelotu. Dane są gromadzone pasami, w kierunku lewo-prawo, zgodnie z trasą lotu. Ponieważ skanowanie obejmuje wiele przelotów, dane są zapisywane w zbiorach zgodnych z przyjętym podziałem sekcyjnym w danym układzie geodezyjnym, co skutkuje podziałem na kwadratowe sekcje, w których punkty są uporządkowane w rzędach. Taki sposób organizacji danych ma wiele wad. Punkty w pierwotnym formacie nie są łatwe do przetwarzania i sortowania, co utrudnia szybki dostęp do określonych fragmentów chmury punktów. Brak optymalnej struktury danych w wyjściowym formacie powoduje, że nie można w prosty sposób

selekcjonować punktów należących do wycinków radialnych, co znacznie ogranicza wydajność przetwarzania dużych zbiorów danych.

8.2. Analizowane struktury danych

8.2.1. Tablice

Tablice Fig. 78 są jedną z najprostszych i najbardziej fundamentalnych struktur danych, które przechowują informacje w sposób uporządkowany, umożliwiając szybki dostęp do elementów na podstawie ich indeksów [96]. Każdy element w tablicy jest przypisany do konkretnej pozycji (indeksu), co oznacza, że elementy te są przechowywane w pamięci w sposób ciągły. Dzięki temu dostęp do elementu o danym indeksie jest operacją o stałej złożoności czasowej $O(1)$, co czyni tablice wyjątkowo efektywnymi w sytuacjach, gdy potrzebny jest szybki dostęp do danych. Tablica nie została wybrana jako struktura docelowa chmury punktów, ponieważ nie oferuje wbudowanego mechanizmu przestrzennego porządkowania danych. Aby znaleźć punkty znajdujące się w określonym regionie przestrzeni trzeba przeszukać całą tablicę co jest czasochłonne.

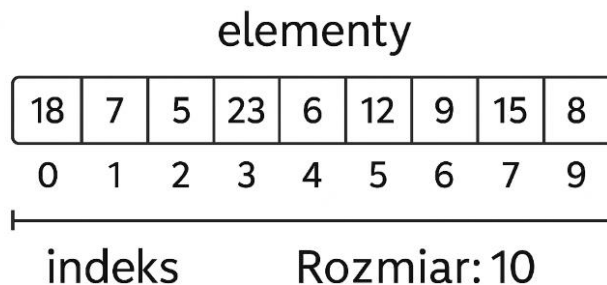


Fig. 78 Tablica

8.2.2. Listy

Listy Fig. 79 są dynamicznymi strukturami danych, które wyróżniają się elastycznością i możliwością dynamicznego zarządzania pamięcią. W przeciwieństwie do tablic o stałym rozmiarze, listy mogą zmieniać swoją długość w trakcie działania programu, co czyni je idealnymi do zastosowań, gdzie liczba elementów jest nieprzewidywalna. Każdy element listy, zwany węzłem, zawiera wartość oraz wskaźnik na kolejny element, umożliwiając efektywne dodawanie, usuwanie i modyfikowanie danych bez reorganizacji pamięci. W listach jednokierunkowych węzły wskazują na

kolejny element, natomiast w listach dwukierunkowych umożliwiają przemieszczanie się w obu kierunkach dzięki wskaźnikom na elementy poprzednie i następne. Listy cykliczne natomiast tworzą pętlę, gdzie ostatni element wskazuje na pierwszy. Operacje wstawiania lub usuwania elementów w znanej pozycji mają złożoność czasową $O(1)$, podczas gdy operacje wymagające przeszukania listy mają złożoność $O(n)$. Dzięki różnorodnym wariantom, takim jak listy dwukierunkowe czy cykliczne, można dostosować strukturę do konkretnych potrzeb, uzyskując optymalną wydajność w zależności od rodzaju operacji. Lista wymaga sekwencyjnego przechodzenia przez elementy. Jeśli chcemy porównać lub wymienić elementy podczas sortowania, musimy przejść przez całą listę od początku do danego węzła, z tego powodu lista nie została wybrana jako struktura docelowa chmury

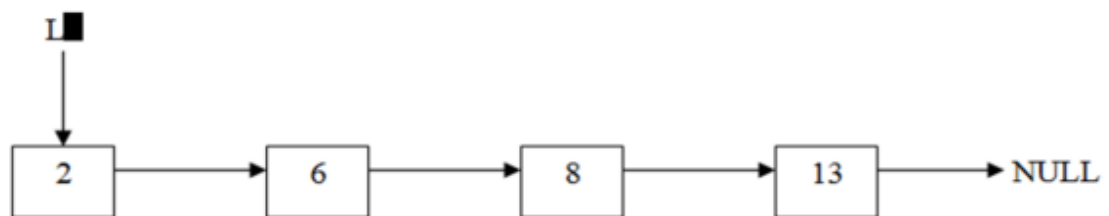


Fig. 79 Lista [97]

8.2.3. Stosy

Stosy Fig. 80 [96] to struktury danych, które działają na zasadzie LIFO (Last In, First Out), co oznacza, że ostatni element, który został dodany do stosu, jest pierwszym, który zostanie z niego usunięty. Stos można porównać do stosu talerzy – talerz dodany jako ostatni będzie pierwszym, który zostanie usunięty. Stosy znajdują szerokie zastosowanie w zarządzaniu pamięcią, np. w stosie wywołań funkcji, a także w algorytmach, takich jak przeszukiwanie grafów, parsowanie wyrażeń czy obsługa rekursji.

Złożoność obliczeniowa operacji na stosie jest bardzo korzystna, ponieważ wszystkie operacje odbywają się na szczycie stosu, co eliminuje potrzebę przeszukiwania innych elementów. Dzięki temu zarówno operacja push (dodanie elementu na szczyt), jak i pop (usunięcie elementu ze szczytu) mają złożoność czasową $O(1)$, co oznacza, że są wykonywane w stałym czasie, niezależnie od liczby elementów w stosie. Jako że w stosie można odczytać tylko ostatnio dodany punkt co ogranicza jego funkcjonalność w kwestii

przechowywani punktów, nie został on wybrany jako struktura docelowa chmury punktów.

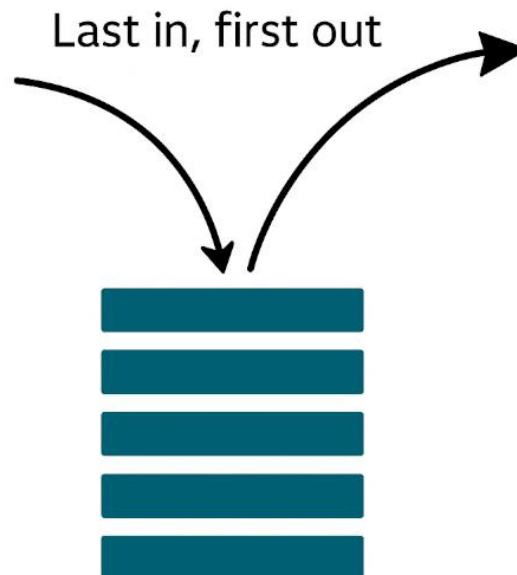


Fig. 80 Stos

8.2.4. Kolejki

Kolejki Fig. 81 [96] operują na zasadzie FIFO (First In, First Out), co oznacza, że pierwszy element, który został dodany, jest również pierwszym, który zostanie usunięty. Ta zasada działania przypomina kolejkę ludzi oczekujących na obsługę, gdzie osoba, która pierwsza ustawiła się w kolejce, jest obsługiwana jako pierwsza. Struktura ta znajduje szerokie zastosowanie w systemach informatycznych, szczególnie w systemach kolejkowania zadań, gdzie procesy są obsługiwane zgodnie z kolejnością ich zgłoszenia oraz w algorytmach przeszukiwania, takich jak przeszukiwanie wszerz (Breadth-First Search, BFS), które wykorzystuje kolejki do eksploracji węzłów w grafie. jako że w kolejce można odczytać tylko punkt dodany jako pierwszy, co wymagałoby zdejmowania wszystkich punktów ze stosu w celu jego przeszukania, nie została ona wybrana jako struktura docelowa dla chmury punktów.

Last in, Last out



Fig. 81 Kolejka

8.2.5. Grafy

Grafy Fig. 82 [96], zarówno skierowane, jak i nieskierowane, są strukturami danych, które składają się z wierzchołków (nazywanych również węzłami) połączonych krawędziami. W przypadku grafów skierowanych krawędzie mają przypisany kierunek, co oznacza, że relacja między dwoma wierzchołkami jest asymetryczna – istnieje krawędź prowadząca z jednego wierzchołka do drugiego, ale niekoniecznie odwrotnie. Natomiast w grafach nieskierowanych krawędzie nie mają przypisanego kierunku, a relacja między wierzchołkami jest dwustronna. Grafy umożliwiają modelowanie złożonych relacji i zależności pomiędzy elementami, co czyni je jedną z najważniejszych struktur danych w informatyce i matematyce dyskretnej.

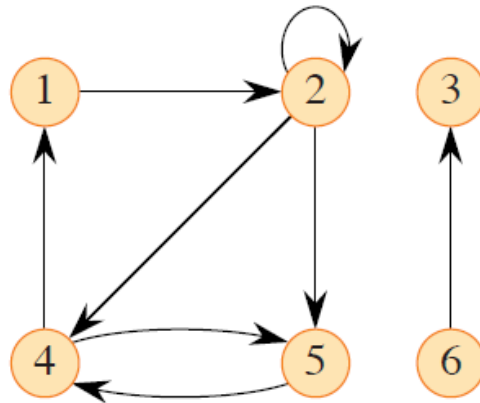


Fig. 82 Graf [96]

Zastosowania grafów są niezwykle szerokie i obejmują zarówno dziedziny teoretyczne, jak i praktyczne. Przykładami są analiza sieci społecznych, gdzie wierzchołki reprezentują użytkowników, a krawędzie – ich wzajemne powiązania (np. przyjaźń lub obserwowanie), oraz sieci komputerowe, w których grafy mogą modelować urządzenia i połączenia między nimi. Grafy znajdują również zastosowanie w wielu algorytmach, zwłaszcza algorytmach przeszukiwania (BFS - breadthfirst search i DFS - Depth First Search), które pozwalają na efektywne poruszanie się po strukturze grafu i znajdowanie konkretnych ścieżek lub komponentów. Jednym z szczególnych przypadków grafów jest drzewo, które zostało opisane poniżej

8.2.6. Drzewa

Drzewa [96] [98] to fundamentalne struktury danych w informatyce, składające się z węzłów, gdzie każdy węzeł może mieć jedno lub więcej dzieci, a cały zbiór węzłów tworzy hierarchiczną strukturę. Drzewo zaczyna się od korzenia, który jest głównym węzłem nieposiadającym rodzica, a każda krawędź prowadzi od rodzica do jego dziecka. Drzewa są idealne do reprezentowania struktur hierarchicznych, takich jak systemy plików, drzewa genealogiczne, a także do modelowania złożonych relacji. Są one również podstawą wielu algorytmów sortowania i wyszukiwania.

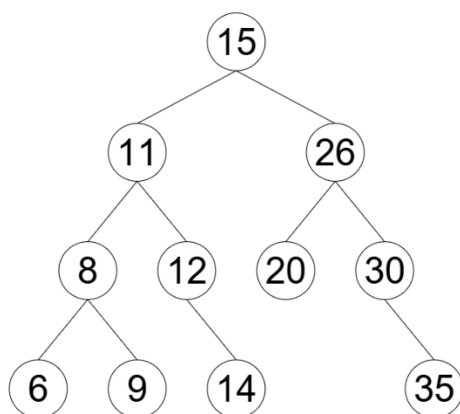


Fig. 83 Drzewo - struktura danych

Drzewa składają się z kilku podstawowych elementów: korzenia, czyli węzła bez rodzica, węzłów, które mogą mieć dzieci, oraz liści, które są węzłami bez potomków. Krawędzie to połączenia między węzłami, najczęściej między rodzicem a dzieckiem. Ważną cechą drzew jest ich rekurencyjna struktura – każde poddrzewo jest samo w sobie drzewem, co sprawia, że algorytmy przetwarzające drzewa mogą być efektywnie realizowane za pomocą rekurencji.

Każda z tych struktur danych ma swoje zalety i wady, które determinują ich zastosowanie w różnych kontekstach. W prezentowanej pracy konieczne było wybranie struktury, która najlepiej pozwoli na szybkie ograniczanie liczby elementów w chmurze punktów w celu wyznaczenia wycinka radialnego. Po analizie różnych możliwości, wybrane zostały drzewa. Dzięki swojej uniwersalności, szybkości działania oraz elastyczności, drzewa oferują szeroki wachlarz możliwości dopasowania do podziału chmury punktów na wycinki radialne. Wybór drzew jako podstawy do tego zadania wynika z ich zdolności do wydzielania poddrzew i ich odrzucania, co gwarantuje zmniejszenie liczby przeszukiwanych punktów. Dodatkowo, drzewa cechują się efektywnym zarządzaniem danymi oraz możliwością szybkiego dostępu do złożonych poddrzew.

8.3. Różne struktury drzew

Wybór odpowiedniego typu drzewa do konkretnego problemu informatycznego jest kluczowy, ponieważ ma znaczący wpływ na efektywność przetwarzania danych. Drzewa jako jedno z najczęściej stosowanych struktur danych, oferują różne mechanizmy organizacji i operacji na danych, które można dostosować do konkretnych potrzeb. Z tego

powodu analiza wymagań problemu jest niezbędna, aby określić, które cechy struktury drzewa najlepiej odpowiadają na dany problem. Ważnymi aspektami są typ danych, które mają być przechowywane w drzewie, oraz charakter operacji, które będą na nich wykonywane. Optymalne dobranie drzewa pozwala na przyspieszenie operacji wyszukiwania, wstawiania czy usuwania danych, a także redukcję złożoności obliczeniowej i zużycia zasobów.

Jednym z istotnych czynników, który należy uwzględnić, jest efektywność operacji wyszukiwania. Niektóre drzewa oferują szybki dostęp do danych, co może być kluczowe w przypadku dużych zbiorów, gdzie operacje na danych muszą być przeprowadzane w krótkim czasie. Jednak inne struktury mogą oferować lepszą wydajność przy operacjach aktualizacji, co może być bardziej przydatne, gdy dane często się zmieniają. Ważne jest także zrozumienie struktury danych, które będą przechowywane – w zależności od tego, czy są to dane jednowymiarowe, wielowymiarowe, czy też mają złożoną strukturę, różne drzewa będą miały różne zalety i ograniczenia. Dlatego proces wyboru odpowiedniego drzewa wymaga dokładnej analizy problemu, aby dostosować mechanizmy drzewa do wymagań dotyczących danych i operacji.

Podczas analizy różnych typów drzew do przechowywania danych w postaci punktów przestrzennych, rozważono wiele struktur, takich jak drzewa czwórkowe, ósemkowe, AVL, Splay, czerwono-czarne, B-drzewa, drzewa przedziałowe, kD drzewa i inne. Część z tych struktur okazała się nieodpowiednia dla zadania, co doprowadziło do ich eliminacji.

8.3.1. Drzewa nieodpowiednie do zadania

1. **Drzewa BST** -[96] Binarne drzewo poszukiwań to struktura danych ułożona w formie hierarchicznej, gdzie każdy węzeł zawiera klucz oraz opcjonalnie dane dodatkowe, zwane danymi satelitarnymi. Dodatkowo, każdy węzeł posiada atrybuty *left* *right* oraz *p*, które wskazują odpowiednio na lewego potomka, prawego potomka oraz rodzica danego węzła. Jeśli dany węzeł nie ma określonego potomka lub rodzica, odpowiedni wskaźnik przyjmuje wartość NIL. Całe drzewo ma atrybut *root*, który wskazuje na korzeń drzewa, lub przyjmuje wartość NIL, jeśli drzewo jest puste.

Kluczową właściwością BST jest sposób przechowywania kluczy w węzłach, który musi spełniać zasadę porządku drzewa binarnego poszukiwań: dla każdego węzła x , wszystkie klucze w jego lewym poddrzewie są mniejsze niż klucz w x , a wszystkie klucze w prawym poddrzewie są większe niż klucz w x . Dzięki tej właściwości BST umożliwia efektywne wykonywanie operacji takich jak wyszukiwanie, wstawianie i usuwanie elementów, co czyni go jedną z podstawowych struktur danych w algorytmach i programowaniu.

Podstawowe operacje na BST mają czas działania proporcjonalny do wysokości drzewa. W przypadku pełnego drzewa binarnego o n węzłach operacje te wykonują się w najgorszym przypadku w czasie $O(\log n)$. Jednakże, jeśli drzewo przyjmuje postać liniowego łańcucha (np. w wyniku wstawiania elementów w kolejności rosnącej), operacje mają złożoność $O(n)$. Istnieją jednak warianty drzew, takie jak drzewa czerwono-czarne, które gwarantują wysokość $O(\log n)$ niezależnie od porządku wstawiania kluczy. Co więcej, w przypadku losowego zestawu n kluczy wysokość BST wynosi średnio $O(\log n)$, nawet bez stosowania metod ograniczających jego wysokość.

BST umożliwia dodatkowo przejście przez węzły drzewa w sposób uporządkowany, co pozwala na wypisanie wartości w kolejności rosnącej. Możliwe jest także efektywne wyszukiwanie, znajdowanie ekstremalnych wartości (minimum, maksimum), określanie poprzedników i następców, a także wstawianie i usuwanie elementów. Podstawowe matematyczne właściwości drzew zostały szczegółowo opisane w literaturze algorytmicznej. Dzięki tej wszechstronności BST znajduje szerokie zastosowanie w implementacji algorytmów i struktur danych w praktycznych problemach programistycznych.

Drzewo BST nie jest odpowiednią strukturą do przechowywania punktów w przestrzeni wielowymiarowej, takich jak punkty w chmurach punktów, głównie ze względu na swoją konstrukcję, która opiera się na porządkowaniu elementów według jednego klucza. Przy przechowywaniu punktów w przestrzeni wielowymiarowej, takich jak punkty w układzie 2D lub 3D, wymagałoby to sprowadzenia współrzędnych każdego punktu do jednej wartości kluczowej, co zniekształca naturalny porządek przestrzenny danych.

2. **Drzewa AVL** –[96]to zrównoważone drzewa binarne (BST), zoptymalizowane do przechowywania danych w jednym wymiarze. Charakteryzują się wysoką wydajnością w operacjach wyszukiwania, wstawiania i usuwania danych liczbowych, ponieważ ich struktura zapewnia równowagę, w której różnica wysokości między lewym a prawym poddrzewem każdego węzła wynosi maksymalnie 1. Dzięki temu wysokość drzewa AVL wynosi w przybliżeniu $O(\log n)$ co przekłada się na efektywność operacji. Aby zachować tę równowagę, w każdym węźle przechowuje się dodatkowy atrybut h określający jego wysokość. Jednak drzewo AVL jest mniej wydajne w przypadku danych wielowymiarowych, co sprawia, że nie nadaje się do przechowywania punktów w przestrzeni.
3. **Drzewa czerwono-czarne** – [96]to samoorganizujące się drzewa binarne, wykorzystywane głównie w sytuacjach, gdzie wymagane jest szybkie wyszukiwanie i wstawianie danych jednowymiarowych. Drzewo czerwono-czarne jest drzewem wyszukiwania binarnego, w którym każdy węzeł zawiera dodatkowy bit pamięci, oznaczający jego kolor – CZERWONY lub CZARNY. Ograniczając kolory węzłów na każdej prostej ścieżce od korzenia do liścia, drzewa te zapewniają, że żadna z tych ścieżek nie jest dłuższa niż dwukrotność długości innej ścieżki, co sprawia, że drzewo jest w przybliżeniu zrównoważone. Wysokość drzewa czerwono-czarnego z n kluczami wynosi co najwyżej $2\log(n) + 1$, co daje złożoność $O(\log n)$. Każdy węzeł drzewa ma atrybuty: kolor, klucz, lewy, prawy oraz rodzic (p). Jeśli dziecko lub rodzic węzła nie istnieje, odpowiedni wskaźnik ma wartość NIL, która pełni funkcję liści drzewa wyszukiwania binarnego, podczas gdy węzły zawierające klucze są węzłami wewnętrznymi. Drzewo czerwono-czarne posiada kilka istotnych właściwości: każdy węzeł jest czerwony lub czarny, korzeń jest czarny, każdy liść (NIL) jest czarny, jeśli węzeł jest czerwony, to jego dzieci są czarne, a każda ścieżka od węzła do jego liści potomnych zawiera tę samą liczbę czarnych węzłów. Mimo tych zalet drzewa czerwono-czarne nie nadają się do przechowywania danych wielowymiarowych, takich jak punkty w przestrzeni, ponieważ jest przeznaczone dla jednowymiarowych danych uporządkowanych według pojedynczego klucza.
4. **B-drzewa** –[96]to zbalansowane drzewa wyszukiwania zaprojektowane tak, aby działały dobrze na dyskach twardych lub innych urządzeniach pamięci

z bezpośrednim dostępem (secondary storage). Wiele systemów bazodanowych wykorzystuje B-drzewa lub ich warianty do przechowywania dużych ilości danych, gdzie struktura drzewa musi utrzymać porządek w dużych zbiorach informacji. B-drzewa różnią się od drzew czerwono-czarnych tym, że ich węzły mogą mieć wielu potomków, co pozwala na efektywne operacje na danych uporządkowanych w sposób liniowy. „Współczynnik rozgałęzienia” B-drzewa może być bardzo duży, co minimalizuje liczbę operacji dyskowych i przyspiesza przetwarzanie danych. Każde B-drzewo ma wysokość $O(\log n)$, a większy współczynnik rozgałęzienia sprawia, że jego wysokość jest mniejsza niż w przypadku drzew czerwono-czarnych. Jednak B-drzewa zostały zaprojektowane z myślą o operacjach na danych uporządkowanych liniowo, a nie przestrzennie, dlatego nie nadają się do przechowywania punktów ani analizy przestrzennej.

5. **Drzewa przedziałowe**–[96] są używane głównie do przechowywania przedziałów liczbowych, co sprawia, że są idealne w kontekście operacji na zakresach danych. Nie obsługują jednak danych punktowych, gdzie potrzebne są bardziej złożone operacje na współrzędnych w przestrzeni.
6. **Drzewa Trie** – [99] to struktura poszukiwań, która przechowuje w węzłach fragmenty kluczy, w przeciwieństwie do „zwykłych” drzew poszukiwań, takich jak BST czy AVL, które przechowują w węzłach całe klucze. Taka konstrukcja pozwala przyspieszyć wyszukiwanie, szczególnie gdy porównanie całego klucza jest kosztowne. Drzewa trie są najlepiej przystosowane do kluczy reprezentowanych jako ciąg elementów skończonego alfabetu, co sprawia, że znajdują zastosowanie m.in. w sprawdzaniu poprawności pisowni i dzieleniu wyrazów. Drzewo Trie, czyli ukorzenione drzewo krawędziowo-etykietowane, w którym każda krawędź jest oznaczona pojedynczym symbolem, a punkty końcowe ścieżki muszą być względem siebie w relacji potomek/przodek, efektywnie wspiera takie operacje. Drzewa Trie nie są jednak zaprojektowane do obsługi danych przestrzennych, takich jak punkty w przestrzeni 2D lub 3D, ponieważ operują na ciągach znaków, a nie na współrzędnych.
7. **Drzewa Radix** – drzewa Radix są strukturami przeznaczonymi do operowania na bitach wyszukiwanego klucza. Drzewo takie jest rozgałęziane nie według

wartości elementów, a według wartości bitów poszukiwanych słów. Stosuje się je w algorytmach kompresji i wyszukiwania słów, ale ich struktura nie jest przystosowana do przetwarzania danych geometrycznych.

8. **Drzewa Cartesian** – drzewa kartezjańskie [100], są strukturami binarnymi powiązаныmi z sekwencją liczb, które oznaczają węzły drzewa. Struktura ta działa zarówno jako kopiec, z najmniejszym elementem w korzeniu, jak i umożliwia odtworzenie pierwotnej sekwencji liczb podczas symetrycznego przejścia drzewa. Drzewa kartezjańskie mają wiele zastosowań, na przykład w wyszukiwaniu przedziałowym, gdzie pozwalają na efektywne realizowanie zapytań o minimalny element w przedziale za pomocą Najniższego Wspólnego Przodka w drzewie. Są one również stosowane w metodach sortowania, które wykorzystują częściowo posortowane podsekwencje. Ich podstawową zaletą jest efektywne przechowywanie uporządkowanych danych jednowymiarowych, takich jak liczby, co sprawia, że są szczególnie skuteczne w zadaniach sortowania. Niemniej jednak, ze względu na swoją konstrukcję, drzewa kartezjańskie nie nadają się do operacji na danych wielowymiarowych, takich jak przechowywanie punktów przestrzennych.
9. **Drzewa decyzyjne** – [101] będąc popularnym podejściem predykcyjnym, wykorzystują strukturę drzewa, aby przechodzić od wyników dotyczących danego elementu do wniosków na temat wartości docelowej tego elementu. Choć znajdują szerokie zastosowanie w uczeniu maszynowym, zwłaszcza w klasyfikacji i regresji, działają one na danych hierarchicznych i podzielnych, a nie bezpośrednio na rzeczywistych punktach przestrzennych. Ze względu na swoją strukturę, drzewa decyzyjne nie są zoptymalizowane do pracy z danymi geometrycznymi w przestrzeni, co sprawia, że nie są odpowiednie do analiz punktów przestrzennych.
10. **Drzewa Merkle** – [102] jest to struktura danych oparta na zbiorze obiektów danych, która wykorzystuje kryptograficzne skróty w celu zagwarantowania ich integralności. Drzewa Merkle są często stosowane w systemach blockchain w celu zapewnienia autentyczności transakcji przechowywanych w bloku. Podstawowa idea tej struktury polega na oznaczaniu każdego węzła wartością kryptograficznego hasha, która jest wyprowadzana rekurencyjnie z hashów jego

dzieci. Drzewa Merkle są używane głównie w kryptografii i systemach blockchain do weryfikacji integralności danych, działając na zasadzie przechowywania skrótów. Ich struktura jest zoptymalizowana do przechowywania kryptograficznych hashy, a nie współrzędnych punktów. Dlatego też nie nadają się one do przechowywania i analizy danych przestrzennych, takich jak współrzędne punktów.

11. **Drzewo BSP** (*Binary Space Partition*) to struktura danych w formie drzewa binarnego, służąca do hierarchicznego podziału przestrzeni za pomocą hiperpłaszczyzn (prostych w 2D lub płaszczyzn w 3D). Jego celem jest efektywne zarządzanie informacją o kształtach wielokątów, brył i scen trójwymiarowych. Proces budowy drzewa BSP polega na podziale obiektów geometrycznych na rozłączne części względem hiperpłaszczyzn, przy czym obiekty leżące w całości po jednej stronie są przypisywane do jednego z poddrzew, a obiekty przecinające hiperpłaszczyznę są dzielone, zwykle na trójkąty. Drzewo BSP nie zostało zastosowane do przetwarzania chmur punktów, ponieważ jego struktura jest przeznaczona głównie do dzielenia przestrzeni opartych na wyraźnych podziałach geometrycznych, takich jak płaszczyzny lub powierzchnie. W przypadku chmur punktów, które składają się z nieregularnie rozmieszczonych punktów w przestrzeni trójwymiarowej, BSP nie zapewnia efektywnego podziału, ponieważ sekcje chmur punktów wykorzystywane w analizie zazwyczaj mają prostokątny kształt. W takiej sytuacji drzewa BSP prowadziłyby do nierównomiernego podziału, a struktura drzewa mogłaby rozrastać się jednostronnie, powodując problemy z równowagą i efektywnością wyszukiwania. To z kolei znacząco obniżałoby wydajność obliczeń zdolność do przetwarzania dużych zestawów danych.

8.3.2. Drzewa brane pod uwagę

8.3.2.1. Drzewo czwórkowe

Drzewo czwórkowe (quadtree) [103] jest dwuwymiarową strukturą danych, która dzieli przestrzeń na cztery równe części na każdym poziomie podziału. Jest szczególnie przydatne do zarządzania i przechowywania punktów w przestrzeniach dwuwymiarowych. Proces tworzenia drzewa czwórkowego polega na rekurencyjnym dzieleniu przestrzeni na cztery równe części. Podział przestrzeni został zaprezentowany

na grafice Fig. 84. Z kolei na grafice Fig. 85 przedstawiono drzewo czwórkowe dla danego podziału.

Punkty w przestrzeni dwuwymiarowej są podzielone względem węzłów drzewa czwórkowego, gdzie każdy węzeł dzieli punkty na cztery podzbiory. Podział ten jest wykonywany na podstawie współrzędnych X i Y , tworząc cztery równe przedziały w przestrzeni. Punkty znajdujące się w jednym z tych przedziałów są przypisane do odpowiedniego poddrzewa.

Drzewo czwórkowe zostało odrzucone jako struktura podziału chmury punktów ze względu na sposób, w jaki dzieli przestrzeń, opierając się na środku przestrzeni wyznaczonej przez punkty. Podział według środka przestrzeni prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia punktów w poszczególnych poddrzewach, co oznacza, że liczba punktów w każdej części może się znacznie różnić.

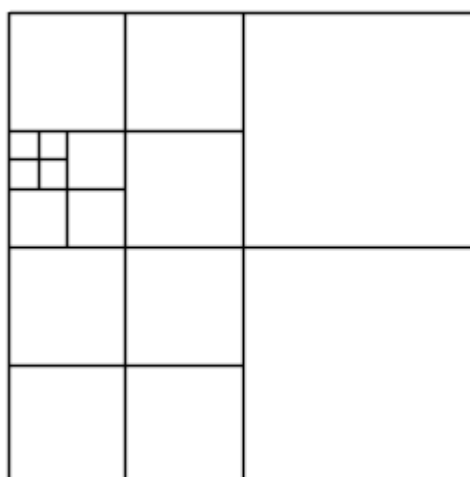


Fig. 84 Podział przestrzeni na równe kwadratowe części

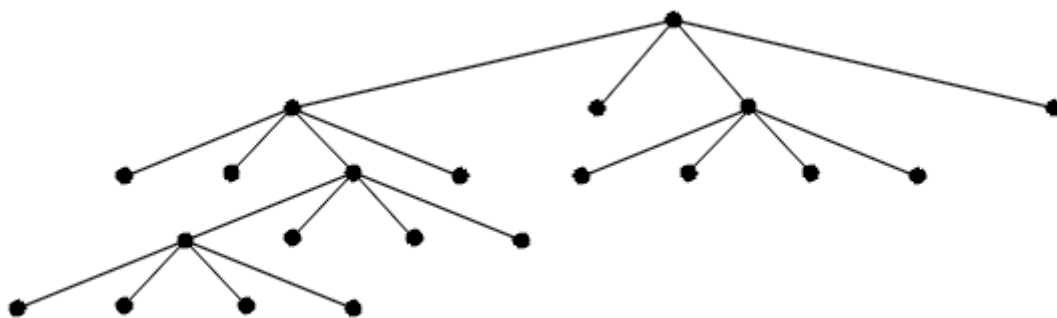


Fig. 85 Drzewo czwórkowe

8.3.2.2. Drzewo ósemkowe

Drzewo ósemkowe (octree) [104] jest trójwymiarową strukturą danych, która dzieli przestrzeń na osiem równych części na każdym poziomie podziału. Jest szczególnie przydatne do zarządzania i przechowywania punktów w przestrzeniach trójwymiarowych. Proces tworzenia drzewa ósemkowego polega na rekurencyjnym dzieleniu przestrzeni na osiem równych części (okta), co jest analogiczne do procesu dzielenia przestrzeni w drzewach czwórkowych, ale z dodatkowym wymiarem. Punkty w przestrzeni trójwymiarowej są podzielone względem węzłów drzewa ósemkowego, gdzie każdy węzeł dzieli punkty na osiem podzbiorów. Podział ten jest wykonywany na podstawie współrzędnych X, Y i Z, tworząc osiem równych przedziałów w przestrzeni. Punkty znajdujące się w jednym z tych przedziałów są przypisane do odpowiedniego poddrzewa. Podział przestrzeni został zaprezentowany na grafice Fig. 86. Z kolei na grafice przedstawiono drzewo ósemkowe dla danego podziału Fig. 87.

Drzewo ósemkowe byłoby dobrym rozwiązaniem, gdyby brano pod uwagę wszystkie trzy współrzędne. W przyjętym w tej pracy rozwiązaniu wystarczające jest jednak podzielenie przestrzeni trójwymiarowej w rzucie dwuwymiarowym, dlatego to drzewo zostało odrzucone.

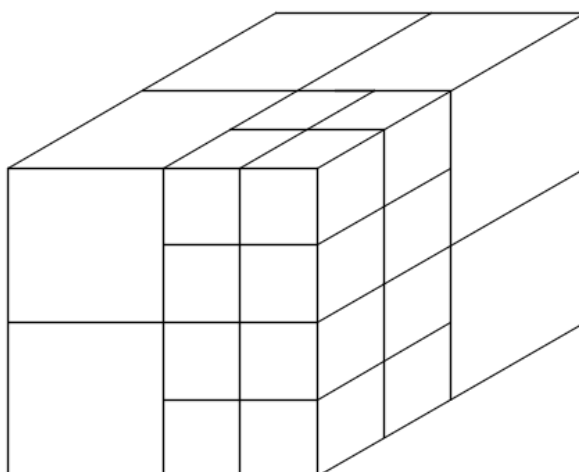


Fig. 86 Podział sześcianu



Fig. 87 Drzewo ósemkowe

8.3.2.3. Drzewa *kD*

Drzewa *kD* (*k*-dimensional trees) [105] są efektywnymi strukturami danych do przechowywania punktów w przestrzeniach wielowymiarowych. W informatyce określa się je jako drzewa *k*-wymiarowe i są one jednym z przedstawicieli drzew binarnych. Tworzenie tego typu drzewa polega na podziałach zbioru punktów względem węzłów drzewa, z których każdy dzieli punkty na podzbiory. W przypadku drzew dwuwymiarowych, podziału dokonuje się wedle osi, a w przypadku drzew trójwymiarowych wedle płaszczyzn. Punkty po lewej stronie reprezentują lewe poddrzewo, a punkty po prawej stronie prawe poddrzewo.

Kolejność wykonywania podziałów polega na wyborze mediany względem osi lub płaszczyzn. Na przykład, w przypadku drzew 2D Fig. 88, podział następuje na przemian według osi *X* i osi *Y*. Wymiar *kD* drzewa nie jest z góry określony – mogą to być drzewa 2D, 3D itp. Tego rodzaju drzewa są uniwersalne i generowane dla całej

chmury, co umożliwia wybór dowolnego punktu jako punktu centralnego podziału, czego nie zapewniało drzewo BST. Taki sposób podziału zapewnia równomierne rozłożenie danych, co jest szczególnie ważne w zadaniach związanych z przetwarzaniem dużych zbiorów punktów, takich jak analiza chmur punktów.

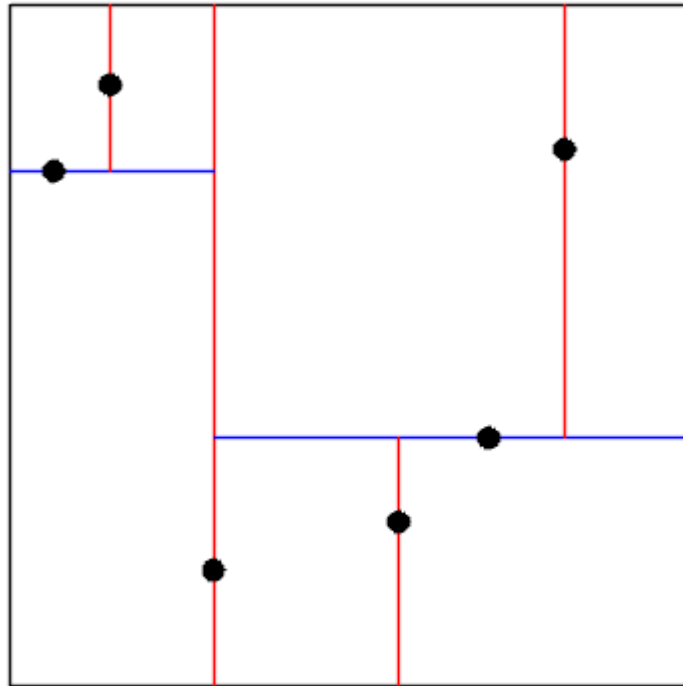


Fig. 88 kD drzewo

kD drzewo działa podobnie do drzewa czwórkowego, które dzieli przestrzeń na cztery części. Jednak w przeciwieństwie do drzewa czwórkowego, kD-drzewo dokonuje podziału według mediany, co gwarantuje, że maksymalna różnica liczby punktów między poddrzewami wynosi 1. Dzięki temu kD drzewa są bardziej efektywne w zarządzaniu danymi i umożliwiają równomierny podział przestrzeni, co czyni je idealnym rozwiązaniem dla zadanego problemu. Wybór kD drzewa również daje możliwość zastosowania wielu metod zrównoleglenia procesu generowania wycinków radialnych dla różnych kątów, co przyspiesza pracę na całej chmurze punktów. Fig. 89, Fig. 90, Fig. 91, Fig. 92 prezentują kolejne kroki tworzenia kD drzewa.

Dzięki wszystkim zaletom wymienionego drzewa i równomiernemu podziałowi przestrzeni na poddrzewa, do zadanego problemu zostało wybrane kD drzewo.



Fig. 89 Przykładowa chmura punktów zrzutowana na płaszczyznę XY

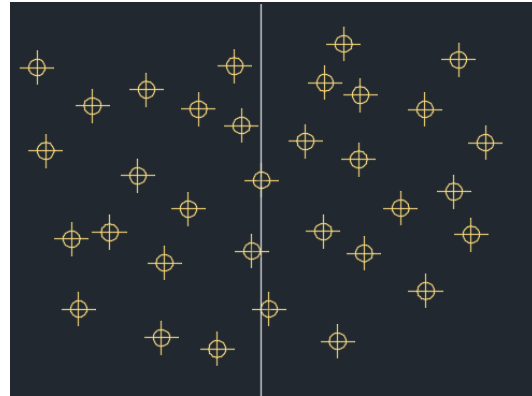


Fig. 90 Chmura punktów podzielona pionową osią przechodzącą przez punkt znajdujący się w medianie wyznaczonej po osi X



Fig. 91 Kolejny podział wedle punktów znajdujących w medianach dla lewego i prawego poddrzewa wyznaczonych po osi Y

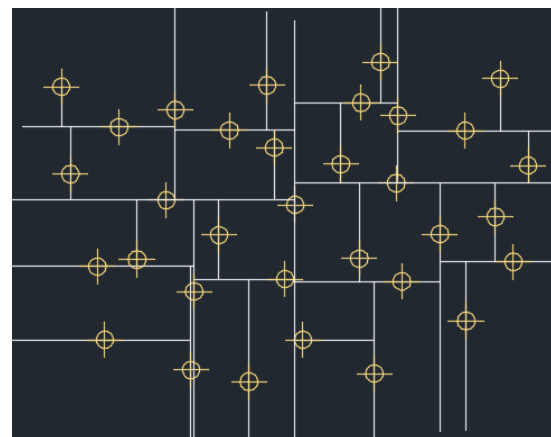


Fig. 92 Powtórzenie poprzednich kroków dla wszystkich poddrzew

9. ALGORYTM ODRZUCANIA PODDRZEW W KD DRZEWIE.

Wykorzystanie struktury kD drzewa bez zastosowania dodatkowego algorytmu nie zapewnia przyspieszenia podziału chmury punktów na radialne wycinki. Samo kD drzewo, dzięki swojej strukturze, umożliwia szybki podział chmury punktów na mniejsze części przestrzeni, jednak podziały te zawsze są prostokątne i wyznaczone przez mediany współrzędnych. Taka charakterystyka ogranicza jego zastosowanie w sytuacjach, gdzie wymagane jest podzielenie przestrzeni na bardziej złożone kształty, takie jak wycinki radialne. Żadna z funkcjonalności kD drzewa nie pozwala na efektywne operacje z podziałem przestrzeni na regiony o nieregularnych granicach. Jednakże ta struktura ułatwia ograniczanie zbiorów punktów poddawanych segmentacji radialnej.

Jak wcześniej zostało zaznaczone danymi wejściowymi jest chmura punktów, czyli zbiór punktów, z informacjami o współrzędnych, jasności i kolorze. Celem jest wybranie z chmury punktów radialnego wycinka w cylindrycznym układzie współrzędnych Fig. 93. Wycinki ułożone są na płaszczyźnie XY, współrzędna Z nie jest brana pod uwagę. Struktura chmury zostaje zamieniona na kD Drzewo, przy czym pod uwagę brane są jedynie współrzędne X oraz Y na podstawie których wyliczane są współrzędne cylindryczne. Jest to zatem 2D drzewo.

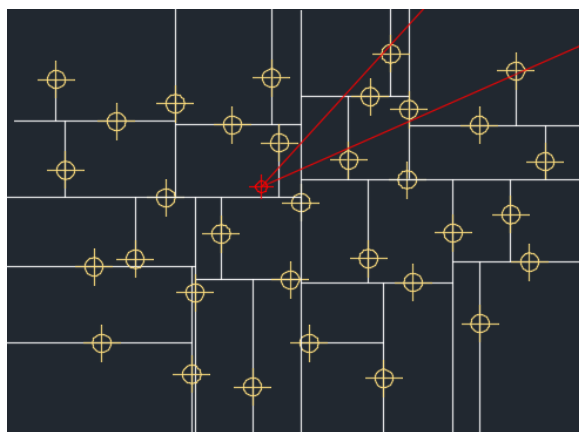


Fig. 93 Chmura punktów z zaznaczonymi osiami podziału 2D-drzewa z określonym punktem środka podziału radialnego wraz z zaznaczonymi kierunkami podziału 30 i 50 stopni.

Aby podział chmury punktów na radialne wycinki miał sens przyjmuje się dość wąskie ich zakresy. Wówczas kąty kierunkowe max i min są blisko siebie, co powoduje,

że duże części przestrzeni w ogóle nie muszą być rozpatrywane przy zaliczaniu punktów do wycinka. Odrzucanie tych punktów w znacznym stopniu przyspiesza algorytm wyznaczania wycinków. W zależności od tego w którą stronę skierowany jest wycinek, istnieją różne reguły odrzucania poddrzew zawierających zbędne punkty. Zaproponowany w tej pracy algorytm formułuje te reguły, w których kluczowymi punktami wyznaczającymi odrzucane poddrzewa są szczególne narożniki znajdujące się na przecięciu osi podziału kD drzewa.

9.1. Opis algorytmu odrzucającego poddrzewa

W tym akapicie została dokładnie opisana metoda wstępnego odrzucania poddrzew ilustrowana rysunkami zawierającymi jedynie istotne punkty.

W przypadku, kiedy oba kierunki podziału wycinka znajdują się pomiędzy kątami 0 a 90 stopni, odrzucane są wszystkie punkty, które znajdują się pod poziomą osią podziału kD drzewa (A), która jest najbliższa niższa punktu podziału radialnego oraz wszystkie punkty, które są w lewo od pionowej osi podziału kD drzewa (2), znajdującej się po lewej stronie od tego punktu Fig. 94.

Odrzucenie kolejnego poddrzewa zaznaczonego na zielono Fig. 94 wymaga sprawdzenia czy jego lewy, górny narożnik (1B) nie zawiera się w zakresie wycinka. Współrzędne tego punktu 1B wynikają ze współrzędnej X osi 1 dzielącej drzewo na część prawą i lewą oraz ze współrzędnej Y osi B dzielącej prawe poddrzewo na część górną i dolną. Kąt kierunku wyznaczonego pomiędzy punktem środka podziału radialnego z punktem 1B nie zawiera się w zakresie wycinka, dlatego wszystkie punkty na prawo od osi (1) i w dół od osi (B) mogą być odrzucone.

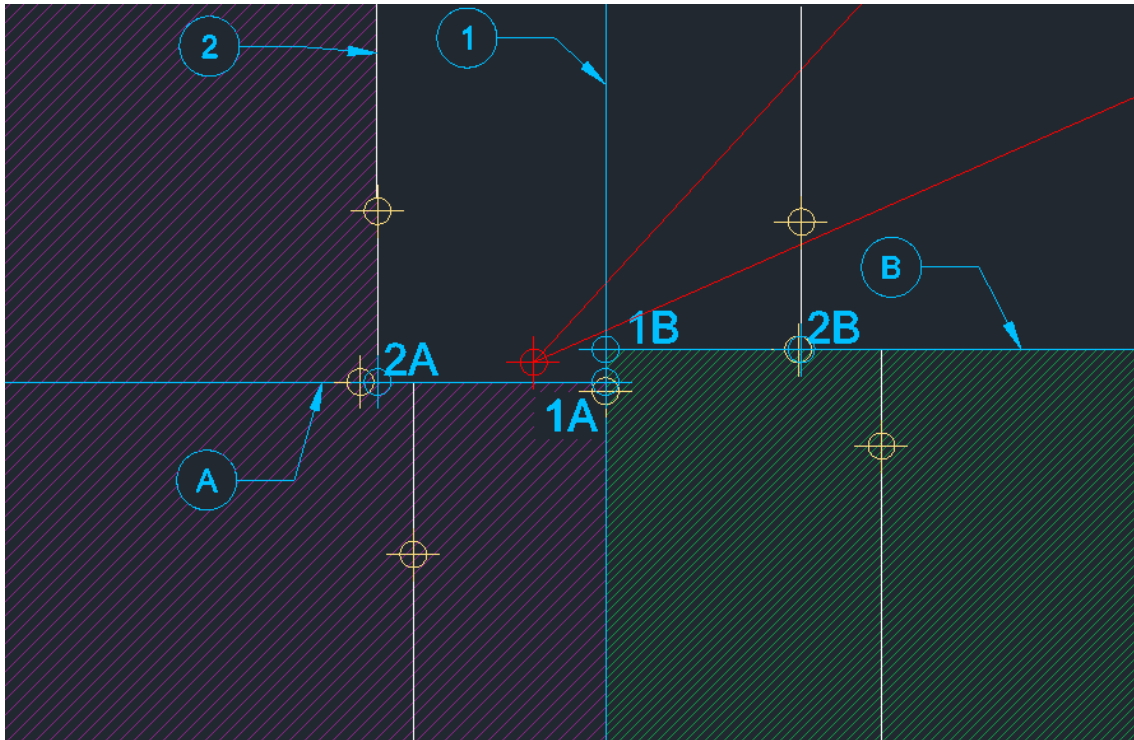


Fig. 94 Algorytm odrzucania poddrzew

Inne narożniki Fig. 94 nie mogą ograniczyć drzewa, ponieważ nie spełniają żadnej z zasady odrzucania poddrzew, które zostały przedstawione w sekcji „**Opis zasad odrzucania poddrzew**”. Wedle grafiki Fig. 94 można zauważyć, że w znaczy sposób zostały ograniczone punkty które mogą należeć do wycinka radialnego

W kolejnym akapicie zostały dokładnie opisane wszystkie zasady odrzucania poddrzew.

9.2. Opis zasad odrzucania poddrzew

Do zapoznania się z zasadami odrzucania poddrzew należy przyjąć zasady opisywania punktów oraz kątów. Na grafice Fig. 95, przedstawiono punkty i kąty o konkretnych nazwach nawiązujących do ich położenia.

- Punkt 1A należy do lewego poddrzewa wynikającego z podziału przez oś 1, punkt znajduje się z prawej strony lewego poddrzewa w wyniku czego został on opisany jako punkt PRAWY.

- Punkt 1B należy do prawego poddrzewa wynikającego z podziału przez oś 1, punkt znajduje się z lewej stopnie prawego poddrzewa w wyniku czego został opisany jako punkt LEWY.
- Punkt 2B należy do górnego poddrzewa wynikającego z podziału przez oś B, punkt znajduje się na dole górnego poddrzewa w wyniku czego został opisany jako DOLNY.
- Punkt 3B należy do dolnego poddrzewa wynikającego z podziału przez oś B, punkt znajduje się na górze dolnego poddrzewa w wyniku czego został opisany jako GÓRNY
- Mniejszy kąt od punktu podziału wyznaczający zakres kątowy został opisany jako MIN.
- Większy kąt od punktu podziału wyznaczający zakres kątowy został opisany jako MAX.

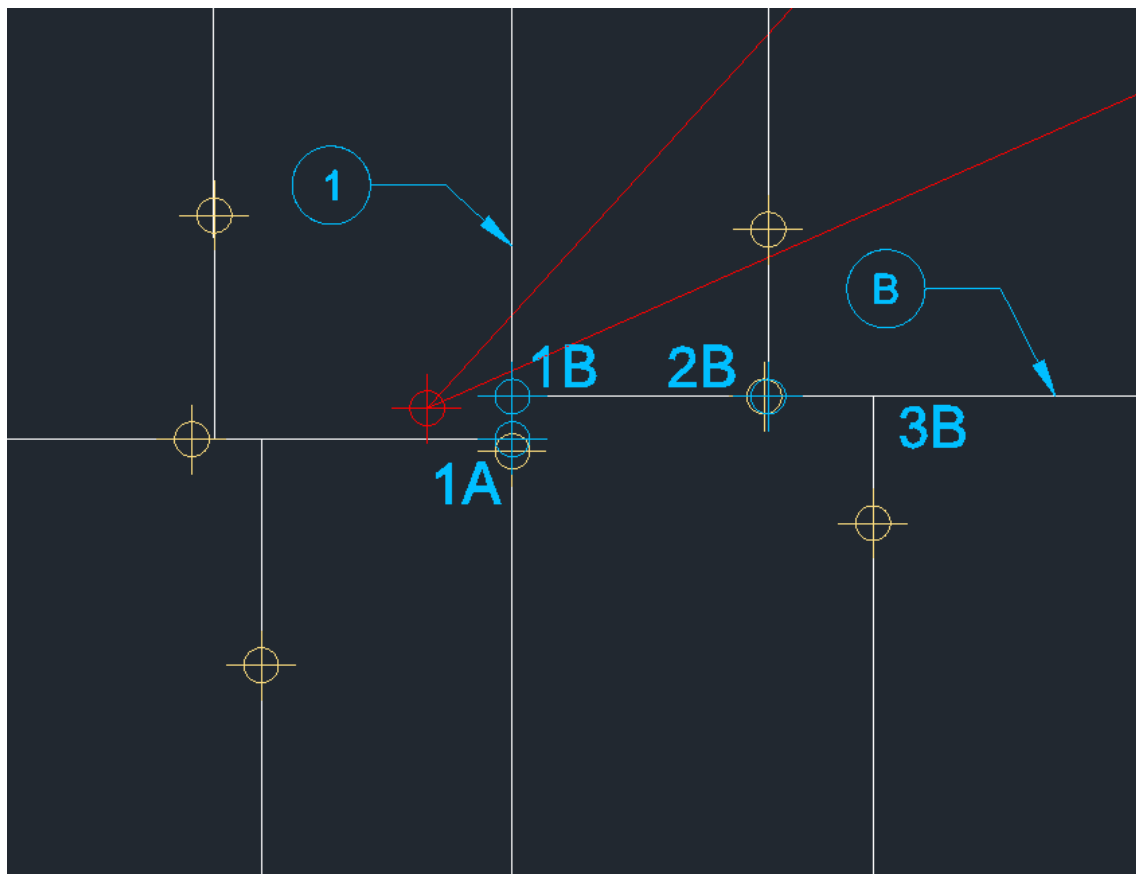


Fig. 95 Zasada odrzucania poddrzew

9.2.1. Zasady odrzucenia dla kątów 0-90

- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzucić prawe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć lewe poddrzewo.

9.2.2. Zasady odrzucenia dla kątów 90-180

- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzucić lewe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć prawe poddrzewo.

9.2.3. Zasady odrzucenia dla kątów 180-(270)

- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzucić prawe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć lewe poddrzewo.

9.2.4. Zasady odrzucenia dla kątów (270)-(360)

- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MAX odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć dolne poddrzewo.

- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzucić lewe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest WIĘKSZY niż kąt MAX odrzuć prawe poddrzewo.

9.2.5. Zasady odrzucania dla kątów (0)-(180)

- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzucić lewe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć prawe poddrzewo.

9.2.6. Zasady odrzucania dla kątów (90)-(270)

- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć prawe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzucić prawe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć górne poddrzewo.

9.2.7. Zasady odrzucania dla kątów (180)-(360)

- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do LEWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzucić prawe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć lewe poddrzewo.

9.2.8. Zasady odrzucania dla kątów (270)-(90)

- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć górne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do PRAWEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzuć dolne poddrzewo.
- Jeżeli kąt do GÓRNEGO narożnika jest mniejszy niż kąt MIN odrzucić lewe poddrzewo.
- Jeżeli kąt do DOLNEGO narożnika jest większy niż kąt MAX odrzuć lewe poddrzewo.

Dodatkowo wszystkie punkty które zostały wybrane są sprawdzane czy należą do danego przedziału kąтового.

Wynikowo ilość punktów do sprawdzenia znacząco spada i można w znacznie szybszy sposób wyznaczyć punkty mieszczące się w danym zakresie kątowym. W dużej mierze jest to zależne w którym punkcie chmury znajduje się punkt podziału.

Dzięki wykorzystaniu przedstawionych zasad odrzucania poddrzew czas podziału chmury punktów na wycinki radialne znacznie się skraca co prowadzi też do skrócenia czasu tworzenia samego wykresu widoczności.

Na grafice Fig. 96 przedstawiono odrzucone poddrzewa wedle powyższych zasad w głównym drzewie.

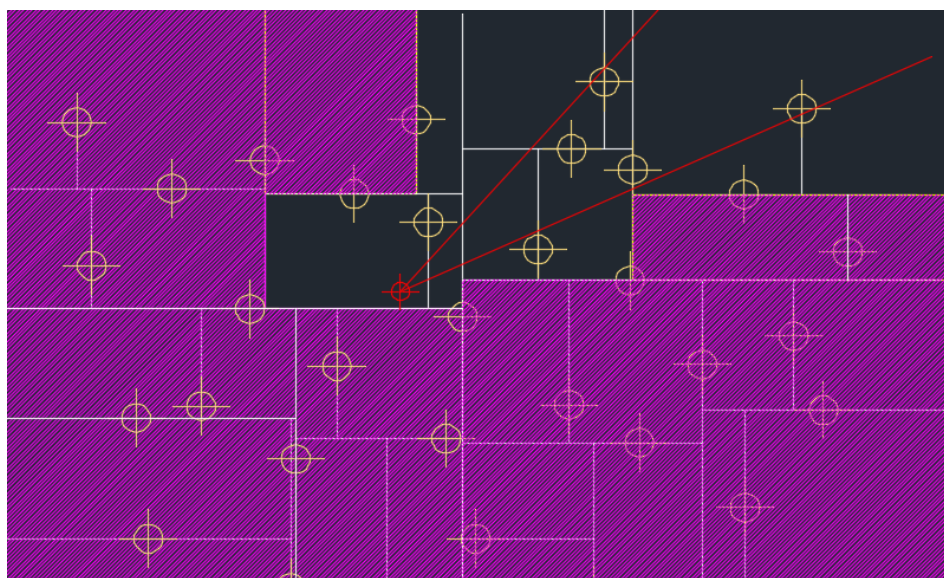


Fig. 96 Odrzucone części drzewa wedle przedstawionej zasady

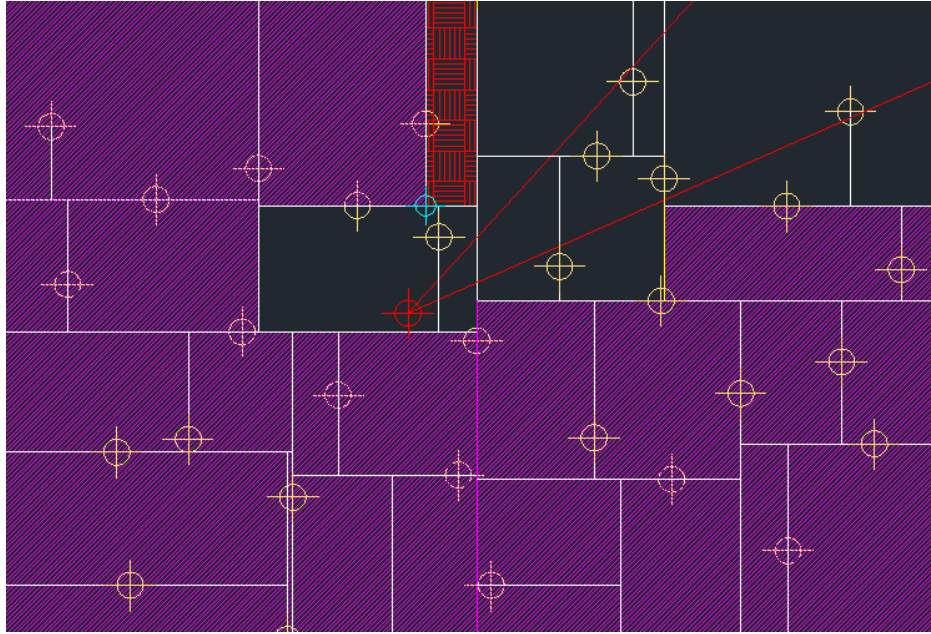


Fig. 97 Przykład nieodrzuconego poddrzewa

Ciekawym przypadkiem jest poddrzewo zaznaczone na kolor czerwony Fig. 97, które nie zostało odrzucone, mimo pozostawania poza zakresem wycinka. Pozostało, ponieważ możliwy do wyznaczenia jest jedynie punkt zaznaczony na niebiesko co nie może skutkować odrzuceniem wskazanego poddrzewa zgodnie z przyjętymi zasadami odrzucania poddrzew. Na grafice Fig. 98 zaprezentowano działanie algorytmu dla przykładowo wygenerowanej chmury punktów. Czarne punkty oznaczają te, które zostały odrzucone zgodnie z zasadami algorytmu odrzucania poddrzew.

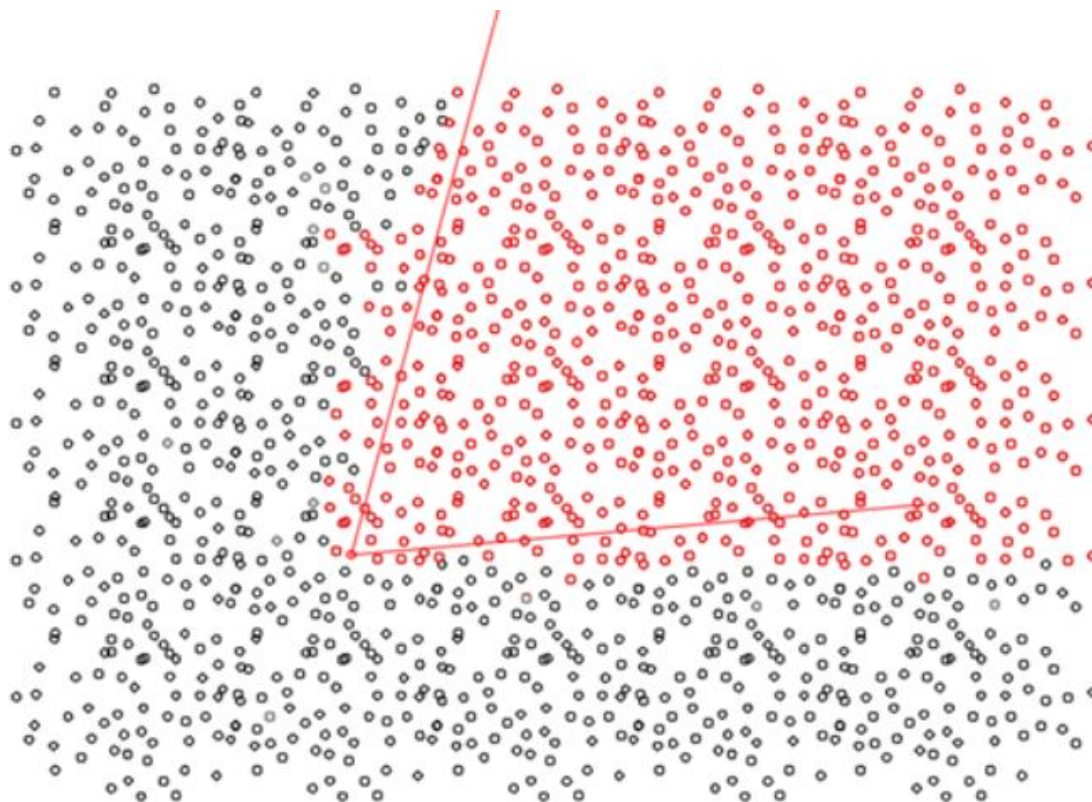


Fig. 98 Zastosowanie dla faktycznej chmury punktów

9.3. Przykład praktycznego zastosowania algorytmu

W ramach praktycznego zastosowania opracowanego algorytmu przeprowadzono badanie wyznaczenia zakresów kątowych dla mapy widoczności, składającej się z dwudziestu wykresów widoczności na obszarze obejmującym fragment Wawelu oraz jego okolice, z wykorzystaniem jednej chmury punktów. Proces polegał na podziale chmury punktów na dwadzieścia równych części, dwudziestokrotnie zmieniając punkt obserwacji. Badanie przeprowadzono z użyciem dwóch metod: metody selekcji punktów na wycinki radialne punkt po punkcie oraz metody zmiany struktury danych na kD drzewo z zastosowaniem algorytmu odrzucania poddrzew.

Wyznaczanie jednego wycinka radialnego w chmurze przy wykorzystaniu kD drzewa oraz zastosowaniu algorytmu odrzucania poddrzew, już w pierwszym kroku pozwala na odrzucenie większości badanych punktów Fig. 100, co znacząco przyspiesza proces wyznaczenia części radialnych. To podejście jest szczególnie efektywne przy tworzeniu mapy widoczności składającej się z dużej liczby wykresów widoczności.

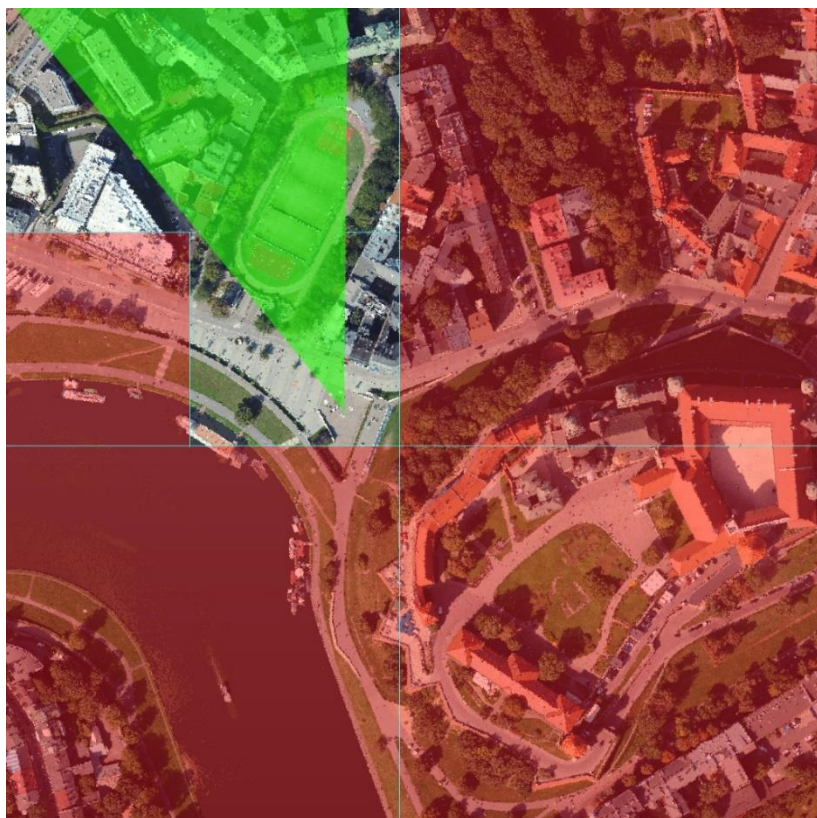


Fig. 99 Odrzucone punkty w pierwszych krokach

Czasy uzyskane podczas wykorzystania algorytmu zostały przedstawione w Tabeli 9. Parametry komputera, na którym był wykonywany algorytm zostały przedstawione w Tabeli 8.

Tabela 8 Parametry komputera

Typ podzespołu	Parametry
Procesor	i7-11800H -Taktowanie 2.3 GHz 8 rdzeni 16 wątków
RAM	32 GB DDR 4 3200MHz
Dysk	SSD prędkość odczytu 7000 MB/s, zapisu 6000 MB/s

Całkowita liczba punktów w analizowanej chmurze wynosiła 13 066 188.

Tabela 9 Czasy dla wyznaczenia mapy widoczność

	Podział chmury punktów na wycinki radialne metodą: punkt po punkcie	Podział chmury punktów na wycinki radialne metodą: odrzucania poddzew kD drzewa
Czas tworzenia drzewa i wczytywanie punktów [m:s]	-	0:47
Podział chmury punktów na części [m:s]	22:40	15:46
Całkowity czas [m:s]	22:40	16:34

10. ZRÓWNOLEGIENIE PROCESU

W Rozdziale 9 przedstawiono metodę, która umożliwia przyspieszenie procesu tworzenia wykresów widoczności, a w niektórych przypadkach w ogóle pozwala na ich wygenerowanie. Polega ona na podziale chmury punktów na mniejsze wycinki radialne. Jednakże, druga część procesu, czyli samo renderowanie wykresu, zostało przyspieszone poprzez zrównoleglenie pracy przy wykorzystaniu wielu komputerów co zostało zaprezentowane w kolejnych akapitach.

Zrównoleglenie pracy polega na równoczesnym wykonywaniu różnych lub tych samych zadań na kilku jednostkach obliczeniowych, kilku wątkach lub kilku procesorach. W przypadku renderowania wykresów widoczności, proces może być podzielony na mniejsze zadania tak jak w przedstawionym przypadku, renderowanie wycinków radialnych, które są wykonywane jednocześnie przez różne komputery. Dzięki temu, czas renderowania zostaje znacznie skrócony, ponieważ obliczenia są rozłożone na wiele urządzeń, co zwiększa wydajność całego procesu.

Istnieje wiele technologii wspierających zrównoleglenie, takich jak OpenMP [106] [107], MPI [108] czy CUDA [109]. Każda z nich ma swoje specyficzne zalety i wady, a także jest przeznaczona do rozwiązywania różnych typów problemów. Warto zauważyć, że nie wszystkie zadania są możliwe do zrównoleglenia, z reguły możliwość ta dotyczy jedynie tych zadań, których podzadania mogą być wykonywane niezależnie, co oznacza, że wyniki obliczeń jednych podzadań nie są wymagane do rozpoczęcia innych.

Jeśli wszystkie dostępne metody przyspieszania zadań zostały wykorzystane, a kod został zoptymalizowany i zrównoleglony przy pełnym wykorzystaniu zasobów komputera, rozpraszanie wykonywania podzadań może być rozszerzone na inne komputery. W takim przypadku procesy mogą w pełni wykorzystywać architekturę wielordzeniową. Proponowana metoda umożliwia dystrybucję podzadań w ramach znanych aplikacji inżynierskich na wiele maszyn obliczeniowych.

10.1. Opis przykładowego zadania

Przedstawiona metoda, pozwala na przetwarzanie dużych zbiorów danych wykorzystywanych w codziennej pracy przez inżynierów. Dostępne aplikacje nie

umożliwiają przetwarzania tak dużego zbioru danych na pojedynczej stacji roboczej w akceptowalnym czasie. Metoda przedstawiona jest na przykładzie zadania polegającego na generowaniu wykresów widoczności w środowiskach trójwymiarowych modeli terenu zbudowanych na gęstych chmurach punktów.

Chmura punktów wykorzystywana w badaniach została pozyskana w ramach projektu ISOK [10] w standardzie II, który charakteryzuje się gęstością na poziomie 6-12 pkt/m².

10.2.1. Podział zadania na podzadania

W ramach zadania tworzenia map i wykresów widoczności można wyróżnić podzadania:

1. Podział chmury punktów na wycinki radialne
2. Generowanie powierzchni TIN w poszczególnych wycinkach radialnych
3. Rendering wycinków radialnych
4. Składanie wykresu widoczności z renderingu poszczególnych wycinków
5. Złożenie wybranych wykresów widoczności do mapy widoczności

Zadania 2 i 3 mogą być dystrybuowane do wykonania w ramach pojedynczych procesów uruchamianych na oddzielnych rdzeniach procesorów, także na oddzielnych komputerach. Istotnym wymaganiem jest, aby tymi procesami były instancje oprogramowania wykorzystywanego przez specjalistę do codziennej pracy, by miał poczucie kontroli nad całym przebiegiem i mógł wpływać na parametry poszczególnych zadań.

10.2. Propozycja metody zrównoleglenia

W prezentowanym przykładzie dokonuje się wygenerowania wykresu widoczności poprzez podział chmury punktów na radialne części. Wszystkie części wysyłane są następnie na wiele maszyn obliczeniowych Fig. 100, gdzie każda z nich jest odpowiedzialna za stworzenie trójwymiarowej powierzchni TIN i wygenerowanie fragmentu wykresu widoczności. Po zakończeniu tego procesu wykresy są zwracane na komputer główny jako elementy składowe. W etapie końcowym następuje złożenie

wszystkich częściowych wykresów w jeden główny, co daje pełne rozwiązanie problemu.

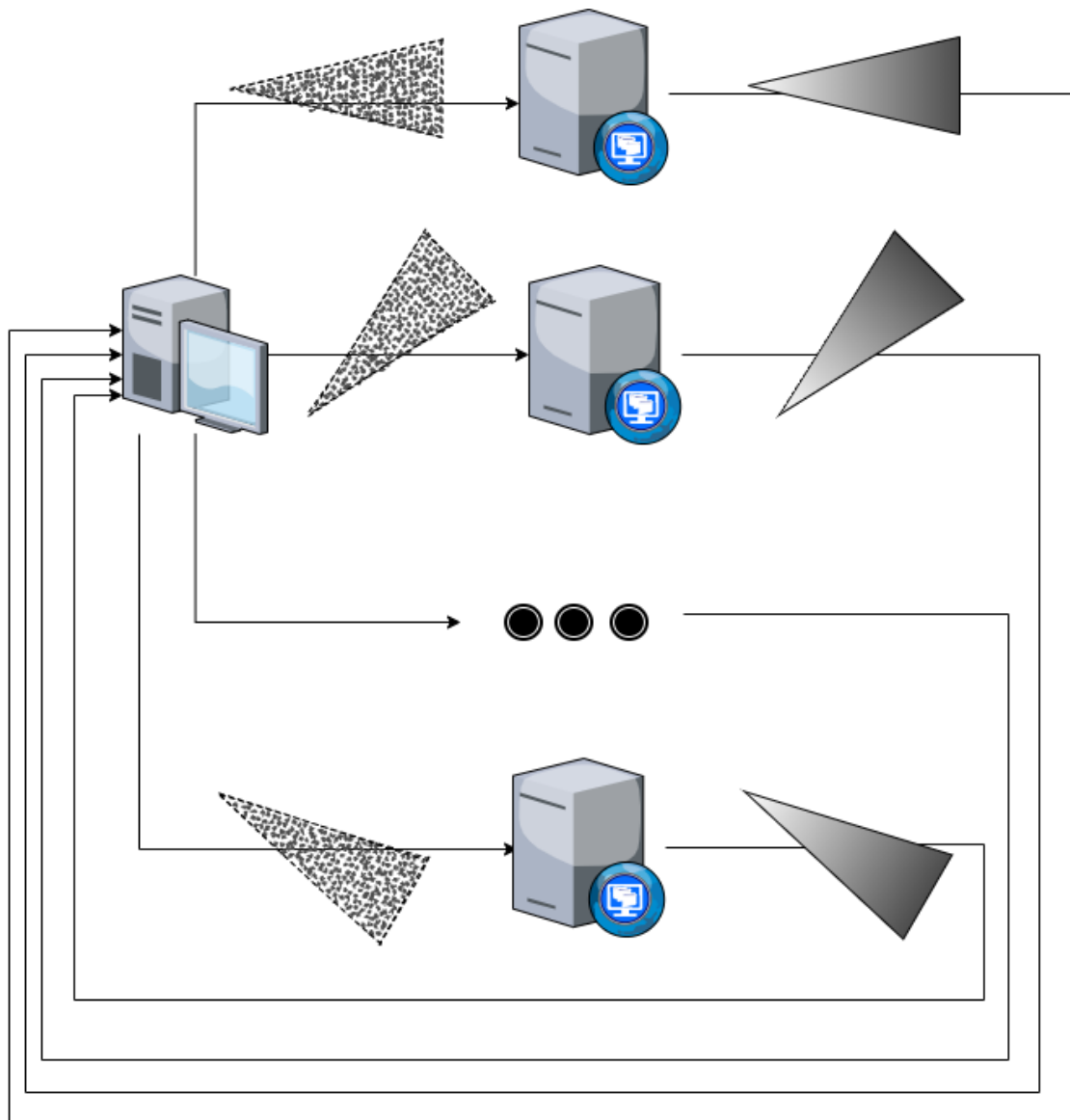


Fig. 100 Zasada rozdziału zadań na wiele komputerów

10.3.1. Przebieg działania programu

Pierwszym krokiem programu jest stworzenie kD-drzewa, a drugim – wyznaczenie małych chmur punktów, tj. wycinków radialnych, poprzez zastosowanie algorytmu odrzucania poddrzew. Następnie rozesłanie na każdy komputer nagłówka z informacjami o chmurze i sposobie renderingu i wysłanie N chmur na M komputerów gdzie N oznacza liczbę wyznaczonych części a M liczbę dostępnych komputerów. Struktura algorytmu generującego wycinki radialne wydziela chmurę po chmurze, więc

nie ma potrzeby czekania na stworzenie wszystkich chmur przed rozpoczęciem ich przesyłania. Dany komputer po ukończeniu wykresu zwraca go na komputer rozsyłający. Jeżeli jest dostępna kolejna część natychmiast jest ona przetwarzana. Po zakończeniu renderowania wszystkich wykresów widoczności bazujących na wycinkach radialnych są one składane na głównym komputerze w jeden pełny wykres. Cały proces został zaprezentowany na schemacie blokowym Fig. 101.

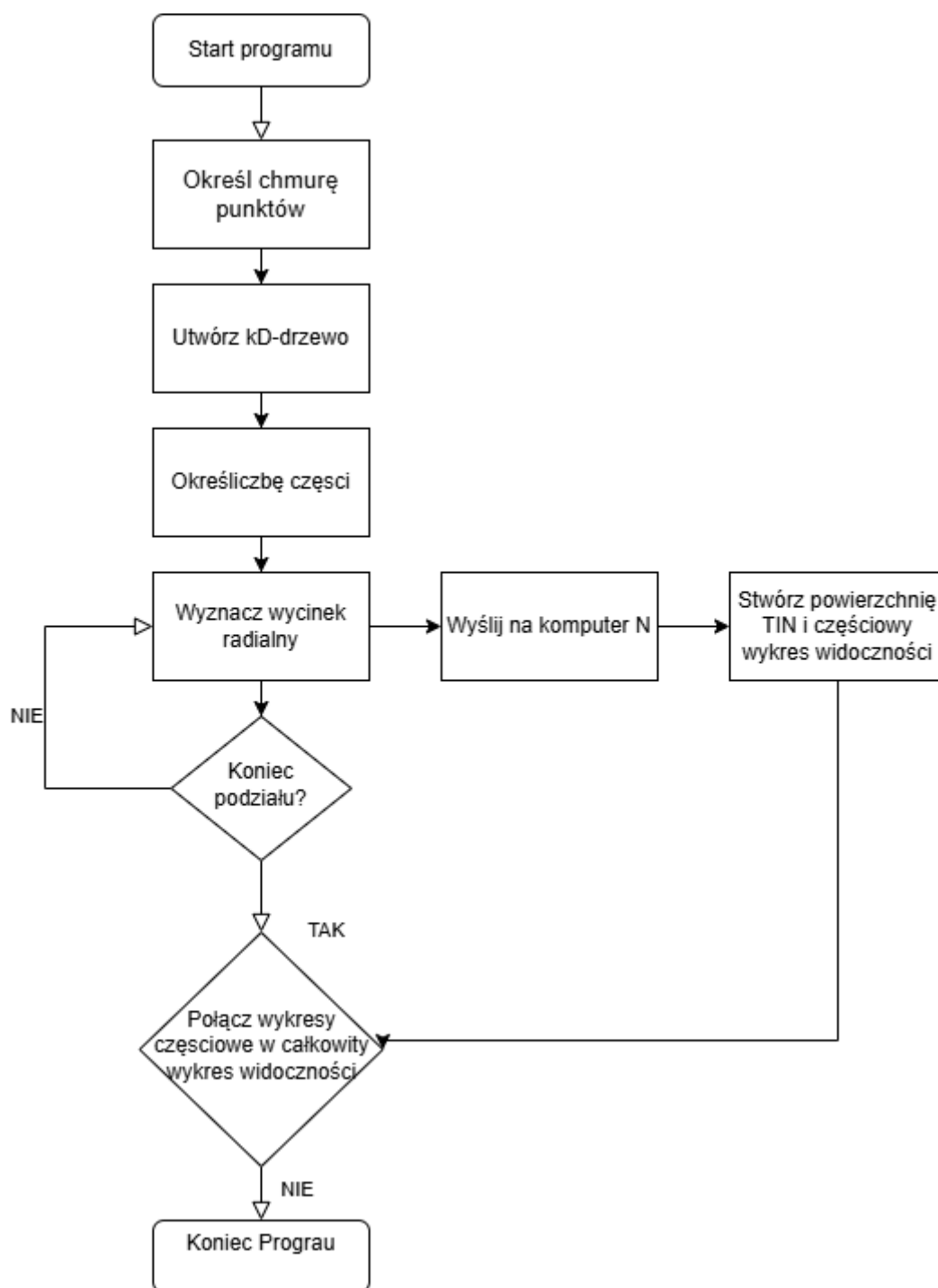


Fig. 101 Schemat blokowy działania programu

10.3.2. Opis plików nagłówkowych

W celu poprawnego działania oprogramowania przy każdym jego uruchomieniu na każdy komputer wysyłana jest paczka z plikiem nagłówkowym, szablonem (.dwt),

zawierającym podstawowe parametry środowiska rysunku oraz plikiem wsadowym (.bat), uruchamiającym aplikację inżynierską na komputerach węzłach.

Opis plików:

- Plik nagłówkowy, który zawiera informacje:
 - współrzędne punktu, z którego generowany jest wykres widoczności,
 - parametry zakresu oraz rozdzielczości renderowania,
 - nazwy plików pod jakimi będą zapisywane wykresy.
- plik wsadowy uruchamiający aplikację oczekującą na zadania oraz oprogramowanie do generowania powierzchni TIN, którym jest Autocad Civil 3D [110],
- skrypt uruchamiany w programie Autocad Civil 3D,
- bibliotekę z funkcjami potrzebnymi do automatycznego generowania powierzchni, renderowania i zapisu.

10.3.3. Opis zadań przypisanych do konkretnych komputerów

KOMPUTER MATKA - Opis procesów wykonywanych na głównym komputerze.

Dane wejściowe – chmura punktów

1. Stworzenie kD drzewa
2. Określenie liczby wycinków oraz ich zakresu kąтового
3. Określenie liczby komputerów węzłów i dostępu do nich
4. Rozesłanie paczki
5. Wygenerowanie N chmur i rozesłanie na komputery węzły
6. Odebranie renderingów
7. Połączenie wykresów wycinkowych w całkowity wykres widoczności

Dane wyjściowe – całkowity wykres widoczności

KOMPUTERY WĘZŁY - Opis procesów wykonywanych na dostępnych N-komputerach.

Dane wejściowe – częściowa chmura na wycinku radialnym

1. Otrzymanie pliku nagłówkowego ze specyfikacją renderingu i punkcie centralnym
2. Otrzymanie wycinka chmury punktów
3. Wykonywanie wykresu
4. Zwrot wykresu wraz z informacją o zakończeniu zadania
5. Oczekiwanie na kolejną chmurę/informację o zakończeniu całego procesu.

Dane wyjściowe – wykres widoczności na radialnym wycinku.

10.4. Technologia

W celu stworzenia jak najbardziej wydajnego oprogramowania zostało użyte kilka technologii, tak aby oprogramowanie było przyjazne użytkownikowi w obsłudze, spełniało zasady tworzenia oprogramowania i rozwiązywało problem, do którego zostało stworzone.

- Język programowania C++ [111] program, w którym tworzone jest drzewo kD oraz algorytm dzielący chmurę i generujący mniejsze chmury.
- Oprogramowanie AutoCad CIVIL 3D do generowania powierzchni TIN oraz wykresu widoczności.
- Język programowania C# [112] do automatyzacji operacji wykonywanych w Civil 3D.
- Program wsadowy [113] - do automatycznego uruchamiania aplikacji na komputerach węzłach.

10.5. Porównanie czasów wykonywania algorytmu przy różnych metodach zrównoleglenia

Korzyści, wynikające z wykorzystania algorytmu, zaprezentowano przeprowadzając eksperymenty z różnymi przypadkami jego uruchomienia. Skrócenie czasu wykonywania zadań obserwuje się przy porównaniu czasów, uzyskanych przy wykorzystaniu jednej maszyny obliczeniowej z ograniczeniem liczby rdzeni komputera oraz przy maksymalnym jej obciążeniu na wszystkich rdzeniach. Przedstawiono czasy wykonywania zadań sekwencyjnie oraz równoległe przy różnym wykorzystaniu

procesorów. Następnie przetestowano wykorzystanie różnej liczby komputerów. Eksperymenty przeprowadzono na komputerach o następujących parametrach:

Parametry wykorzystanych komputerów przedstawiono w Tabeli 10:

Tabela 10 Parametry komputerów

Typ podzespołu	Parametry
Procesor	i7-4760HQ -Taktowanie 2.1 - 3.3 GHz 4 rdzenie 8 wątków
RAM	16 GB DDR 3 1600MHz
Dysk	SSD prędkość odczytu 560 MB/s, zapisu 530 MB/s

W ramach eksperymentów sformułowano dwa zadania.

Zadanie 1, wykonywane na chmurze punktów, oznaczonej literą (A), która zawiera $8,2 * 10^5$ punktów. W tym przypadku analizowano czasy wykonywania zadania na jednym komputerze, przy różnym wykorzystaniu procesorów. Analizie poddano zarówno przebieg przy uruchomionej jednej instancji oprogramowania AutoCAD Civil 3D jak i przy uruchomionej większej liczby instancji oprogramowania AutoCAD Civil 3D.

Do zadania 2 wdrożono opisaną technologię, wykorzystującą wiele komputerów. Algorytm jest wykonywany równolegle na wielu komputerach pracujących w trybie sekwencyjnym. Zastosowano chmurę punktów (B) o liczbie punktów wynoszącej $7,6 * 10^6$. Dodatkowo zbadano różne podziały chmury punktów na 10 i 16 części. Dzięki zmianom podziałów zaprezentowano zależność czasu wykonywania zadania od liczby części.

W obu przypadkach za optymalne rozłożenie operacji między procesorami był odpowiedzialny wewnętrzny algorytm oprogramowania AutoCad Civil 3D.

10.5.1. Zadanie 1: Podział chmury (A) na cztery części

Przykład 1: Wykonanie zadania na jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni procesora (core). Cztery części chmury punktów przetwarzane były jedna po drugiej, przy wykorzystaniu jednej instancji oprogramowania AutoCad Civil 3D i przypisanymi różnymi liczbami rdzeni Tabela 11.

Tabela 11 Czas wykonania zadania 1, na chmurze punktów (A), jedna po drugiej jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni

Rdzeń	1	2	4
Czas [m:s]	18:49	10:12	10:02

Przykład wykazał skrócenie czasu wykonywania zadania wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych rdzeni procesora. Znaczne skrócenie czasu pomiędzy wykorzystaniem jednego rdzenia a dwóch wskazuje na duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową czego nie gwarantuje jeden rdzeń. Natomiast przy wykorzystaniu czterech rdzeni taki skok wydajności już nie występuje, co sugeruje, że kolejna dodatkowa moc obliczeniowa nie przekłada się na równie znaczące zyski czasowe.

- Przykład 2: Wykonanie zadania 1, na jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni procesora (core) i równolegle czterech instancji oprogramowania AutoCad Civil 3D, Tabela 12.

Tabela 12 Czas wykonania zadania 1, na chmurze punktów (A), na jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni równolegle i czterech instancji oprogramowania AutoCad Civil 3D.

Rdzeń	1	2	4
Czas [m:s]	13:12	6:19	3:24

Przykład ukazuje skrócenie czasu wykonywania zadania równolegle przy uruchomionych czterech instancjach oprogramowania AutoCad Civil 3D, wraz ze wzrostem wykorzystanych rdzeni procesora. Można zauważyć znaczną oszczędność czasu względem przykładu 1, w którym każda część oczekuje na zakończenie

przetwarzania części poprzedniej. W przykładzie 2 wszystkie części są przetwarzane równocześnie przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni procesora. Ważnym aspektem w tym przykładzie jest wielkość każdej części. Są one na tyle małe, że komputer tworząc powierzchnię TIN równoległe, posiada wystarczającą ilość pamięci operacyjnej i jest w stanie je wszystkie przetworzyć. W przypadku części zawierającej większą liczbę punktów, równoległe przetwarzanie mogłoby nie zostać wykonane, ponieważ pamięć RAM zostałaby przepełniona. W takim wypadku trzeba by zastosować metodę przedstawioną w przykładzie 1, bardziej czasochłonną, ale z możliwością przeznaczenia większej mocy obliczeniowej i pamięci na jedną część.

- Dla lepszej analizy powyższych wyników przedstawiono porównanie czasu obliczeń jednej części chmury (A) na jednym rdzeniu z czasem wykonania 4 części chmury (A) na 4 rdzeniach równoległe Tabela 13.

Tabela 13 Porównanie czasu wykonania jednej części chmury (A) na jednym rdzeniu z czasem wykonania 4 części chmury (A) na 4 rdzeniach równoległe.

Części chmury/rdzeń	1x1	4x4
Czas [m:s]	3:19	3:22

W przedstawionym zestawieniu porównano czasy przetwarzania zadania 1 w dwóch konfiguracjach: w trybie pojedynczej części chmury punktów na jednym rdzeniu (1/1) oraz w trybie równoległym, cztery części na osobnych instancjach programu z przypisanym jednym rdzeniem do każdej części (4/4). Wyniki wskazują, że czas realizacji zadania w pierwszym przypadku wyniósł 3:19min, natomiast w drugim 3:22min. Pomimo niewielkiej różnicy czasowej, w przypadku 4/4 przetworzono cztery razy więcej części co świadczy o istotnym wpływie na wydajność przetwarzania. Przedstawione wyniki świadczą o tym, iż wewnętrzny algorytm zrównoleglenia obliczeń w AutoCAD Civil 3D nie zapewnia takiego przyspieszenia, jakie można uzyskać przy manualnym uruchomieniu czterech oddzielnych instancji programu. Wynika to z ograniczeń architektury oprogramowania, która nie wykorzystuje w pełni dostępnych zasobów obliczeniowych. Manualne uruchamianie wielu instancji pozwala na efektywniejsze wykorzystanie sprzętu, gdyż każdy proces działa niezależnie, co umożliwia lepsze dostosowanie do specyficznych wymagań projektu.

10.5.2. Zadanie 2: Podział chmury (B) na dziesięć oraz szesnaście części

W przedstawionym zadaniu została wykorzystana chmura punktów która zawiera $7,6 * 10^6$ punktów. W tabelach zostały zaprezentowane wyniki porównujące wykonanie tego samego wykresu widoczności przy użyciu różnej liczby komputerów oraz wykorzystaniu wszystkich dostępnych rdzeni. Wykonywanie zadań na każdym komputerze przebiegało jedno po drugim przy wykorzystaniu jednej instancji oprogramowania AutoCAD Civil 3D.

Przykład 1: podział na 10 części

Tabela 14 Czas wykonania zadania 2, na chmurze punktów (B), jedno po drugim, równoległe na różnej liczbie komputerów

PC	1	2	3	4
Czas [m:s]	10:41	5:24	4:05	2:58

Przykład 2: podział na 16 części

Tabela 15 Czas wykonania zadania 2, na chmurze punktów (B), jedno po drugim, równoległe na różnej liczbie komputerów.

PC	1	2	3	4
Czas [m:s]	10:41	5:33	4:23	3:32

Z danych w Tabela 14 i Tabela 15 wynikają dwa wnioski. Po pierwsze, potwierdzenie zasadności zwiększenia liczby komputerów, na których faktycznie jest wykonywane zadanie. Natomiast przy zbyt dużej liczbie podziałów czas może nie być efektywnie skrócony. W przypadku dziesięciu części czas był krótszy niż w przypadku szesnastu części. Wynika to z tego, że każde uruchomienie programu wydłuża czas wykonywania zadań, czyli im więcej uruchomień na jednym komputerze tym czas dłuższy. Ważnym czynnikiem wpływającym na czas wykonania zadania jest liczba podziałów. Należy je dobrać w taki sposób, aby powierzchnia, która powstaje w wyniku podziału była jak największa, ale nie przekraczała możliwości obliczeniowych

komputera. Na grafice Fig. 102 przedstawiono końcowy wykres uzyskany przy równoległym tworzeniu częściowych wykresów widoczności dla zadania 2.



Fig. 102 Końcowy wykres widoczności z zadania 2, chmura punktów (B).

10.6. Przykład zastosowania zrównoleglenia dla badanego przypadku

W ramach praktycznego zastosowania opracowanego algorytmu kontynuowano badania nad tworzeniem mapy widoczności składającej się z dwudziestu wykresów widoczności dla obszaru obejmującego fragment Wawelu oraz jego okolice. Wykorzystano w tym celu wycinki radialne stworzone w poprzednim badaniu.

Dotychczasowe przyspieszenie procesu generowania wykresów widoczności opierało się na optymalizacji etapu odpowiedzialnego za podział chmury punktów. Kluczowym elementem było zastosowanie struktury danych opartej na kD-drzewach, co umożliwiło bardziej efektywną organizację przestrzenną danych. Dodatkowo, zastosowanie autorskiego algorytmu odrzucania poddrzew przyczyniło się do znaczącego przyspieszenia procesu.

Badania zakończyły się usprawnieniem kolejnego etapu procesu, jakim jest renderowanie częściowych chmur punktów, wyznaczonych w wyniku podziału radialnego. W ramach prac wprowadzono zrównoleglenie procesu renderingu poprzez wykorzystanie wielu maszyn obliczeniowych. Takie podejście umożliwiło równoczesne przetwarzanie wielu fragmentów chmur punktów, co znacząco skróciło czas tworzenia pełnego wykresu widoczności.

Czasy uzyskane podczas wykorzystania algorytmu dla badanego przykładu zostały przedstawione w Tabeli 17.

Parametry komputera, na którym został wykonany podział i renderingi zostały przedstawione w Tabeli 16.

Tabela 16 Parametry komputera

Typ podzespołu	Parametry
Procesor	i7-11800H -Taktowanie 2.3GHz 8 rdzenie 16 wątków
RAM	32 GB DDR 4 3200MHz
Dysk	SSD prędkość odczytu 7450 MB/s, zapisu 6900 MB/s

Tabela 17 Czas renderowania wykresu widoczności

	Rendering na 1 komputerze	Rendering na 4 komputerach
Rendering i złożenie wykresów widoczności [h:m:s]	4:49:39	1:05:15

11. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIA WYNIKÓW PRACY

Przedstawiony proces tworzenia wykresów widoczności na podstawie wielkoskalowych chmur punktów został z powodzeniem zastosowany w kilku projektach komercyjnych, które miały znaczący wpływ na otaczającą przestrzeń. Dzięki zmianie struktury danych, zastosowaniu algorytmu odrzucania poddrzew i metody tworzenia częściowych wykresów widoczności prowadzących do pełnego wykresu, projekty mogły być zrealizowane.

- Opracowanie analiz krajobrazowych na obszarze województwa dolnośląskiego. Część 2. Analizy wizualno-krajobrazowe

Opracowanie obejmowało wykonanie oraz przekazanie Zamawiającemu kompleksowych analiz krajobrazowych dla województwa dolnośląskiego, realizowanych w ramach projektu audytu krajobrazowego regionu. Analizy koncentrowały się na identyfikacji tradycyjnej architektury lokalnej, ocenie jej wpływu na krajobraz kulturowy oraz określeniu wytycznych dla ochrony i zarządzania wartościami krajobrazowymi. Dodatkowo przeprowadzono rozpoznanie układów kompozycyjno-widokowych istotnych dla krajobrazów priorytetowych, z uwzględnieniem takich elementów jak punkty widokowe, osie widokowe i panoramy, w tym historyczne założenia przestrzenne wraz z przedpolami ekspozycji. Dokonano również oceny elementów ekspozycji i kompozycji pod kątem ich specyfiki, integralności oraz spójności krajobrazowej, wskazując jednocześnie potencjalne zagrożenia dla ich zachowania. W efekcie powstała szczegółowa dokumentacja zgodna z kodem CPV 90721100-8, uwzględniająca kluczowe aspekty środowiskowe i przestrzenne, stanowiąca istotny element strategii ochrony i zrównoważonego zarządzania krajobrazem regionu. Grafika Fig. 103 przedstawia fragment ekspertyzy w postaci mapy ekspozycji biernej dla krajobrazów priorytetowych. Ekspozycja bierna, zaprezentowana w skali spectrum, obrazuje, z ilu punktów obserwacyjnych widoczny jest dany krajobraz priorytetowy. Obszary bardziej oraz mniej widoczne zostały oznaczone wedle załączonej skali. Mapa ta umożliwia ocenę przestrzennego zasięgu percepcji wybranego krajobrazu oraz jego ekspozycji w terenie.

Zasada oraz proces tworzenia map widoczności zostały szczegółowo opisane w rozdziale 3

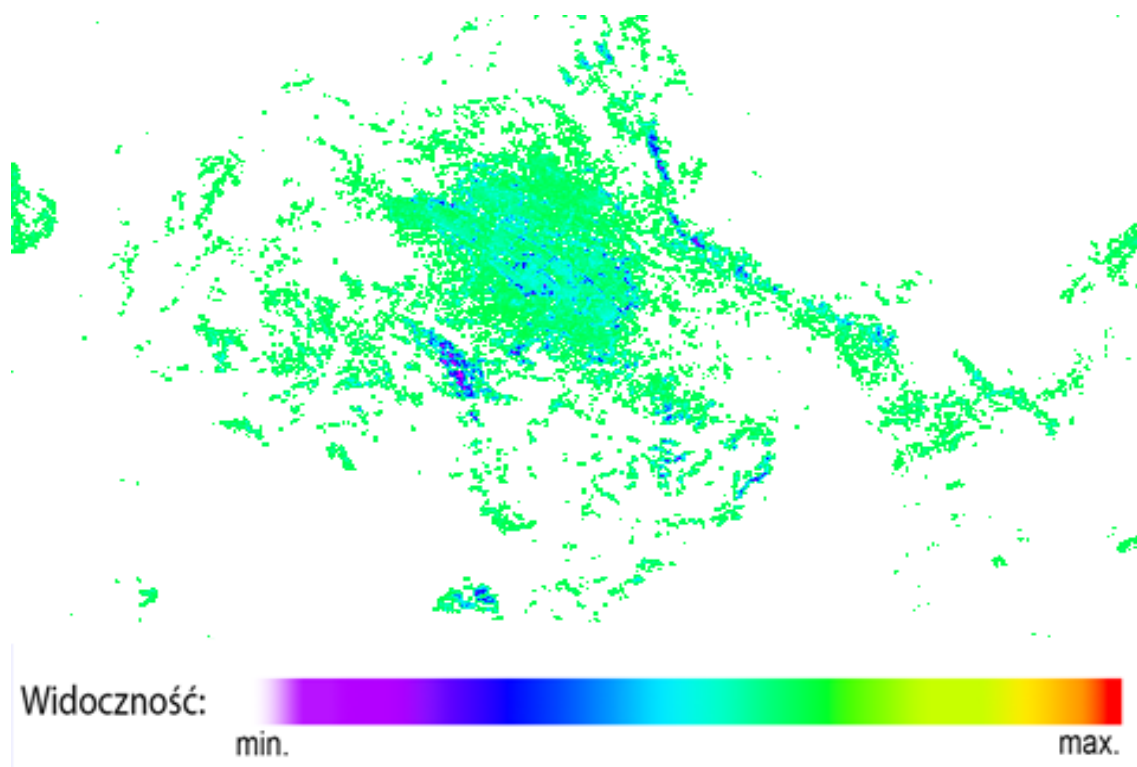


Fig. 103 Przykład MEB (mapy ekspozycji biernej) dla KP Równina Legnicka, przedstawiony w paletce grayscale.

Metoda zastosowana w badaniu opierała się na analizie losowo wybranych próbek, które posłużyły do weryfikacji poprawności wyników. W przypadku tego projektu kluczowym aspektem była dokładność planistyczna, która determinowała jakość dostarczanych analiz. Odpowiednia precyzja była niezbędna do zapewnienia rzetelności wyników oraz ich przydatności w praktycznych zastosowaniach.

Wykresy bazujące na Numerycznym Modelu Pokrycia Terenu (NMPT) poddano weryfikacji poprzez porównanie ich z wykresami generowanymi na podstawie pełnego procesu tworzenia analiz widoczności przy użyciu chmury punktów. Taka metoda pozwoliła na ocenę zgodności wyników oraz określenie ewentualnych różnic wynikających z zastosowania uproszczonych modeli danych, co zapobiegało dostarczeniu nieprecyzyjnych lub niewiarygodnych wyników.

- Studium Krajobrazowe obiektów przy ul. Łowieckiej 24 – Projekt Inwestycyjny EC Wrocław

W tym przypadku analiza opierała się na wysokiej dokładności, szczególnie w kontekście urbanistycznym, co było kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników. Projekt miał na celu określenie rozmiarów przebudowy elektrociepłowni na terenie miasta Wrocławia, co wymagało precyzyjnego modelowania przestrzennego i szczegółowej analizy warunków terenowych. Ze względu na złożoność przestrzeni miejskiej, konieczne było zastosowanie metod zapewniających maksymalną precyzję w odwzorowaniu istniejących obiektów oraz ich relacji przestrzennych. Wykorzystanie zaawansowanych technik analizy widoczności, bazujących na chmurach punktów i Numerycznym Modelu Pokrycia Terenu (NMPT), umożliwiło dokładne określenie wpływu planowanej przebudowy na otoczenie. Dzięki zaprezentowanemu rozwiązaniu możliwe było nie tylko przedstawienie wariantów przebudowy z maksymalną dokładnością, ale także ocena potencjalnych ograniczeń wynikających z uwarunkowań urbanistycznych oraz analiza zgodności projektowanych zmian z istniejącą infrastrukturą. Takie podejście pozwoliło na optymalizację procesu decyzyjnego oraz dostarczenie wiarygodnych danych wspierających dalsze etapy planowania inwestycji.

- Ekspertyza krajobrazowa dla projektu fotowoltaicznego PV Wysoczany o mocy elektrycznej do 100 MW

Projekt miał na celu szczegółowe przedstawienie wpływu projektowanej instalacji fotowoltaicznej na otoczenie przyrodnicze i krajobrazowe, z uwzględnieniem aspektów wizualnych i przestrzennych. Wymagana w tym przypadku dokładność krajobrazowa charakteryzowała się wysoką precyzją analizy krajobrazowej, co było kluczowe dla oceny oddziaływania inwestycji na otoczenie. Szczególny nacisk położono na aspekty ekspozycji i percepcji wizualnej, które mogły wpłynąć na ocenę akceptowalności inwestycji w kontekście estetyki krajobrazu. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod analizy widoczności bazującej na chmurze punktów, możliwe było uzyskanie maksymalnej dokładności w ocenie widoczności oraz ekspozycji obiektów w terenie. Wyniki badań posłużyły do opracowania wytycznych minimalizujących negatywny wpływ inwestycji na środowisko i krajobraz, co miało istotne znaczenie w kontekście planowania przestrzennego oraz procedur oceny oddziaływania na środowisko.

Opracowanie obejmowało wykonanie szczegółowego studium krajobrazowego dla elektrowni fotowoltaicznej o mocy elektrycznej do 100 MW, planowanej w miejscowości Wysoczany, w województwie podkarpackim, powiecie sanockim,

gminie Komańcza. Na grafice Fig. 104 Różnica pomiędzy mapą ekspozycji biernej wszystkich obiektów, które wpływają negatywnie na odbiór wizualny krajobrazu oraz taką samą mapą z uwzględnieniem planowanej elektrowni

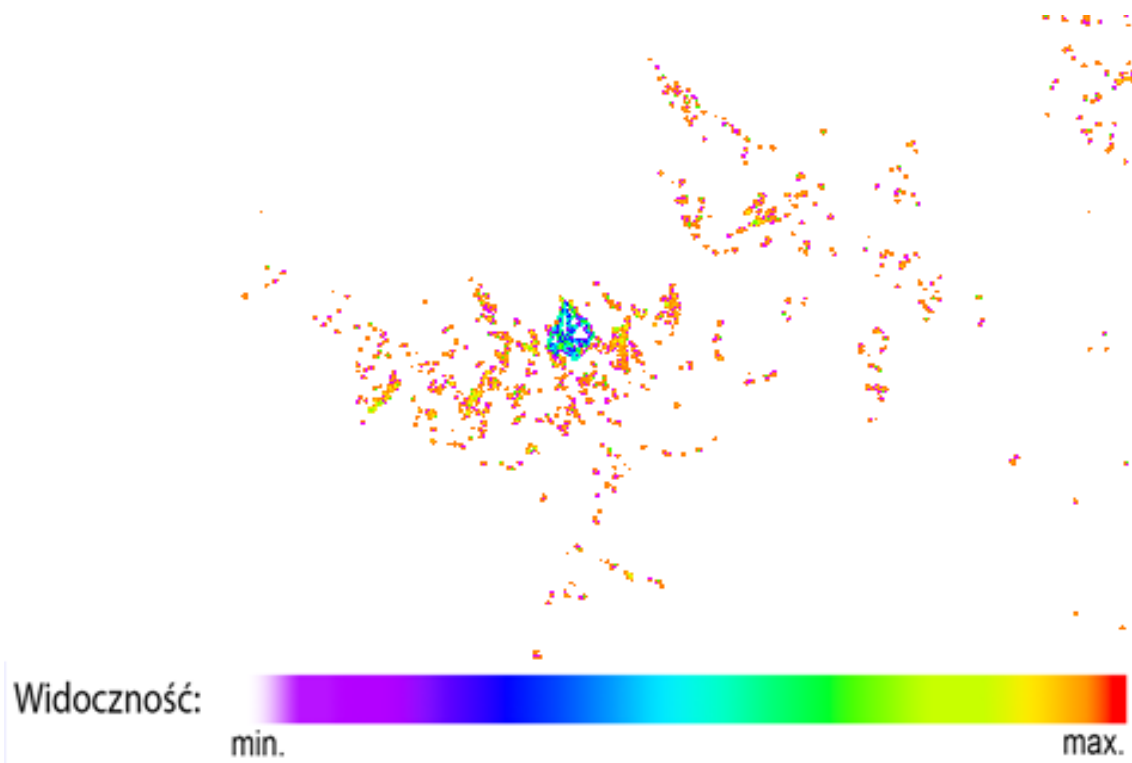


Fig. 104 Różnica pomiędzy mapą ekspozycji biernej wszystkich obiektów, które wpływają negatywnie na odbiór wizualny krajobrazu oraz taką samą mapą z uwzględnieniem planowanej elektrowni zaznaczona w kolorach spectrum

12. PODSUMOWANIE

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie uniwersalnego i ogólnodostępnego procesu przetwarzania wielkoskalowych chmur punktów na potrzeby generowania precyzyjnych wykresów widoczności. Celem pracy było stworzenie metody, która nie tylko zaspokajałaby potrzeby związane z badaniem widoczności, ale także umożliwiałaby ich generowanie w sposób efektywny, nawet dla bardzo dużych zbiorów danych

W pracy zaprezentowano szereg typów danych, na podstawie których można odwzorować teren, takie jak NMPT, NMT, ortofotomapa czy chmura punktów. Jako najlepszy sposób odwzorowania tego typu danych przestrzennych wyróżniono chmurę punktów. Chmura punktów, dzięki swojej wysokiej dokładności, stanowi doskonałą reprezentację powierzchni terenu, umożliwiając uzyskanie szczegółowych informacji o strukturze przestrzennej, które są kluczowe w różnych zastosowaniach, takich jak modelowanie terenu, planowanie przestrzenne czy analiza widoczności. Dodatkowo chmura punktów charakteryzuje się dodatkowymi informacjami, takimi jak kolor punktów czy klasyfikacja, które zwiększają możliwości jej zastosowania.

Dokładnie przeanalizowano i opisano metodę pozyskiwania danych przestrzennych przy użyciu technologii LIDAR, która pozwala na uzyskiwanie chmur punktów o wysokiej dokładności, nawet w trudnych warunkach terenowych, wykorzystując skaner laserowy i przelot nad terenem, z którego pozyskiwane są dane. LIDAR, dzięki swojej zdolności do zbierania danych w różnych warunkach atmosferycznych i terenowych, stał się jednym z najważniejszych narzędzi w geodezji i kartografii. Zwrócono również uwagę na szeroką dostępność chmur punktów na różnych ogólnodostępnych portalach internetowych, które charakteryzują się wysoką dokładnością oraz częstą aktualizacją danych, co pozwala na bieżąco śledzić zmiany w analizowanych obszarach.

W opracowaniu zaprezentowano liczne metody badania widoczności, począwszy od tradycyjnych metod manualnych, przez zaawansowane algorytmy obliczeniowe, aż po nowoczesne metody cyfrowe. Szczególną uwagę poświęcono metodzie śledzenia promieni światła, która umożliwia badanie widoczności z wysoką dokładnością. Dzięki tej technice możliwe jest precyzyjne odwzorowanie interakcji światła z obiektami

w przestrzeni, co pozwala na dokładne określenie, które obszary są widoczne z określonych punktów obserwacji. Metoda ta, poprzez dokładne śledzenie trajektorii promieni świetlnych i uwzględnienie różnych przeszkód w terenie, stanowi jedno z najbardziej efektywnych narzędzi w analizie widoczności, szczególnie w kontekście wielkoskalowych chmur punktów.

Dokładny proces tworzenia wykresów widoczności, opisany w pracy, obejmuje kilka kluczowych etapów, począwszy od generowania powierzchni TIN na bazie wielkoskalowych chmur punktów, określenie punktu obserwacji aż po renderowanie sceny tworzącej wykres widoczności. Dzięki wykorzystaniu chmur punktów o ogromnej liczbie punktów, wykresy widoczności charakteryzują się wysoką dokładnością, co ma szczególne znaczenie w analizach przestrzennych. Podejście oparte na chmurach punktów umożliwia pełne wykorzystanie ich potencjału, co przekłada się na bardziej wiarygodne i szczegółowe wyniki w porównaniu do innych metod opartych na uproszczeniu danych.

W badaniach wykazano, że zmniejszenie liczby punktów w chmurze może prowadzić do pominięcia istotnych szczegółów dotyczących ukształtowania terenu, co negatywnie wpływa na dokładność analizy widoczności. Uproszczenie chmury punktów może skutkować zniekształceniem powierzchni terenu, a w konsekwencji wpłynąć na błędne wnioski w kontekście oceny dostępnych widoków z określonych punktów. Ponadto, w pracy przedstawiono porównanie wyników wykresów widoczności stworzonych na podstawie chmur punktów i numerycznych modeli pokrycia terenu (NMPT). Badania przeprowadzone w obszarach Kopca Krakusa i Pomnika Ofiar Faszyzmu wykazały, że chmury punktów, mimo wyższych wymagań obliczeniowych, oferują wyższą precyzję wyników, co zwiększa wiarygodność analiz oraz ekspertyz. Dzięki pełnym danym przestrzennym, chmury punktów pozwalają na dokładniejsze odwzorowanie terenu, co ma kluczowe znaczenie w kontekście zaawansowanych analiz przestrzennych.

Analizy dowiodły, że przy tworzeniu wykresów widoczności na wielkoskalowych chmurach punktów pojawia się istotny problem związany z brakiem możliwości wiarygodnego przetwarzania dużej liczby punktów i tworzenia na ich podstawie powierzchni TIN, wynikający z zbyt dużego nakładu obliczeniowego wymaganego do stworzenia powierzchni. Rozwiązaniem tego problemu okazała się autorska metoda podziału chmury punktów na części radialne, która pozwoliła na efektywne zarządzanie

danymi i umożliwiła proces generowania wykresów widoczności. Wyniki wskazują, że zastosowanie takiego podziału umożliwi wydajne tworzenie wykresów dla chmur punktów o dużej skali, zachowując wysoką dokładność analiz. Zidentyfikowano jednak pewne wyzwania związane z podziałem radialnym, takie jak trudności w łączeniu wykresów częściowych w pełny wykres oraz występowanie niedokładności na granicach powierzchni TIN, które mogłyby wpłynąć na jakość wyników. Problemy te zostały rozwiązane poprzez zwiększenie zakresu wycinków radialnych, zastosowanie technik erozji krawędzi w obszarach łączenia oraz dodanie centralnego wykresu widoczności, co pozwoliło na uzyskanie spójnych i precyzyjnych wyników. Liczne próby wykazały, że proponowane rozwiązania skutecznie eliminują te trudności i zapewniają dokładne odwzorowanie widoczności, co czyni metodę bardziej niezawodną i użyteczną w praktycznych zastosowaniach.

W celu zwiększenia efektywności podziału chmury punktów zaproponowano zmianę struktury danych przechowującej chmurę punktów. Poddano analizie różne struktury, w tym stosy, grafy i drzewa, wyróżniając kD drzewa, które uporządkowało punkty i umożliwiło szybsze ich przetwarzanie. W pracy autor zaprezentował opracowany algorytm selekcji punktów bazujących na wycinkach radialnych, oparty na metodzie odrzucania poddrzew, który znacząco skrócił czas wyboru punktów należących do wycinków radialnych. Dzięki temu, proces selekcji punktów stał się szybszy, co przyspieszyło generowanie częściowych wykresów widoczności, a tym samym całkowitego wykresu. Takie podejście znacząco zwiększyło efektywność wyznaczania wycinków radialnych na dużych zbiorach danych, co miało kluczowe znaczenie dla optymalizacji procesu przetwarzania chmur punktów i umożliwiło uzyskanie wyników w krótszym czasie, czyniąc metodę bardziej dostępną i użyteczną w praktycznych zastosowaniach.

W kolejnym etapie pracy zajęto się przyspieszeniem drugiej części procesu, czyli renderowania wycinków radialnych. Opracowana metoda usprawniała tworzenie wykresów widoczności na wielkoskalowych chmurach punktów poprzez równoległe przetwarzanie częściowych wykresów na wielu maszynach obliczeniowych. Maszyny te jednocześnie generowały częściowe wykresy widoczności, wykorzystując dostępne zasoby, które były znacznie większe niż przy wykorzystaniu jednego komputera. Znacząco skróciło to czas całkowitego przetwarzania i umożliwiło szybkie uzyskanie pełnego wykresu widoczności. Przeanalizowano kilka przypadków równoległego

przetwarzania przy wykorzystaniu różnych liczb instancji oprogramowania oraz różnych konfiguracji liczby przypisanych procesorów. Wyniki eksperymentów wykazały, że zastosowanie tej technologii pozwala na znaczne przyspieszenie całego procesu, co udowodniono poprzez demonstrację czasów przetwarzania dla różnych wariantów równoległego przetwarzania, a także przedstawiono znaczną poprawę efektywności w praktycznych zastosowaniach.

Ostatnim elementem badań było zastosowanie opracowanej metody w rzeczywistych projektach pochodzących z otoczenia gospodarczego. Zastosowanie autorskiej metody tworzenia wykresów umożliwiło wykonanie ekspertyz na wielkoskalowych chmurach punktów, co potwierdziło jej skuteczność w praktycznych zastosowaniach. Prace wykazały, że proponowane rozwiązanie spełnia swoje zadanie w analizach widoczności, zapewniając wysoką precyzję i efektywność. Opracowana metoda stanowi wartościowe narzędzie dla takich dziedzin jak architektura krajobrazu, czy planowanie przestrzenne, gdzie precyzyjna analiza widoczności jest niezbędna do podejmowania właściwych decyzji projektowych i inżynierskich.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Urbieta, M. Urbieta, T. Laborde, G. Villarreal, and G. Rossi, “Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence,” *Journal of Building Engineering*, vol. 78, p. 107672, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107672>.
- [2] B. Hämmerle Martin and Höfle, “Introduction to LiDAR in Geoarchaeology from a Technological Perspective,” in *Digital Geoarchaeology: New Techniques for Interdisciplinary Human-Environmental Research*, M. and B. O. Siart Christoph and Forbriger, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 167–182. doi: 10.1007/978-3-319-25316-9_11.
- [3] C. Chen, B. Chang, Y. Li, and B. Shi, “Filtering airborne LiDAR point clouds based on a scale-irrelevant and terrain-adaptive approach,” *Measurement*, vol. 171, p. 108756, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108756>.
- [4] M. Hu, X. Luo, J. Chen, Y. C. Lee, Y. Zhou, and D. Wu, “Virtual reality: A survey of enabling technologies and its applications in IoT,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 178, p. 102970, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JNCA.2020.102970.
- [5] R. Rusu and S. Cousins, “3D is here: Point cloud library (PCL),” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2011 (ICRA 2011)*, Sep. 2011. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
- [6] P. Grussenmeyer, T. Landes, T. Voegtle, and K. Ringle, “Comparison Methods of Terrestrial Laser Scanning, Photogrammetry and Tacheometry Data for Recording of Cultural Heritage Buildings,” *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, Sep. 2008.
- [7] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman, and A. Lytle, “Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques,” *Autom Constr*, vol. 19, no. 7, pp. 829–843, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>.
- [8] G. Vosselman and H.-G. Maas, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. 2010.

- [9] L. Graham, J. Plasker, and A. L. A. S. W. Group, "LAS 1.4 Specification," *The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, Nov. 2019.
- [10] Z. Kurczyński and K. Bakula, "Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK," *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 23, pp. 59–68, Dec. 2013.
- [11] T. Nord-Larsen and T. Riis-Nielsen, "Developing an airborne laser scanning dominant height model from a countrywide scanning survey and national forest inventory data," *Scand J For Res*, vol. 25, no. 3, pp. 262–272, 2010, doi: 10.1080/02827581.2010.486000.
- [12] E. Ahokas, H. Kaartinen, and J. Hyypä, "On the Quality Checking of the Airborne Laser Scanning-based Nationwide Elevation Model in Finland," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 37, Sep. 2007.
- [13] M. Andriasyan, J. Moyano, J. E. Nieto-Julián, and D. Antón, "From Point Cloud Data to Building Information Modelling: An Automatic Parametric Workflow for Heritage," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2020, doi: 10.3390/rs12071094.
- [14] N. Abreu, A. Pinto, A. Matos, and M. Pires, "Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 12, no. 7, 2023, doi: 10.3390/ijgi12070260.
- [15] J.-P. Virtanen *et al.*, "Interactive dense point clouds in a game engine," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 163, pp. 375–389, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.007>.
- [16] P. Regulski, J. Tomczyk, M. Białowarczuk, W. Nowak, and M. Niezgódka, "Digital science platform: an interactive web application and database of osteological material for anatomy education," *BMC Med Educ*, vol. 22, no. 1, p. 362, 2022, doi: 10.1186/s12909-022-03408-5.
- [17] M. E. Hodgson and P. Bresnahan, "Accuracy of airborne lidar-derived elevation," *Photogramm Eng Remote Sensing*, vol. 70, no. 3, pp. 331–339, 2004.

- [18] D. A. White, "LiDAR, Point Clouds, and Their Archaeological Applications," in *Mapping Archaeological Landscapes from Space*, New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 175–186. doi: 10.1007/978-1-4614-6074-9_14.
- [19] F. J. Aguilar and J. P. Mills, "Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models," *The Photogrammetric Record*, vol. 23, no. 122, pp. 148–169, 2008.
- [20] F. J. Aguilar, J. P. Mills, J. Delgado, M. A. Aguilar, J. G. Negreiros, and J. L. Pérez, "Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, no. 1, pp. 103–110, 2010.
- [21] N. M. Saraf, K. N. Kamarolzaman, N. M. Saad, N. Khalid, A. R. Abdul Rasam, and A. N. Othman, "Data Verification of LiDAR-Derived DEM from Different Interpolation Techniques," in *Charting the Sustainable Future of ASEAN in Science and Technology*, N. Z. Alias and R. Yusof, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 361–375.
- [22] B. Lohani and S. Ghosh, "Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems," *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, vol. 87, no. 4, pp. 567–579, 2017, doi: 10.1007/s40010-017-0435-9.
- [23] C. Chi, X. Sun, N. Xue, T. Li, and C. Liu, "Recent Progress in Technologies for Tactile Sensors," *Sensors*, vol. 18, no. 4, 2018, doi: 10.3390/s18040948.
- [24] cnc-step, "Skaner Inwazyjny," <https://www.cnc-step.com/digitizer-scanner-1000pro-touchprobe/>. Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.cnc-step.com/digitizer-scanner-1000pro-touchprobe/>
- [25] F. Diara, "Structured-Light Scanning and Metrological Analysis for Archaeology: Quality Assessment of Artec 3D Solutions for Cuneiform Tablets," *Heritage*, vol. 6, no. 9, pp. 6016–6034, 2023, doi: 10.3390/heritage6090317.
- [26] D. Lague, N. Brodu, and J. Leroux, "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, pp. 10–26, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>.

- [27] C. Friedrich, S. Bourguignon, J. Idier, and Y. Goussard, “Three-Dimensional Microwave Imaging: Fast and Accurate Computations with Block Resolution Algorithms,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, 2020, doi: 10.3390/s20216282.
- [28] E. Ratajczyk, “Współrzędnościowa technika pomiarowa,” 1994.
- [29] center3dprint, “Bezinwazyjny skaner,” <https://center3dprint.com/pl/einscan-sp>.
- [30] Andrzej Wróbel, “FOTOGRAMETRIA.”
- [31] B. Dewitt and P. R. Wolf, “Elements of Photogrammetry(with Applications in GIS),” 2000. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129533117>
- [32] “Geoportal Krajowy,,” 2025. [Online]. Available: https://mapy.geoportal.gov.pl/imap/Imgp_2.html
- [33] H. Zhang *et al.*, “Deep learning-based 3D point cloud classification: A systematic survey and outlook,” *Displays*, vol. 79, p. 102456, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102456>.
- [34] X. Gu, X. Wang, and Y. Guo, “A Review of Research on Point Cloud Registration Methods,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 782, no. 2, p. 22070, Mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/782/2/022070.
- [35] A. M. Esmoris, H. Weiser, L. Winiwarter, J. C. Cabaleiro, and B. Höfle, “Deep learning with simulated laser scanning data for 3D point cloud classification,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 215, pp. 192–213, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.06.018>.
- [36] G. Schweinfurth, “Orthophotomaps from digital orthophotos,” *Photogrammetria*, vol. 40, no. 2, pp. 77–85, 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/0031-8663\(85\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0031-8663(85)90002-X).
- [37] N. Borowiec and A. Hamerla, “Comparison of Sealing Surface Degree Assessment Based on Orthophotomap and Lidar Data,” *Journal of Sustainable Mining*, vol. 12, no. 1, pp. 20–26, 2013, doi: <https://doi.org/10.7424/jsm130105>.

- [38] Q. Zhou, "Digital elevation model and digital surface model," *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, pp. 1–17, 2017.
- [39] F. Dell'Acqua, P. Gamba, and A. Mainardi, "Digital terrain models in urban areas," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, Sep. 2001.
- [40] V. Nandam and P. L. Patel, "A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions," *J Hydrol (Amst)*, vol. 630, p. 130654, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>.
- [41] W. Zhang and D. R. Montgomery, "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations," *Water Resour Res*, vol. 30, pp. 1019–1028, 1994, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54877837>
- [42] P. A. Burrough, *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, 1998.
- [43] J. Wilson and J. Gallant, "Digital Terrain Analysis in Terrain Analysis: Principles and Applications," in *Terrain analysis: principles and applications.*, vol. 479, 2000, pp. 1–27.
- [44] I. D. Moore, R. B. Grayson, and A. R. Ladson, "Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications," *Hydrol Process*, vol. 5, no. 1, pp. 3–30, 1991, doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- [45] S. E. Lakshmi and K. Yarrakula, "Review and critical analysis on digital elevation models," *Geofizika*, 2019, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:201106719>
- [46] U. Forczek-Brataniec, *Visible space. A visual analysis in the landscape planning and designing*. 2018.
- [47] A. Ozimek, P. Ozimek, A. Böhm, and W. Wańkowicz, *Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych przy użyciu cyfrowych analiz terenu wraz z*

oceną ekonomiczną (*Planning spaces with high scenic values by means of digital terrain analyses and economic evaluation*). 2013.

- [48] C. R. V Tandy, “The isovist method of landscape survey,” *Methods of landscape analysis*, vol. 10, pp. 9–10, 1967.
- [49] M. L. Benedikt, “To take hold of space: isovists and isovist field,” *Environment and Planning B*, vol. 6, pp. 47–65, 1979.
- [50] A. Ozimek, P. Ozimek, A. Bohm, and W. Wańkiewicz, “Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych przy użyciu cyfrowych analiz terenu wraz z oceną ekonomiczną,” *Wydawnictwo PK*, 2013.
- [51] J. R. Parent and Q. Lei-Parent, “Rapid viewshed analyses: A case study with visibilities limited by trees and buildings,” *Applied Geography*, vol. 154, p. 102942, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102942>.
- [52] X. Yang, N. Fox, D. Van Berkel, and M. Lindquist, “Viewscape: An R package for the spatial analysis of landscape perception and configurations in viewsheds of landscapes,” *SoftwareX*, vol. 26, p. 101662, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101662>.
- [53] Paweł. Ozimek, *Zastosowanie algorytmów światła lokalnego w wyznaczaniu wykresów widoczności* /. [s.n.], 2002.
- [54] P. Amini Behbahani, N. Gu, and M. Ostwald, “Viraph: exploring the potentials of visibility graphs and their analysis,” *Visualization in Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 17, 2017, doi: [10.1186/s40327-017-0056-z](https://doi.org/10.1186/s40327-017-0056-z).
- [55] C. Lehto, M. Hedblom, A. Filyushkina, and T. Ranius, “Seeing through their eyes: Revealing recreationists’ landscape preferences through viewshed analysis and machine learning,” *Landsc Urban Plan*, vol. 248, p. 105097, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105097>.
- [56] X. Dai, D. Felsenstein, and A. Y. Grinberger, “Viewshed effects and house prices: Identifying the visibility value of the natural landscape,” *Landsc Urban Plan*, vol. 238, p. 104818, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104818>.

- [57] F. Biljecki, H. Ledoux, and J. Stoter, “An improved LOD specification for 3D building models,” *Comput Environ Urban Syst*, vol. 59, pp. 25–37, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005.
- [58] A. Habib, J. Kersting, T. Mccaffrey, and A. Jarvis, “Integration of LIDAR and Airborne Imagery for Realistic Visualization of 3D Urban Environments,” *Proceedings of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, (ISPRS Congress)*, vol. 37, Sep. 2008.
- [59] A. Turner, M. Doxa, D. O’Sullivan, and A. Penn, “From isovists to visibility graphs: A methodology for the analysis of architectural space,” *Environ Plann B Plann Des*, vol. 28, no. 1, pp. 103–121, 2001, doi: 10.1068/B2684.
- [60] J. Gorzelany, J. Janiczak, and M. Wilkosz, “Impact on investment projects on the spatial order and the image perception of Zakopane town,” *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, vol. 4, pp. 71–88, Nov. 2017, doi: 10.15576/GLL/2016.4.71.
- [61] R. Garg, S. Indu, and S. Chaudhury, “Camera and light source placement: A multi-objective approach,” *Proceedings - 2011 3rd National Conference on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics, NCVPRIPG 2011*, pp. 187–191, 2011, doi: 10.1109/NCVPRIPG.2011.47.
- [62] Instal.com, “MONITORING,” <https://www.instalcom.net/instalacja-monitoringu>.
- [63] R. Compagnon, “Solar and daylight availability in the urban fabric,” *Energy Build*, vol. 36, no. 4, pp. 321–328, Apr. 2004, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2004.01.009.
- [64] Anna Kaczmarz, “Największe wpadki architektoniczne w Polsce w 2019 r. Liderem krakowski budynek,” <https://gazetakrakowska.pl/najwieksze-wpadki-architektoniczne-w-polsce-w-2019-r-liderem-krakowski-budynek/ar/c9-14721968>.
- [65] R. Smardon, J. F. Palmer, and J. P. Felleman, “Foundations for visual project analysis,” 1986. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129806549>

- [66] J. J. Gibson, “The Ecological Approach to Visual Perception : Classic Edition,” *The Ecological Approach to Visual Perception*, Nov. 2014, doi: 10.4324/9781315740218.
- [67] David Wheatley and Mark Gillings, “Visual perception and GIS: developing enriched approaches to the study of archaeological visibility | Request PDF.” Accessed: Sep. 30, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/299363561_Visual_perception_and_GIS_developing_enriched_approaches_to_the_study_of_archaeological_visibility
- [68] R. Paar, M. Roić, A. Marendić, and S. Miletić, “Technological Development and Application of Photo and Video Theodolites,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/app11093893.
- [69] B. C. Victoria, “Forest Landscape Handbook,” *Province of British Columbia, Ministry of Forests.*, 1981.
- [70] Mieczysław Twarowski, “Słońce w architekturze.” Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: https://tezeusz.pl/slonce-w-architekturze-mieczyslaw-twarowski?srsId=AfmBOorcGfRphNPWOMJrN9HYhLYCafQtSZwJBrudtYUt2Zw8CbAe_GA3
- [71] L. Barba, M. Korman, S. Langerman, and R. I. Silveira, “Computing a visibility polygon using few variables,” *Computational Geometry*, vol. 47, no. 9, pp. 918–926, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2014.04.001>.
- [72] B. Joe and R. B. Simpson, “Corrections to Lee’s visibility polygon algorithm,” *BIT*, vol. 27, no. 4, pp. 458–473, Dec. 1987, doi: 10.1007/BF01937271.
- [73] D. T. Lee, “Visibility of a simple polygon,” *Comput Vis Graph Image Process*, vol. 22, no. 2, pp. 207–221, May 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(83\)90065-8](https://doi.org/10.1016/0734-189X(83)90065-8).
- [74] L. Barba, M. Korman, S. Langerman, and R. I. Silveira, “Computing a visibility polygon using few variables,” *Computational Geometry*, vol. 47, no. 9, pp. 918–926, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2014.04.001>.

- [75] E. Morello and C. Ratti, “A digital image of the city: 3-D isovists in Lynch’s Urban Analysis,” *Environ Plann B Plann Des*, vol. 36, pp. 837–853, Sep. 2009, doi: 10.1068/b34144t.
- [76] D. Fisher-Gewirtzman and I. A. Wagner, “Spatial openness as a practical metric for evaluating built-up environments,” *Environ Plann B Plann Des*, vol. 30, no. 1, pp. 37–49, 2003, doi: 10.1068/B12861.
- [77] P. P. J. Yang, S. Y. Putra, and W. Li, “Viewsphere: A GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation,” *Environ Plann B Plann Des*, vol. 34, no. 6, pp. 971–992, 2007, doi: 10.1068/B32142.
- [78] H. M. Michael J. Starek Tianxing Chu and R. S. Harmon, “Viewshed simulation and optimization for digital terrain modelling with terrestrial laser scanning,” *Int J Remote Sens*, vol. 41, no. 16, pp. 6409–6426, 2020, doi: 10.1080/01431161.2020.1752952.
- [79] X. Dai, D. Felsenstein, and A. Y. Grinberger, “Viewshed effects and house prices: Identifying the visibility value of the natural landscape,” *Landsc Urban Plan*, vol. 238, p. 104818, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104818>.
- [80] J. Orlof and P. Ozimek, “TIN Surface and Radial Viewshed Determination Algorithm Parallelisation on Multiple Computing Machines,” *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.3390/sym13030424.
- [81] O. J., “Point Cloud based viewshed generation in Autocad Civil 3D,” *Technical Transactions*, vol. 12, pp. 143–155, 2017.
- [82] G. S. Johnson, I. Wald, S. Woop, C. Benthin, and M. Ernst, “High-Performance Ray Tracing,” *High Performance Parallelism Pearls: Multicore and Many-core Programming Approaches*, pp. 349–358, 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-802118-7.00021-2.
- [83] G. Zhu, J. Li, J. Wu, M. Ma, L. Wang, and N. Jing, “HiXDraw: An Improved XDraw Algorithm Free of Chunk Distortion,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 8, no. 3, 2019, doi: 10.3390/ijgi8030153.
- [84] P. K. Wróżyński R, “Wyzwania i narzędzia w ocenie krajobrazu,” in *Wyzwania i narzędzia w ocenie krajobrazu*, 2023, ch. 8.

- [85] Z. Čučković, “Advanced viewshed analysis: a Quantum GIS plug-in for the analysis of visual landscapes,” *The Journal of Open Source Software*, vol. 1, Sep. 2016, doi: 10.21105/joss.00032.
- [86] A. Appel, “Some techniques for shading machine renderings of solids,” in *Proceedings of the April 30–May 2, 1968, Spring Joint Computer Conference*, in AFIPS ’68 (Spring). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1968, pp. 37–45. doi: 10.1145/1468075.1468082.
- [87] Z. Li, Q. Zhu, and C. Gold, “Digital terrain modeling: Principles and methodology,” *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, pp. 1–320, Jan. 2004, doi: 10.1201/9780203357132/DIGITAL-TERRAIN-MODELING-ZHILIN-LI-CHRISTOPHER-ZHU-CHRIS-GOLD/ACCESSIBILITY-INFORMATION.
- [88] B. Delaunay, “Sur la sphère vide: Bull, Acad. Science USSR VII, Clas,” *Sci. Mat. Nat*, pp. 793–800, 1934.
- [89] T. Klouček, O. Lagner, and P. Šimová, “How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines,” *Applied Geography*, vol. 64, pp. 46–54, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.09.005>.
- [90] A. Salehi, A. Halabian, B. Dadras, M. Salehi, and F. Beni, “A novel fast and accurate method for computing viewshed of a region,” *Geocarto Int*, vol. 37, pp. 1–18, Sep. 2022, doi: 10.1080/10106049.2022.2129841.
- [91] O. Lagner, T. Klouček, and P. Šimová, “Impact of input data (in)accuracy on overestimation of visible area in digital viewshed models,” *PeerJ*, vol. 2018, no. 5, p. e4835, May 2018, doi: 10.7717/PEERJ.4835/TABLE-7.
- [92] Cloud Compare, “Cloud Compare documentation,” <https://www.cloudcompare.org/documentation.html>.
- [93] G. L. W. X. T. Y. Liu Yang, “Research on Simplification Method of Point Cloud Feature Preservation,” *APPLIED LASER*, 2024.

- [94] K. Zhang, S. Qiao, X. Wang, Y. Yang, and Y. Zhang, "Feature-Preserved Point Cloud Simplification Based on Natural Quadric Shape Models," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, 2019, doi: 10.3390/app9102130.
- [95] L. Zhu *et al.*, "Multisource Point Clouds, Point Simplification and Surface Reconstruction," *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 22, 2019, doi: 10.3390/rs11222659.
- [96] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, and R. L. Rivest, "Introduction to Algorithms , Second Edition," *Computer (Long Beach Calif)*, vol. 7, no. 9, p. 1184, 2001, doi: 10.2307/2583667.
- [97] dr inż. Jędrzej Byrski, "Praktyczne zapoznanie się ze strukturą danych lista.," <https://home.agh.edu.pl/~jbyrski/PwC/lista.pdf>.
- [98] D. E. Knuth, *The art of computer programming, volume 1 (3rd ed.): fundamental algorithms*. USA: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1997.
- [99] F. Liang, "Word Hy-phen-a-tion by Com-put-er," Oct. 2008.
- [100] M. Crochemore and L. M. S. Russo, "Cartesian and Lyndon trees," *Theor Comput Sci*, vol. 806, pp. 1–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2018.08.011>.
- [101] R. Ranjbarzadeh *et al.*, "Breast tumor localization and segmentation using machine learning techniques: Overview of datasets, findings, and methods," *Comput Biol Med*, vol. 152, p. 106443, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106443>.
- [102] M. Loporchio, A. Bernasconi, D. Di Francesco Maesa, and L. Ricci, "A survey of set accumulators for blockchain systems," *Comput Sci Rev*, vol. 49, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100570.
- [103] A. Rosenfeld, "TREE STRUCTURES FOR REGION REPRESENTATION The support of the Defense Advanced Research Projects Agency and the U.S. Army Night Vision Laboratory under Contract DAAG-53-76C-0138 (DARPA Order 3206) is gratefully acknowledged, as is the help of Kathryn Riley in preparing this paper. The material in this paper is based on a series of reports by H. Samet, as well as two reports by C. R. Dyer and M. Shneier.," in *Map Data Processing*, H.

- FREEMAN and G. G. PIERONI, Eds., Academic Press, 1980, pp. 137–150. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-267180-7.50012-8>.
- [104] R. Schnabel and R. Klein, “Octree-based point-cloud compression,” in *Proceedings of the 3rd Eurographics / IEEE VGTC Conference on Point-Based Graphics*, in SPBG’06. Goslar, DEU: Eurographics Association, 2006, pp. 111–121.
- [105] J. Zhang and X. Xiu, “K-d tree based approach for point location problem in explicit model predictive control,” *J Franklin Inst*, vol. 355, no. 13, pp. 5431–5451, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.040>.
- [106] R. Chandra, “Parallel programming in OpenMP,” *Morgan Kaufmann*, 2001.
- [107] B. Chapman, G. Jost, and R. van der Pas, *Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming (Scientific and Engineering Computation)*. The MIT Press, 2007.
- [108] P. S. Pacheco, *Parallel programming with MPI*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996.
- [109] Y. Xia, Y. Li, and X. Shi, “Parallel Viewshed Analysis on GPU Using CUDA,” in *2010 Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization*, 2010, pp. 373–374. doi: 10.1109/CSO.2010.12.
- [110] Sham Tickoo, “Exploring AutoCAD Civil 3D 2017 | WorldCat.org.” Accessed: Oct. 28, 2024. [Online]. Available: <https://search.worldcat.org/title/967730736>
- [111] Alex Allain, “Jumping Into C++,” 2013.
- [112] Herbert Schildt, *C# 4.0 The Complete Reference*. 2010.
- [113] K. T. S. Muntasir, *Batch File: The Resource Guide to Batch File Code and Commands*. Independent Publishing Platform, 2011.

14. SPIS TABEL

Tabela 1 Punkty używane do obliczania widoczności	72
Tabela 2: Różnica i odejmowanie dla analizy widoczności na podstawie DEM i chmury punktów.....	75
Tabela 3: Wyniki analizy widoczności na podstawie NMT i chmury punktów wyrażone w pikselach.....	82
Tabela 4 Czas potrzebny na stworzenie wykresu widoczności w zależności od metody renderowania.....	83
Tabela 5 Częściowe wykresy widoczności.....	96
Tabela 6 Porównanie dokładności wycinków radialnych.....	98
Tabela 7 Parametry komputera	102
Tabela 8 Parametry komputera	130
Tabela 9 Czasy dla wyznaczenia mapy widoczność	131
Tabela 10 Parametry komputerów	139
Tabela 11 Czas wykonania zadania 1, na chmurze punktów (A), jedna po drugiej jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni	140
Tabela 12 Czas wykonania zadania 1, na chmurze punktów (A), na jednym komputerze przy wykorzystaniu różnej liczby rdzeni równoległe i czterech instancji oprogramowania AutoCad Civil 3D.....	140
Tabela 13 Porównanie czasu wykonania jednej części chmury (A) na jednym rdzeniu z czasem wykonania 4 części chmury (A) na 4 rdzeniach równoległe.	141
Tabela 14 Czas wykonania zadania 2, na chmurze punktów (B), jedno po drugim, równoległe na różnej liczbie komputerów.....	142
Tabela 15 Czas wykonania zadania 2, na chmurze punktów (B), jedno po drugim, równoległe na różnej liczbie komputerów.....	142
Tabela 16 Parametry komputera	144
Tabela 17 Czas renderowania wykresu widoczności	144

15. SPIS ILUSTRACJI

Fig. 1 Skala chmury punktów	19
Fig. 2 Przykład wielkoskalowej chmury punktów	20
Fig. 3 Przykład średnioskalowej chmury punktów	21
Fig. 4 Przykład małoskalowej chmury punktów	22
Fig. 5 LIDAR - metoda skanowania terenu ([22])	23
Fig. 6 Skaner inwazyjny [24]	25
Fig. 7 Bezinwazyjny skander 3D [29]	27
Fig. 8 Sposób wykonania szeregowych zdjęć lotniczych ([30])	28
Fig. 9 Chmura punktów ze wszystkimi klasami	30
Fig. 10 Chmura punktów z wyłączonymi niektórymi klasami	30
Fig. 11 Ortofotomapa	32
Fig. 12 Wizualizacja numerycznego modelu terenu	33
Fig. 13 Ilustracja numerycznego modelu pokrycia terenu	35
Fig. 14 Wykres widoczności	38
Fig. 15 Mapa widoczności ([53])	39
Fig. 16 Przykład inwestycji wpływającej na percepcję krajobrazu ([60])	41
Fig. 17 Wykres widoczności kamer	43
Fig. 18 Przykład złego umieszczenia fotowoltaiki [62]	44
Fig. 19 Przykład złego nasłonecznienia [64]	44
Fig. 20 Zakres pola widoczności wyznaczonego przez żarówkę umieszczoną na makiemie obszaru. [65]	46
Fig. 21 Linijka Słońca [70]	47
Fig. 22 Po lewej: ogólne ustawienie, wierzchołki odbite względem punktu q są zaznaczone białym punktem (pozostałe wierzchołki są czarne). Po prawej: wielokąt widoczności [74]	49
Fig. 23 Obliczanie isovist 3D na NMT w odniesieniu do przestrzeni widocznych i ukrytych.	51
Fig. 24 Wysokość lini widzenia (LOS)[83]	54
Fig. 25 XDraw [83]	55
Fig. 26 Schemat algorytmu ray tracing [47]	61
Fig. 27 Algorytm śledzenia promienia w rzutowaniu ortogonalnym [47]	62

Fig. 28 Chmura punktów	64
Fig. 29 Siatka TIN	65
Fig. 31 Siatka GRID	65
Fig. 31 Dwuwymiarowa hipersfera opisana na trójkącie.	66
Fig. 32 Problem z odwzorowaniem obiektów na powierzchni TIN.....	67
Fig. 33 Przykład części siatki TIN ze wstawionym punktem światła	68
Fig. 34 Rendering sceny z punktem świetlnym	68
Fig. 35 Wykres widoczności – rendering po binaryzacji.....	69
Fig. 36 Pomnik Ofiar Faszyzmu	73
Fig. 37 Wykres widoczności bazujący na NMPT	74
Fig. 38 Wykres widoczności bazujący na chmurze punktów	74
Fig. 39 Złożenie wykresów	74
Fig. 40 Różnica bezwzględna wykresów.....	74
Fig. 41 Odejmowanie wykresów (chmura punktów - NMPT)	74
Fig. 42 Mapa hipsometryczna NMPT	76
Fig. 43 Mapa hipsometryczna PC	76
Fig. 44 Zakresy rzędnych.....	76
Fig. 45 Wykres widoczności wygenerowany dla Kopca Krakusa (punkt 2) na podstawie danych NMPT dla dużego obszaru badawczego nałożony na widok satelitarny (przestrzenie widoczne zaznaczone na żółto)	77
Fig. 46 Wykres widoczności wygenerowany dla Kopca Krakusa (punkt 2) na podstawie danych NMPT dużego obszaru badawczego.....	78
Fig. 47 Wykres widoczności bazujący na NMPT	79
Fig. 48 Wykres widoczności bazujący na chmurze punktów	79
Fig. 49 Złożenie wykresów	79
Fig. 50 Różnica bezwzględna wykresów.....	79
Fig. 51 Odejmowanie wykresów (chmura punktów - NMPT)	79
Fig. 52 Mapa hipsometryczna NMPT	80
Fig. 53 Mapa hipsometryczna PC	80
Fig. 54 Zakresy rzędnych.....	80
Fig. 55 Podział radialny chmury punktów.....	86
Fig. 56 Podział chmury punktów na wycinek radialny	87
Fig. 57 Powierzchnia TIN na bazie radialnego wycinka chmury punktów wraz z punktem świetlnym	88

Fig. 58 Wyrenderowany wycinek radialny	88
Fig. 59 Wycinek radialny po procesie binaryzacji – wykres widoczności na bazie wycinka radialnego.....	89
Fig. 60 Wycinek 1	90
Fig. 61 Wycinek 2	90
Fig. 62 Połączenie wycinków z zaznaczonymi "białymi strzałami"	90
Fig. 63 Powierzchnia TIN z zaznaczonymi błędnymi wielokątami.....	91
Fig. 64 Wycinek radialny z zaznaczoną erozją	92
Fig. 65 Wycinki radialne połączone nakładkowo	92
Fig. 66 Podział radialny	93
Fig. 67 Podział radialny z nakładką oraz zaznaczonym prostopadłym kierunkiem erozji	93
Fig. 68 Podział po przeprowadzonej erozji z zaznaczonym fragmentem pustej przestrzeni	93
Fig. 69 Podział na wycinki radialne wraz z chmurą centralną.....	94
Fig. 70 Wypełnienie pustych przestrzeni przez chmurę centralną.....	94
Fig. 71 Wysokość chmury obejmuje cały rendering	95
Fig. 72 Szerokość chmury obejmuje cały rendering	95
Fig. 73 Wykres widoczności powstały na bazie wycinków radialnych	96
Fig. 74 Wykres widoczności bez części centralnej	97
Fig. 75 Wykres widoczności uzupełniony o część centralną.....	97
Fig. 76 Różnica wykresu widoczności bazującego na NMPT zaznaczona na czerwono z wykresem bazującym na pełnej chmurze punktów.	100
Fig. 77 Różnica wykresu widoczności bazującego na wycinkach radialnych chmury punktów zaznaczona na czerwono z wykresem bazującym na pełnej chmurze punktów.....	101
Fig. 78 Tablica.....	104
Fig. 79 Stos	106
Fig. 80 Kolejka.....	107
Fig. 81 Graf [96].....	108
Fig. 82 Drzewo - struktura danych.....	109
Fig. 83 Podział przestrzeni na równe kwadratowe części	116
Fig. 84 Drzewo czwórkowe	117
Fig. 85 Podział sześcianu	118

Fig. 86 Drzewo ósemkowe	118
Fig. 87 kD drzewo	119
Fig. 88 Przykładowa chmura punktów zrzutowana na płaszczyznę XY	120
Fig. 89 Chmura punktów podzielona pionową osią przechodzącą przez punkt znajdujący się w medianie wyznaczonej po osi X	120
Fig. 90 Kolejny podział wedle punktów znajdujących w medianach dla lewego i prawego poddrzewa wyznaczonych po osi Y	120
Fig. 91 Powtórzenie poprzednich kroków dla wszystkich poddrzew	120
Fig. 92 Chmura punktów z zaznaczonymi osiami podziału 2D-drzewa z określonym punktem środka podziału radialnego wraz z zaznaczonymi kierunkami podziału 30 i 50 stopni.	121
Fig. 93 Algorytm odrzucania poddrzew	123
Fig. 94 Zasada odrzucania poddrzew	124
Fig. 95 Odrzucone części drzewa wedle przedstawionej zasady	127
Fig. 96 Przykład nieodrzuconego poddrzewa	128
Fig. 97 Zastosowanie dla faktycznej chmury punktów	129
Fig. 98 Odrzucone punkty w pierwszych krokach	130
Fig. 99 Zasada rozdziału zadań na wiele komputerów	134
Fig. 100 Schemat blokowy działania programu	136
Fig. 101 Końcowy wykres widoczności z zadania 2, chmura punktów (B).....	143
Fig. 102 Przykład MEB (mapy ekspozycji biernej) dla KP Równina Legnicka, przedstawiony w paletcie grayscale.	146
Fig. 103 Różnica pomiędzy mapą ekspozycji biernej wszystkich obiektów, które wpływają negatywnie na odbiór wizualny krajobrazu oraz taką samą mapą z uwzględnieniem planowanej elektrowni	148