

**Politechnika Śląska**

**Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki**

**Kierunek Informatyka**

##### Praca dyplomowa magisterska

###### Nawigacja postaci w grach komputerowych

Autor: Radosław Bigaj

Kierujący pracą: dr Ewa Lach

Gliwice, wrzesień 2013

# Spis treści

[1. Wstęp 6](#_Toc368233021)

[1.1. Geneza 6](#_Toc368233022)

[1.2. Cel pracy 6](#_Toc368233023)

[1.3. Przewodnik po pracy 6](#_Toc368233024)

[2. Sztuczna inteligencja w grach komputerowych 8](#_Toc368233025)

[2.1. Początki Sztucznej Inteligencji w grach 8](#_Toc368233026)

[2.2. Przykłady zastosowań Sztucznej Inteligencji w grach 10](#_Toc368233027)

[2.3. Techniki symulacji Sztucznej Inteligencji 12](#_Toc368233028)

[3. Znajdowanie ścieżki 16](#_Toc368233029)

[3.1. Graf odnajdowania ścieżki 17](#_Toc368233030)

[3.2. Definicja grafu 18](#_Toc368233031)

[3.3. Grafy ważone 18](#_Toc368233032)

[3.4. Skierowane grafy ważone 21](#_Toc368233033)

[3.5. Algorytm Dijkstry 23](#_Toc368233034)

[3.5.1. Przedstawienie problemu 23](#_Toc368233035)

[3.5.2. Opis algorytmu 24](#_Toc368233036)

[3.6. Algorytm A\* 27](#_Toc368233037)

[3.6.1. Przedstawienie problemu 28](#_Toc368233038)

[3.6.2. Opis algorytmu 28](#_Toc368233039)

[3.7. Algorytm JPS 31](#_Toc368233040)

[4. System nawigacji 35](#_Toc368233041)

[4.1. Analiza zagadnienia 35](#_Toc368233042)

[4.2. Założenia 35](#_Toc368233043)

[4.3. Narzędzia 36](#_Toc368233044)

[4.3.1. Blender 36](#_Toc368233045)

[4.3.2. Unity3D 37](#_Toc368233046)

[4.4. Specyfikacja zewnętrzna 39](#_Toc368233047)

[4.4.1. Konfiguracja dostarczonej biblioteki 40](#_Toc368233048)

[4.5. Specyfikacja wewnętrzna 41](#_Toc368233049)

[5. Założenia i wybrane technologie 47](#_Toc368233050)

[5.1. Cele badawcze 47](#_Toc368233051)

[6. Realizacja 48](#_Toc368233052)

[6.1. Przegląd map i wygenerowanych grafów 48](#_Toc368233053)

[6.2. Eksperyment 1 – badanie heurystyk 49](#_Toc368233054)

[6.3. Eksperyment 2 – optymalizacja 63](#_Toc368233055)

[7. Podsumowanie i wnioski 66](#_Toc368233056)

[8. Bibliografia 69](#_Toc368233057)

**SPIS RYSUNKÓW, TABEL, KODÓW ŹRÓDŁOWYCH**

[Rysunek 1 Model sztucznej inteligencji 17](#_Toc367815437)

[Rysunek 2 Schemat grafu 19](#_Toc367815438)

[Rysunek 3 Graf posiadający koszty 20](#_Toc367815439)

[Rysunek 4 Węzły grafu określające regiony [żródło] 21](#_Toc367815440)

[Rysunek 5 Skierowany graf ważony 22](#_Toc367815441)

[Rysunek 6 Przykład grafu, gdzie każda ścieżka jest optymalna 24](#_Toc367815442)

[Rysunek 7 Dijkstra - pierwsza iteracja 25](#_Toc367815443)

[Rysunek 8 Dijkstra - kolejna iteracja 25](#_Toc367815444)

[Rysunek 9 Aktualizacja otwartego węzła[źródło] 26](#_Toc367815445)

[Rysunek 10 Graf po zakończeniu obliczeń [źródło] 27](#_Toc367815446)

[Rysunek 11 A\* - działanie 29](#_Toc367815447)

[Rysunek 12 Aktualizacja zamkniętego węzła 32](#_Toc367815448)

[Rysunek 13 Proces tworzenia mapy w programie Blender 33](#_Toc367815449)

[Rysunek 14 Zrzut ekranu prezentujący środowisko silnika Unity3D 34](#_Toc367815450)

[Rysunek 15 Idea algorytmu JPS 37](#_Toc367815451)

[Rysunek 16 Przykład wymuszonych sąsiadów 38](#_Toc367815452)

[Rysunek 17 Skok diagonalny Rysunek 18 Horyzontalny skok 39](#_Toc367815453)

[Rysunek 19 Hierarchia projektu 41](file:///C:\Users\Radosław\Documents\Character-Navigation\doc\Politechnika%20Śląska_new.docx#_Toc367815454)

[Rysunek 20 Parametry konfiguracyjne 41](file:///C:\Users\Radosław\Documents\Character-Navigation\doc\Politechnika%20Śląska_new.docx#_Toc367815455)

[Rysunek 21 Dodany skrypt do agenta 43](#_Toc367815456)

[Rysunek 22 Zasada działania skryptu *funnel* 44](#_Toc367815457)

[Rysunek 23 Projekty map 52](#_Toc367815458)

[Rysunek 24 Pierwsza mapa z wygenerowaną ścieżką 53](#_Toc367815459)

[Rysunek 25 Druga mapa z wygenerowaną ścieżką 56](#_Toc367815460)

[Rysunek 26 Mapa 3 z wygenerowaną ścieżką 60](#_Toc367815461)

[Rysunek 27 Mapa 4 z wygenerowaną ścieżką 63](#_Toc367815462)

[Tabela 1Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów 57](#_Toc367414322)

[Tabela 2 Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory 58](#_Toc367414323)

[Tabela 3 Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów 58](#_Toc367414324)

[Tabela 4 Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory 59](#_Toc367414325)

[Tabela 5 Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów 59](#_Toc367414326)

[Tabela 6 Wyniki badań: mapa 1, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory 60](#_Toc367414327)

[Tabela 7 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów 61](#_Toc367414328)

[Tabela 8 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory 61](#_Toc367414329)

[Tabela 9 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów 62](#_Toc367414330)

[Tabela 10 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory 62](#_Toc367414331)

[Tabela 11 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów 62](#_Toc367414332)

[Tabela 12 Wyniki badań: mapa 2, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory 63](#_Toc367414333)

[Tabela 13 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów 64](#_Toc367414334)

[Tabela 14 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory 65](#_Toc367414335)

[Tabela 15 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów 65](#_Toc367414336)

[Tabela 16 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory 65](#_Toc367414337)

[Tabela 17 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów 66](#_Toc367414338)

[Tabela 18 Wyniki badań: mapa 3, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory 67](#_Toc367414339)

[Tabela 19 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów 67](#_Toc367414340)

[Tabela 20 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory 68](#_Toc367414341)

[Tabela 21 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów 68](#_Toc367414342)

[Tabela 22 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory 69](#_Toc367414343)

[Tabela 23 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów 69](#_Toc367414344)

[Tabela 24 Wyniki badań: mapa 4, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory 70](#_Toc367414345)

[Tabela 25 Wyniki działania algorytmu JPS, mapa 1 Tabela 26 Wyniki działania algorytmu JPS, mapa 2 71](#_Toc367414346)

[Tabela 27 Wyniki działania algorytmu JPS, mapa 3 Tabela 28 Wyniki działania algorytmu JPS, mapa 4 72](#_Toc367414347)

[Kod źródłowy 1 Implementacja grafu 24](#_Toc367414453)

[Kod źródłowy 2 Skrypt nawigacyjny 47](#_Toc367414454)

[Kod źródłowy 3 Klasa punktu w grafie 49](#_Toc367414455)

[Kod źródłowy 4 Pola klasy *Node* 49](#_Toc367414456)

[Kod źródłowy 5 Konstruktor obiektu Node 50](#_Toc367414457)

[Kod źródłowy 6 Pole publiczne klasy JumpPointNavigationMesh 51](#_Toc367414458)

[Kod źródłowy 7 Pole prywatne klasy JumpPointNavigationMesh 52](#_Toc367414459)

[Kod źródłowy 8 Metoda *FindPath* 53](#_Toc367414460)

[Kod źródłowy 9 Implementacja metody *Jump* 55](#_Toc367414461)

# Wstęp

## Geneza

Nawigacjach w grach komputerowych jest od wielu lat rozwijana i ulepszana oraz stanowi bardzo ważny element każdej gry komputerowej. Gracz komputerowy obecnie jest wymagającym klientem z punktu widzenia branży gier komputerowych. Rozwiązania dostarczane przez branże muszą działać w sposób zadowalający odbiorcę i dotyczy to każdego elementu. Wolno działający system nawigacji może zniechęcić gracza na tyle skutecznie, że gra przestanie mu się podobać, co w efekcie może doprowadzić do porażki gry na rynku. Dlatego warto badać powszechnie stosowane rozwiązania dotyczące nawigacji oraz szukać nowych rozwiązań mogących przyśpieszyć sam proces nawigowania.

## Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest przebadanie algorytmów nawigacji stosowanych w grach komputerowych. Nawigacje w grach komputerowych można utożsamić z problemem znajdowania ścieżki. Wynikiem działania takiego algorytmu jest wygenerowana droga z punktu startowego do celu.

W branży gier komputerowych powszechnie stosowanym algorytmem do znajdowania ścieżki jest algorytm A\* (ang. A star) i to on będzie przedmiotem badań. Jest to algorytm heurystyczny, posiadający duże możliwości optymalizacyjne. W pracy zostanie zaimplementowana przykładowa optymalizacja algorytmu A\*.

Na potrzeby badań zostanie zaprojektowane kilka trójwymiarowych map, na których będą odbywać się eksperymenty.

## Przewodnik po pracy

Rozdział drugi zawiera wprowadzenie w zagadnienia związane ze Sztuczną Inteligencją w grach komputerowych. Zawarta w nim jest krótka historia odnosząca się do Sztucznej Inteligencji w grach komputerowych. W rozdziale tym zostały przedstawione również produkcje będące kamieniami milowymi w rozwoju Sztucznej Inteligencji w grach. W rozdziale zawarto również przykładowe techniki symulacji Sztucznej Inteligencji powszechnie stosowane w grach komputerowych.

W rozdziale trzecim zostaje wprowadzone i omówione pojęcie grafu rozumiane przez programistę grafiki komputerowej. Następnie dokonany zostaje opis algorytmów związanych z odnajdywaniem ścieżki.

Rozdział czwarty zawiera postawione cele badawcze, charakterystykę wybranych narzędzi oraz opis wybranej metody optymalizacyjnej.

Piąty rozdział zawiera opis konfiguracji biblioteki użytej do realizacji celu badawczego. W tym rozdziale znajduje się również opis implementacji oraz przegląd zaprojektowanych map. Rozdział ten zawiera również dwa główne eksperymenty, w których dokonano badań efektywności algorytmu A\* ze względu na różne czynniki oraz jego optymalizacji.

Rozdział szósty zawiera wnioski i podsumowanie pracy.

# Sztuczna inteligencja w grach komputerowych

Sztuczna Inteligencja AI (ang. *Artificial Intelligence* ) jest istotnym elementem każdej gry wideo. Obszar zagadnień związanych ze Sztuczną Inteligencją w grach istnieje, właściwie odkąd pojawiły pierwsze gry wideo (rok 1970), jednak same algorytmy pojawiły się już kilkanaście lat wcześniej. Sztuczną Inteligencje w grach nie można utożsamiać ze Sztuczną Inteligencją znaną z badań naukowych. W grach Sztuczna Inteligencja ma na celu stosowanie pewnych trików, których celem jest jedynie symulacja inteligencji. Główne zastosowania AI to [wsk]:

* Podniesienia realizmu świata gry. Stosowana głównie w grach typu cRPG (ang. *Computer Role Playing Games*). Ma za zadanie sterować zachowaniem agentów, z którymi zetknie się bohater gracza.
* Wsparcie podczas walki. Jest to najczęściej spotykana kategoria Sztucznej Inteligencji w grach komputerowych. Stosowana powszechnie w grach strategicznych oraz grach akcji. Sztuczna Inteligencja ma na celu sterowanie agentami podczas walki.
* Relacjonowanie wydarzeń. Stosowane w grach sportowych. Sztuczna inteligencja pełni funkcje związane z trafnym komentowaniem zdarzeń zachodzących w świecie gry na podstawie bieżących działań gracza.
* I wielu innych.

Obszar działania Sztucznej Inteligencji nie kończy się jednak tylko na symulowaniu inteligentnych zachowań, ale może również nadać agentom cechy ludzkie. Po implementacji takiej funkcjonalności w grze może sprawić, że osiągnie ona duży sukces. Efekt taki można uzyskać przenosząc do wirtualnego świata ludzkie niedoskonałości oraz tworząc sposób porozumiewania zawierający nieliniowe dialogi czy duży zasobów słów postaci.

## Początki Sztucznej Inteligencji w grach

Pierwsza faza rozwoju gier komputerowych poświęcała najwięcej czasu wyświetlaniu grafiki, oczywistym tego powodem były ograniczenia czasu pracy procesora, a to grafika w większości gier robiła największa wrażenie. Takie podejście skutkowało tym, że sztuczna inteligencja została zepchnięta na dalszy plan. Przykładowe implementacje zawierały sztywno zakodowane schematy zachowania oraz proste maszyny stanów. W dzisiejszych czasach większość operacji związanej z przetwarzaniem grafiki odbywa się w układach graficznych komputerów GPU ( ang. *graphic processing unit*), a wzrost jakości wyświetlanej grafiki nie przyciąga graczy, którzy wymagają czegoś więcej od gier. Dlatego producenci gier, aby spełnić żądania graczy kładą większy nacisk na rozwój Sztucznej Inteligencji [wsk].

Gra "Tennis for Two" jest jedną z pierwszych gier wideo. Jest to symulacja tenisa ziemnego, w której obraz jest wyświetlany za pomocą oscyloskopu. Została stworzona przez Williama Higinbothama w 1958 roku [wsk]. Pierwszą grą wideo stworzoną specjalne na komputer osobisty było "Space War". Gra została napisana przez S. Russel'a na minikomputer w 1962 roku. Obydwie te gry łączyło to, że wymagały dwóch graczy do rozgrywki. Dopiero w latach siedemdziesiątych zaczęto stosować, pewne proste ustalone schematy odpowiadające za poruszanie się przeciwników, co można traktować jako początki Sztucznej Inteligencji w grach.

Pojęcie przeciwnika komputerowego często w grafice komputerowej określane jest mianem agenta lub agenta komputerowego.

Pierwszą grą, w której gracz posiadał przeciwników był "Pac-Man" wydany w 1979 roku. Agenci komputerowi sprawiali wrażenie inteligentnych - podczas pościgu za postacią gracza, na każdym z rozwidleń dróg agenci mieli różne szanse wyboru losowej drogi lub pogoni za graczem. W efekcie gracz miał odczucie, że komputerowi agenci współpracują ze sobą. Pac-Man zawierał implementacje prostej maszyny stanów, gdzie każdy z czterech agentów mógł gonić lub uciekać przed graczem w labiryncie. Pierwsze gry wideo bazowały na prostych lub bardziej złożonych wzorcach, jak w klasycznych grach "Golden Axe" (1987 rok) czy "Super Mario Brothers" (1985 rok), gdzie przeciwnicy zwykle poruszali się w jednym lub dwóch kierunkach, aż do napotkania gracza[wsk].

Pierwszą grą akcji posiadającą bardziej rozbudowaną Sztuczną Inteligencje jest "Goldeneye 007" (1997 rok). Pozwalała ona reagować agentom odpowiednio na ruch oraz akcję gracza. Komputerowi agenci posiadali zmysł wzroku i byli w stanie zauważyć czy pozostali agenci są martwi. Natomiast w grze "Thief: The Dark Project" (1998 rok) rozgrywka opierała się w znaczniej mierze na symulacji zmysłów wzroku i słuchu. Zostanie ona omówiona dokładniej w kolejnym rozdziale [wsk].

W latach 2001 i 2002 powstały dwie gry, które sprawiły, że gracze z niedowierzaniem patrzyli na poziom Sztucznej Inteligencji. Pierwsza z tych gier to "The Sims" ze studia Maxis, gdzie Sztuczna Inteligencja zajmowała się modelowaniem ludzkich emocji oraz potrzeb, przez co można powiedzieć, że gra była symulatorem życia. Drugą z gier jest "Black and White" ze studia Lionhead Studios. W tej grze komputerowej zachowanie agenta jest sterowane siecią neuronową przez, co może uczyć się w sztucznie stworzonym środowisku. Obecnie jednak większość gier wykorzystuje tylko proste techniki. Powszechnie stosowaną techniką są maszyny stanów oraz jej pochodne.

## Przykłady zastosowań Sztucznej Inteligencji w grach

W tym rozdziale zostanie przedstawione i opisane kilka przełomowych gier, które dzięki wykorzystaniu Sztucznej Inteligencji odniosły sukces branżowy i stały się rozpoznawalnymi markami, a co więcej niektóre z przedstawionych tytułów są do dzisiaj rozwijane. Poniżej przedstawione gry znalazły się w rankingu serwisu "AiGameDev" (strona: http://aigamedev.com/), w kategorii najbardziej innowacyjnych gier w historii. Dzięki osiągniętemu sukcesowi zapoczątkowały całą serię kolejnych wydań i kontynuacji, jest to jeden z kilku powodów, dla których warto się im przyjrzeć. Przedstawione tutaj gry są swego rodzaju pionierami w swojej klasie. Przyszło im się zmagać z wysokimi wymaganiami przed jakimi stawiał ich silnik Sztucznej Inteligencji, co więcej udało się im te wymagania spełnić, dzięki czemu poniższe tytuły odniosły sukces. Zostanie teraz przedstawione kilka gier z wyżej opisanego rankingu, wybranych na podstawie dostępności materiałów opisujących implementacje Sztucznej Inteligencji.

**Thief (rok 1999)**

Nowatorskie koncepcje wykorzystane w grze:

* Moduł odpowiedzialny za sztuczną inteligencje zbudowany jest z całego systemu czujników, dzięki któremu agenci mogą realistycznie reagować na bodźce świetlne i dźwiękowe.
* Agenci znajdujący się pod kontrolą sztucznej inteligencji korzystają z specjalnych nagrań audio, w celu oznajmienia swojego obecnego stanu. Pozwala to graczowi na zorientowanie się w jakieś sytuacji się znajduje.

**The Sims (rok 2000)**

Nowatorskie koncepcje wykorzystane w grze [wsk]:

* Zamodelowanie wirtualnej emocjonalnej więzi między agentami, dzięki czemu jest możliwe tworzenie związków między nimi.
* Każdy agent w grze ma swój zdefiniowany charakter, umiejętności, podstawowe potrzeby emocjonalne oraz fizyczne, mające wpływ na jego poczynania w grze. Emocje postaci są mierzone w zakresie (-100, 100), a następnie są mapowane do wyjściowej formy szczęścia/nastroju.
* W grze zastosowano inteligentne obiekty, co okazało się pomocne w implementacji zachowań. To obiekt definiuje, jak agent może wejść z nim w interakcje.

**Halo (rok 2001)**

Nowatorskie koncepcje wykorzystane w grze [wsk]:

* Inteligentni agenci potrafiący się kryć przed ostrzałem oraz używać rozważenie dostępnej broni,
* Wykorzystanie drzewa zachowań, które zostało bardzo dobrze przyjęte przez przemysł gier komputerowych,
* Sytuacja na polu bitwy ma wpływ na zachowanie jednostek.

**F.E.A.R. (rok 2005)**

Nowatorskie koncepcje wykorzystane w grze [wsk]:

* Pierwszy raz użyto systemu planowania zadań do generowanie zachowań zależnych od sytuacji.
* Agenci komputerowi sprawnie wykorzystują świat gry tak, aby zwiększyć jego realizm. Otwierają drzwi, znajdują osłony, przechodzą przez okna,
* Dokonano implementacji taktycznych technik walki - atak z flanki, przerywane serie ostrzału.

**Black & White (rok 2001)**

Nowatorskie koncepcje wykorzystane w grze:

* Zastosowanie technik, takich jak rozbudowane drzewa decyzyjne czy sztuczne sieci neuronowe,
* Silnik korzystający z architektury BDI (Przekonanie-Pragnienie-Zamiar ang. *Belief-Desire-Intention*),
* Gra symuluje nie tylko zachowanie stworzenia, ale też życie mieszkańców pracujących tak, aby rozwijać zamieszkiwaną wioskę.

## Techniki symulacji Sztucznej Inteligencji

Wyróżnia się wiele technik stosowanych do symulacji Sztucznej Inteligencji w grach komputerowych. Poniżej zostaną omówione najpopularniejsze z nich. W grach bardzo często najprostsze rozwiązania okazują się najlepszymi, dzięki czemu techniki takie jak: maszyny stanów, heurystyczne poszukiwanie drogi czy drzewa decyzyjne zyskały sobie dużą popularność.

**Maszyny stanów.**

Technika maszyny stanów była wykorzystywana w grach już w latach 90. do kontrolowania agentów komputerowych. Maszyny stanów stały się tak popularne i użyteczne, że są stosowane do zarządzania AI, również w najnowszych wysokobudżetowych produkcjach. Wykorzystuje się je też w komputerowych grach fabularnych cRPG(ang. *computer Role Playing Game*) do sterowania dialogami gracza z agentami. Co więcej zarządzają obiektami w grze, przechowują stan rozgrywki (np. zwycięstwo, porażka, wykonane zadanie, postać dotarła do punktu docelowego), przetwarzają komendy gracza oraz zarządzają światem gry.

Maszyna stanów zbudowana jest z pewnej ściśle określonej liczby stanów znajdujących w danej puli rozwiązań. Kolejno zostają przechwycone pewne zdarzenia, które zmieniają stan maszyny. Dzięki temu istnieje możliwość podjęcia jednego lub kilku działań w zależności od stanu w jakim się aktualnie znajduje obiekt gry.

**Heurystyczne poszukiwanie drogi.**

Jednym z problemów jaki rozwiązuje Sztuczna Inteligencja w grach jest określenie najlepszej drogi z punktu A do punktu B na terenie rozgrywki. Technika ta stosowana jest także do rozwiązywania zagadnień bardzo skomplikowanych i złożonych takich jak poruszanie się jednostek w formacjach czy planowanie strategiczne. Rozwiązaniem jakie stosuje się najczęściej dla problemów tego typu jest heurystyczny algorytm A\*. Algorytm ten podczas procesu określania drogi do celu nie szuka jej "na ślepo", tylko szacuje jej najbardziej prawdopodobny kierunek odrzucając inne mniej sensowne ścieżki.

Celem algorytm A\* jest minimalizacja obszaru poszukiwań najlepszej trasy, dzięki ustaleniu pewnego kierunku, który zawęża obszar rozważanych tras. Technika ta oblicza koszt dotarcia do punktu na mapie i dodaje do niego heurystykę określającą przewidywane koszty dotarcia do celu. Heurystyka jest liczona zwykle jako odległość od obecnego punktu do celu ignorując wszelkie przeszkody i ograniczenia umieszczone na mapie. W skrócie A\* sprawdza, po każdym wykonanym ruchu agenta wszystkie możliwe kierunki dalszej trasy i ponownie wybiera możliwe kierunki trasy o jak najniższym koszcie. W momencie, gdy rozważane położenie jest celem, algorytm kończy swoje działanie. W przeciwnym przypadku algorytm przechowuje przyległe położenie, tak aby w przyszłości móc rozważyć inne ścieżki.

**Drzewa decyzyjne.**

Drzewa decyzyjne zostały zaprojektowane z myślą o rozwiązywaniu problemów decyzyjnych oraz tworzeniu planu działania. Są powszechnie stosowane w grach takich jak: szachy czy warcaby.

Drzewo decyzyjne jest reprezentowane w postaci grafu decyzji i możliwych konsekwencji. Węzły odzwierciedlają stan gry, natomiast potomkowie to stany uzyskane po przeprowadzeniu ruchu. Każda ścieżka w takim drzewie kończy się węzłem końcowym. Agent komputerowy dokonuje analizy drzewa rozpatrując tym samym wszystkie możliwe posunięcia dostępne w aktualnej sytuacji. Następnie wybiera te, które uznał za najbardziej korzystne.

**Logika rozmyta.**

Pojęcie logiki rozmytej ma związek z teorią prawdopodobieństwa oraz teorią zbiorów rozmytych. Logika rozmyta jest jedną z logik wielowartościowych posiadającą stany pośrednie pomiędzy wartościami logicznymi (prawda, fałsz) , które określają przynależność do odpowiedniego zbioru. Daje to możliwość rozważenia odpowiedzi na pytanie "jak bardzo?", "ile?" przykładowo: "legion", "wataha", "grupa", "sporo", "kilka". Logia rozmyta wykorzystywana jest często do odwzorowania emocji w grach (np. "przyjacielski", "obojętny", "wrogi"). Za pomocą można modelować sferę uczuciową agentów komputerowych, co poprawia realizm gry.

**Sztuczne sieci neuronowe.**

Sztuczne sieci neuronowe zostały zaprojektowane, aby działać podobnie jak sieci neuronowe w mózgu człowieka. Przetwarzają one sygnały oraz wykonują obliczenia za pomocą neuronów - są to elementy, które wykonują pewne operacje na wejściu. Za pomocą sieci neuronowej agent może się uczyć wraz z postępem gry. Natrafiając na nowy rodzaj sytuacji, dostosowuje się do niej korzystając ze zdobytego doświadczenia.

Sieci neuronowe od wielu lat zamierzano przystosować do tworzenia Sztucznej Inteligencji w grach komputerowych. W 2000 roku swoją premierę miała gra Colin McRae Rally 2.0 - gra będąca symulatorem wyścigów. Gra ta zawierała implementacje sieci neuronowej. Za dane wejściowe przyjmowała ona parametry opisujące trasę jaką miał przejechać agent przykładowo: krzywizna łuku drogi, rodzaj gruntu, parametry techniczne pojazdu, stan pogody. Zadaniem tej sieci było wygenerowanie odpowiednich danych wyjściowych bazując na parametrach wejściowych tak, aby samochód kierowany przez agenta mógł bez problemu przejechać trasę wyścigu.

Z siecią neuronową związane są również pewne problemy. Sieć neuronową do gry można dodać na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest dodanie wyuczonej sieci, która została w jakiś sposób przebadana i zwraca sensowe wyniki. Natomiast drugim sposobem jest dodanie niewyuczonej sieci neuronowej. Taka sieć będzie się uczyć dopiero podczas rozgrywki z graczem. Jest to o tyle niebezpieczne, że nie ma kontroli na wynikami zwracanymi przez tą sieć, przez co wyniki mogą być nieprzewidywalne.

**Algorytm stadny.**

W 1987 roku Craig Raynolds przedstawił artykuł, w którym opracował 3 zasady, które w połączeniu umożliwiały grupie agentów realistyczne zbiorowe zachowanie podobne do zachowań stadnych znanych ze świata zwierząt np. ławic ryb, stad ptaków. Raynolds określił te trzy zasady jako sterownie zachowaniem. Prezentują się one następująco:

* spójność - sterownie, którego celem jest zbieranie agentów znajdujących się blisko siebie w odpowiednie grupy lokalne,
* wyrównywanie - rodzaj sterowania dzięki któremu agent może dostosowywać kierunek i prędkość do innych agentów przebywających w pobliżu,
* rozdzielczość - sterownie, w które zapobiega tworzeniu się tłumu w jednym miejscu. Agenci zachowują pewną odległość względem siebie.

Reynolds opracował jeszcze czwartą zasadę, określaną mianem unikania. Jest ona stosowana, aby wirtualni agenci unikali przeszkody umieszczonej na mapie.

W każdym cyklu procesu przemieszczania się agenci każdorazowo sprawdzają środowisko, w jakim w danej chwili przebywają i to jest jedyna informacja jakiej wymaga ten algorytm. Powoduje to, że zmniejszenie wymagań związanych z pamięcią przy sterowaniu wieloma agentami oraz pozwala na szybką reakcję na ewentualną zmianę sytuacji. Podsumowując algorytm ten umożliwia nadanie grupie poruszających się agentów dynamiki ruchu jak jedno ciało oraz zdolności omijania przeszkód czy wrogich postaci.

**Dalszy rozwój sztucznej inteligencji w grach komputerowych**

Wraz z upływem czasu rola sztucznej inteligencji w grach zwiększyła się o analizowanie gry i jej dostosowanie do poziomu gracza. Powoduje ona rozwój świata wraz ze wzrostem doświadczenia gracza, które uzyskał w dotychczasowym procesie rozgrywki.

Istnieją pewne grupy badawcze, zajmujące się projektami gier, w których cały świat ma być kontrolowany przez Sztuczną Inteligencję. Gracze wchodzący do gry mają czuć się, tak jakby wchodzili do realnej rzeczywistości, gdzie każde ich działanie ma wpływ na dalszy przebieg gry.

Analizując obecny stan Sztucznej Inteligencji, w którym twórcy rozwijają każdy element świata, tak aby wydawał się jak najbardziej realny, można pokusić się o stwierdzenie, że w przyszłości Sztuczna Inteligencja będzie odpowiedzialna za odwzorowanie zachowań gracza jako człowieka w świecie gry. Dzięki temu gracz będzie musiał bardziej zaangażować się w grę.

# Znajdowanie ścieżki

Postacie w grach komputerowych muszą się poruszać w wirtualnym świecie. Czasami zdarza się, że ten ruch jest na stałe ustawiony przez programistę. Przykładowo strażnik patrolujący drogę, porusza się ślepo po ogrodzonym terenie. Stałe trasy są łatwe do implementacji i wdrożenia. Niestety bardzo łatwo można spowodować, że obiekt zostanie przesunięty przez inny obiekt (wejdzie z nim w kolizje), co spowoduje, że wypadnie z trasy. Pozwolenie postaci na pewną dowolność w przemieszczaniu może spowodować, że jej wędrówki będą bezcelowe, co więcej postać będzie mogła łatwo utknąć. Bardziej zaawansowane postacie nie wiedzą z góry, gdzie będą musiały się przemieścić. Jednostka wykorzystywana w strategii czasu rzeczywistego może zostać przypisana do dowolnego punktu na mapie przez gracza w dowolnym momencie czasu, patrolujący strażnik może potrzebować przemieścić się do najbliższego punktu alarmowego, żeby wezwać wsparcie, a w grach platformowych może być wymagane, żeby przeciwnicy gonili gracza do przepaści używając dostępnych obszarów terenu.

Dla każdej z tych postaci musi zostać obliczona odpowiednia droga, żeby dostać się tam gdzie jest jej cel. Konieczne jest utworzenie sensownej trasy w jak najkrótszym czasie.

To właśnie jest istotą odnajdywania ścieżki (ang. *pathfinding*), czasami nazywane także planowaniem ścieżki - znajduję się każdym w silniku gry posiadającym moduł odpowiedzialny za sztuczną inteligencję. W przedstawionym poniżej modelu (Rysunek 1) rola odnajdywania ścieżki znajduje się pomiędzy modułami odpowiedzialnymi za podejmowanie decyzji oraz poruszanie się postaci. Często odnajdywanie ścieżki jest po prostu używane do wykonania wstępnej analizy gdzie postać ma się przesunąć, aby dotrzeć do celu. Sam cel jest wyznaczany przez inną część modułu sztucznej inteligencji, więc można podsumować, że odnajdywanie ścieżki oblicza nam tylko jak dostać się do celu. Do uzyskania pożądanego efektu trzeba zbudować system przemieszczania w taki sposób, aby był wywoływany, kiedy jest potrzeba zaplanowania drogi. Zostanie on omówiony w kolejnych rozdziałach.

Moduł odnajdywania ścieżki może, również zostać umieszczony na siedzeniu kierowcy i zarządzać podejmowaniem decyzji, gdzie się trzeba przemieścić, a także w jaki sposób się dostać do celu. Jest to pewnego rodzaju odmiana modułu odnajdywania ścieżki zwana odnajdywaniem ścieżki otwartego celu (ang. *open goal pathfinding*), może być użyta do pracy zarówna nad ścieżką jaki i miejscem przeznaczenia.



Rysunek Model sztucznej inteligencji

Większość gier używa funkcjonalności znajdowania ścieżki wykorzystując algorytm A\*(ang. *A star*). Pomimo, że algorytm jest efektywny i łatwy do wdrożenia, to nie może on pracować bezpośrednio na danych zaczerpniętych z środowiska gry. Wymaga on, aby środowisko gry było reprezentowane przez odpowiednią strukturę danych - jest to zwykle graf ważony o nieujemnych wagach. Ten rozdział wprowadza pojęcie struktury danych grafu. Następnie zostanie omówiony algorytm Dijkstry, pomimo że jest on częściej stosowany w procesie podejmowania decyzji taktycznych niż w procesie odnajdowania ścieżki. Ponieważ struktura danych grafu nie jest jedynym sposobem w jaki większość gier reprezentuje swoje dane, dlatego warto przyjrzeć się kwestii zmiany geometrii środowiska gry na dane, które mogą zostać przetworzone przez moduł odpowiedzialny za znajdowanie ścieżki. Warto też wspomnieć o wielu dziesiątkach przydatnych wariacji podstawowego algorytmu A\*.

W pracy będzie używane pojęcie efektywności, rozumianego jako efektywność czasowa algorytmu.

## Graf odnajdowania ścieżki

Algorytm A\* oraz algorytm Dijkstry nie może pracować bezpośrednio na geometrii, z której zbudowane jest środowisko gry. Jednak każda mapa może zostać przekształcona do uproszczonej wersji w postaci grafu. Jeśli proces upraszczania geometrii do grafu wykona się prawidłowo, to plan ścieżki zwrócony przez moduł odpowiedzialny za odnajdowanie ścieżki może zostać użyty oraz przetłumaczony ponownie na warunki gry. Z drugiej strony sam proces upraszczania może pozbawić pewnych informacji, które mogą się okazać znaczące. Złe uproszczenie może oznaczać, że ostateczna trasa nie jest za dobra.

Algorytmy stosowane do odnajdywania ścieżki, używają zwykle skierowanych grafów o nieujemnych wagach.

## Definicja grafu

Graf jest matematyczną strukturą często reprezentowaną przy pomocy schematu graficznego. Graf składa się z dwóch rodzajów elementów. Są to węzły często rysowane jako punkty lub koła w schemacie grafu oraz krawędzie będące połączeniami węzłów przedstawiane w postaci odcinków (Rysunek 2).

Formalnie graf składa się ze zbioru węzłów i zestawu połączeń, w którym połączenie jest po prostu nieuporządkowaną parą węzłów.

Każdy węzeł stanowi zwykle pewien region środowiska gry, taki jak pokój, piwnica czy schody lub obszar miejsca na zewnątrz. Połączenia pokazują, które miejsca są połączone. Jeśli pokój sąsiaduje ze schodami, to węzeł reprezentujący pokój będzie miał połączenie z węzłem reprezentującym schody. W ten sposób całe środowisko gry jest podzielone na obszary, które są ze sobą połączone. Aby dostać się z jednego miejsca w danym środowisku gry do drugiego możemy korzystać z połączeń. Jeśli jest możliwość przejścia bezpośrednio z węzła startowego do celu, to problem jest trywialny. W przeciwnym razie możemy użyć połączeń do podróży przez węzły pośrednie znajdujące się na ścieżce. Zatem droga przez graf składa się z zera lub więcej połączeń.

## Grafy ważone

Ważony graf składa się z węzłów i połączeń podobnie jest zwykły graf. Dodatkowo posiada wartość liczbową dla każdego połączenia węzłów. W matematycznej teorii grafów

wartość ta jest nazywana wagą, natomiast w grach jest ona określana mianem kosztu



Rysunek Schemat grafu

(chociaż graf nadal jest nazywany grafem ważonym, a nie grafem kosztu). Na Rysunek 3 przedstawiono graf, w którym z każdym połączeniem jest związana wartość kosztu.

Koszty w module zarządzającym odnajdowaniem ścieżki są zwykle czasem lub odległością. Jeśli węzeł reprezentujący obszar środowiska gry jest położony w dużej odległości od innego takiego węzła, to koszt takiego połączenia będzie duży. Podobnie będzie wyglądało to w przypadku przemieszczania się pomiędzy dwoma pokojami, które są pokryte pułapkami - taka podróż będzie trwała długo przez co koszt będzie duży. Koszty w grafie mogą reprezentować więcej niż tylko czas i odległość. Istnieje duża liczba aplikacji z odnajdywaniem ścieżki, w których koszt stanowi kombinacje czasu, odległości i innych współczynników.

Na całej trasie przez graf, od węzła początkowego do węzła docelowego, możemy obliczyć całkowity koszt ścieżki. Jest to suma kosztów każdego połączenia na trasie.

**Reprezentacja punktów w regionie**

Można od razu zauważyć, że jeśli dwa regiony są ze sobą połączone (np. pokój i schody), to odległość pomiędzy nimi będzie wynosić zero. Jeśli gracz stoi w drzwiach,

a następnie przemieszcza się do schodów natychmiastowo. Nasuwa się więc pytanie czy zatem wszystkie połączenie mają koszt równy zero? Istnieje tendencja ze względu



Rysunek Graf posiadający koszty

na odległości czy czas przez punkt reprezentatywny znajdujący się w każdym regionie. Zatem dla przykładu punkt reprezentatywny dla pokoju będzie się w jego środku, a dla schodów w ich centrum. Jeśli pokój jest duży a schody są długie to jest całkiem prawdopodobne że odległość między punktami reprezentatywnymi będzie duża, a co za tym idzie koszt również będzie duży. Rysunek 4 prezentuje wirtualny świat i odpowiadający mu graf, gdzie punkt reprezentatywny jest przyporządkowany do każdego regionu.

**Ograniczenia odnośnie wag w grafie.**

Posiadanie przez krawędź ujemnego kosztu, może wydawać się całkowicie nieuzasadnione. Nie można mieć ujemnego dystansu między węzłami oraz nie można mieć ujemnego czasu, aby dostać się do danego miejsca. Mimo to matematyczna teoria grafów dopuszcza ujemne wagi i mają one bezpośrednie zastosowanie, w niektórych praktycznych problemach. Jednak problemy te znajdują się całkowicie poza zasięgiem świata gier komputerowych i nie będę omawiane na łamach tej pracy. Pisanie algorytmów, które



Rysunek Węzły grafu określające regiony [żródło]

mogą pracować z ujemnymi wagami jest zazwyczaj bardziej złożone, niż dla tych, które mają sztywne wymogi stosowania nieujemnych wag. W szczególności algorytmy Dijkstry

i algorytmy A\* powinny być stosowane wyłącznie z nieujemnymi wagami. Istnieją takie konstrukcje grafu posiadającego ujemne wagi, że algorytm zajmujący się procesem odnajdywania ścieżki zwróci rozsądny wynik. Jednak w większości przypadków, algorytm Dijkstry i A\* wejdzie w pętlę nieskończoną. I nie jest to błąd algorytmów. Z punktu widzenia matematycznego nie ma czegoś takiego jak najkrótsza ścieżka przez wiele grafów w ujemnymi wagami - takie rozwiązanie nie istnieje. W pracy koszt jest zawsze liczbą dodatnią. Twórcy gier wspólnie przyznają, że nigdy nie stosowali ujemnych wag ani algorytmów do nich przystosowanych w procesie tworzenia gier komputerowych.[źródło]

## Skierowane grafy ważone

W wielu sytuacjach ważony graf wystarczy do reprezentacji środowiska gry i często zdarzają się implementacje grafu w takiej formie. Można jednak pójść o krok dalej. Główne algorytmy służące do odnajdywania ścieżki obsługują bardziej złożone formy grafów, takie jak graf skierowany (Rysunek 5). Jest on często używany przez programistów gier komputerowych. Jeśli możliwe jest, aby poruszać się pomiędzy węzłem A i węzłem B (przykładowo pokój i schody), to możliwe jest też, aby przejść z węzła B do węzła A. Połączenia są dostępne w obie strony, a koszt przejścia jest taki sam w obu kierunkach. Skierowany graf zakłada, że połączenia są dostępne tylko w jednym kierunku. Jeśli postać gracza może dotrzeć z węzła A do węzła B i odwrotnie to będzie to reprezentowane na grafie jako dwa połączenia: jedno z A do B i drugie z B do A. Jest to przydatne w wielu sytuacjach. Po pierwsze, nie jest zawsze tak, że możliwość przejścia z punktu A do B oznacza że w drugą stronę jest to osiągalne. Jeśli węzeł oznacza podłogę na piętrze, a B reprezentują podłogę magazynu znajdującego się pod pokojem, to postać może łatwo spaść z A do B, ale nie będzie w stanie wrócić ponownie.



Rysunek Skierowany graf ważony

Po drugie dwa połączenia w różnych kierunkach oznaczają, że mogą istnieć dwa różne koszty. Za przykład można ponownie podać pokój na piętrze oraz magazyn znajdujący się pod nim, z tym, że do naszego świata dodajemy drabinę. Zastanawiając się o kosztach w kategoriach czasu skok z pokoju do magazynu nie zajmuje w ogóle czasu, ale może upłynąć kilka sekund zanim postać gracza zdąży się wspiąć z powrotem na górę po drabinie. Ponieważ koszty są związane z każdym połączeniem mogą być reprezentowane: połączenie A(piętro) z B(magazyn) ma mały koszt, a połączenie z B do A ma większy koszt. Matematycznie w grafie skierowanym pary węzłów, stanowiące połączenie są uporządkowane. Podczas gdy połączenie [węzeł A, węzeł B, koszt] w nieskierowanym grafie jest identyczne do połączenia [węzeł B, węzeł A, koszt] (tak długo jak koszty są identyczne ) w grafie skierowanych są one innymi połączeniami.

## Algorytm Dijkstry

Algorytm Dijkstry został zaprojektowany przez holenderskiego matematyka Edsger'a Dijkstrte do odnajdywania najkrótszych ścieżek do wszystkich węzłów od punktu startowego w grafie. Rozwiązanie tego problemu zawiera w sobie rozwiązanie problemu odnajdywania ścieżki w grach komputerowych z punktu początkowego do punkty końcowego, ale jest ono osiągane nieefektywnie.

Z tego w praktyce nie korzysta się z algorytmu Dijkstry do odnajdywania ścieżki z punktu A do B. Można go zastosować do analizy właściwości ogólnych danej mapy w zaawansowanym systemie odnajdywania ścieżki[źródło].

### Przedstawienie problemu

Dany jest graf (skierowany o nieujemnych wagach) i dwa węzły (początkowy i końcowy) w tym grafie. Zadaniem algorytmu Dijkstry jest wygenerowanie ścieżki tak, aby całkowity koszt ścieżki był minimalny spośród wszystkich dostępnych ścieżek od startu do celu. Może dojść do sytuacji że będzie istnieć wiele ścieżek o takim samym minimalnym koszcie.



Rysunek Przykład grafu, gdzie każda ścieżka jest optymalna

Rysunek 6 zawiera 10 możliwych ścieżek, wszystkie z tym samym kosztem minimalnym. Gdy istnieje więcej niże jedna optymalna ścieżka, oczekuje się, że tylko jedna z nich zostanie zwrócona, bez znaczenia która. Warto wspomnieć, że oczekiwany rezultat powinien składać się z pewnego zbioru połączeń, a nie węzłów. Dwa węzły mogą być połączone przez więcej niż jedno połączenie i każde połączenie może mieć inny koszt (przykładowo koszt zeskoku z piętra do magazynu lub koszt zejścia po drabinie do magazynu). Dlatego trzeba dokładnie wiedzieć które połączenia są potrzebne, a lista węzłów byłaby niekompletna. Wiele gier nie robi tego rozróżnienia, zakładając że istnieje najwyżej jedno połączenie pomiędzy dowolną parą węzłów. Pomimo to, jeśli są dwa połączenia pomiędzy parą węzłów, to moduł odpowiedzialny za odnajdywanie ścieżki powinien zawsze wybrać to połączenie z najniższym kosztem. W niektórych zastosowaniach, koszt zmienia się w trakcie gry lub pomiędzy różnymi postaciami. Na potrzeby tej pracy ścieżkę identyfikujemy jako listę połączeń.

### Opis algorytmu

Algorytm Dijkstry podczas każdej iteracji, rozważa każde z połączeń wychodzących z bieżącego węzła. Dla każdego połączenia znajduje węzeł końcowy i zapisuje całkowity koszt ścieżki znaleziony do tej pory wraz z połączeniami.

W pierwszej iteracji, gdzie węzeł startowy jest bieżącym węzłem, kosztem dotychczasowym dla każdego połączenia w węźle końcowym jest koszt bieżącego połączenia. Rysunek 7 pokazuje przykładową analizę dokonaną w pierwszej iteracji.

Dla kolejnych iteracji dotychczasowy koszt węzła końcowego każdego analizowanego połączenia bieżącego węzła jest sumą kosztów połączeń i kosztów dotychczasowych bieżącego węzła. Rysunek 8 przedstawia kolejną iterację grafu z rysunku 7. Węzłem bieżącym jest węzeł B, którego koszt dotychczasowy był najmniejszy. Koszt dotychczasowy w węźle E jest sumą kosztu dotychczasowego z węzła B i kosztem połączenia IV z B do E.



Rysunek Dijkstra - pierwsza iteracja



Rysunek Dijkstra - kolejna iteracja

**Lista węzłów**

Algorytm korzysta z dwóch list zwanych: listą otwartą i listą zamkniętą. W otwartej liście rejestruje się wszystkie znalezione przez algorytm węzły, które nie miały jeszcze swojej własnej iteracji. Węzły przetworzone są zapisywane w liście zamkniętej. Na początku lista otwarta zawiera tylko węzeł początkowy (z zerowym dotychczasowym kosztem), a lista zamknięta jest pusta. Każdy węzeł może należeć do jednej z trzech kategorii: może on należeć do zamkniętej listy, może być też na liście otwartej - będąc odwiedzonym przez inny węzeł, ale jeszcze nie przetworzony w swojej iteracji, może również nie znajdować się na żadnej z wymienionych wyżej list. Czasami mówi się, że węzeł jest zamknięty, otwarty lub nieodwiedzony. W każdej iteracji, algorytm wybiera węzeł z listy otwartej, który ma najmniejszy dotychczasowy koszt. Następnie zostaje on przetworzony. Przetworzony węzeł jest usuwany z otwartej listy i dodawany do listy zamkniętej. Jest jeszcze jedna komplikacja. Kiedy algorytm podąża za połączeniem od bieżącego węzła, zakłada się, że ostatecznie znajdzie się w węźle nieodwiedzonym. Może się zdarzyć taka sytuacja, że zamiast tego algorytm kończy w węźle, który jest otwarty lub zamknięty, aby rozwiązać taki przypadek trzeba postąpić nieco inaczej.

**Obliczanie dotychczasowych kosztów dla węzłów otwartych i zamkniętych**

W przypadku, gdy algorytm dochodzi do otwartego lub zamkniętego węzła podczas iteracji, to rozpatrywany węzeł będzie już posiadał dotychczasowych koszt i zapis połączenia, które doprowadziło do niego. Teraz wystarczy wstawić wartość która nadpisze wynik poprzedniej iteracji algorytmu. Zamiast tego, można sprawdzić czy trasa, która obecnie jest rozważana jest lepsza od poprzednio znalezionej. Jeśli wartość kosztu jest większa niż ta aktualnie zarejestrowana, to nie aktualizujemy węzła. Jeśli nowy koszt jest mniejszy, to wtedy dokonywana jest jego aktualizacja.

Rysunek 9 przedstawia aktualizacje otwartego węzła w grafie. Nowa ścieżka przez węzeł C jest szybsza i zapis dla węzła D jest odpowiednio zaktualizowany.



Rysunek Aktualizacja otwartego węzła[źródło]

**Przerywanie algorytmu**

Algorytmu przerywa działanie, kiedy otwarta lista jest pusta. Oznacza to, że każdy węzeł został rozważony oraz wszystkie węzły znajdują się na liście zamkniętej.

W przypadku odnajdywania ścieżki obiektem zainteresowania jest tylko węzeł docelowy, więc można przerwać algorytm wcześniej. Dokonuje się przerwania w momencie, kiedy węzeł docelowy jest najmniejszym węzłem na liście otwartej.

Na rysunku 9 węzeł D jest węzłem docelowym i zostaje odnaleziony podczas przetwarzania węzła B. W tym momencie algorytm zostaje przerwany i zwracana jest ścieżka A-B-D, która nie jest najkrótszą ścieżką. Aby mieć pewność, że znaleziona ścieżka jest najkrótszą, algorytm musi działać dalej, dopóki cel nie będzie miał najmniejszego dotychczasowego kosztu. W tym i tylko w tym punkcie obliczeń, każdy inny punkt (znajdujący się na liście otwartej lub nieprzetworzony) będzie posiadał dłuższą drogę.

W praktyce ta zasada jest często łamana. Algorytm jest modyfikowany tak, że jeśli zostaje znaleziona ścieżka do celu to zakłada się, że ona jest najkrótsza, nawet jeśli istnieje inna, krótsza - zwykle jest ona krótsza o niewielką wartość liczbową.

**Odtwarzanie ścieżki**

Ostatnim krokiem algorytmu jest odtworzenie ścieżki. Dokonuje się tego zaczynając od punktu końcowego i podąża się połączeniami, które doprowadziły ścieżkę do tego miejsca. Można powiedzieć, że dokonuje się powrotu i szukanym punktem jest punkt początkowy. Kontynuuje się proces zapamiętując połączenie dopóki punkt startowy nie znajdzie się na powrotnej ścieżce. Ostatnim krokiem jest odwrócenie kolejności połączeń ścieżki i można zwrócić gotowe rozwiązanie.

Rysunek 10 przedstawia prosty graf zaraz po tym jak algorytm zakończył działanie. Znaleziona lista połączeń zawiera węzły od celu do początku - jej odwrócenie pozwoli uzyskać poszukiwaną drogę.



Rysunek Graf po zakończeniu obliczeń [źródło]

## Algorytm A\*

Odnajdywanie ścieżki w grach odbywa się najczęściej za pomocą algorytmu A\*. A\* jest prosty w implementacji, bardzo efektywny oraz posiada bardzo duże możliwości optymalizacji. Może również zostać wykorzystany do planowania złożonych akcji dla postaci.

W odróżnieniu od algorytmu Dijkstry, A\* został zaprojektowany dla odnajdywania ścieżki z punktu do punktu i nie jest stosowany do rozwiązywania problemu najkrótszej ścieżki w teorii grafów.

### Przedstawienie problemu

Problem jest identyczny do tego przedstawionego w algorytmie Dijkstry. Dany jest graf (skierowany o nieujemnych wagach) i dwa węzły w tym grafie (startowy i docelowy). Zadaniem algorytmu jest wygenerowanie takiej ścieżki, że całkowity jej koszt jest minimalny spośród wszystkich dostępnych ścieżek od startu do celu.

### Opis algorytmu

Algorytm działa na takiej samej zasadzie jak algorytm Dijkstry. Występuje tam otwarta lista z najniższymi dotychczasowymi kosztami oraz lista zamknięta. Algorytm A\* działa iteracyjnie. W każdej iteracji jest przetwarzany jeden węzeł grafu nazywany bieżącym.

Podczas iteracji A\* rozważa każde wychodzące połączenie z bieżącego węzła. Dla każdego połączenia znajduje węzeł końcowy i przypisuje całkowity koszt ścieżki tymczasowej i połączenia, z którego przyszedł - tak jak miało to miejsce w poprzednim algorytmie .

Dodatkowo algorytm przypisuje jeszcze jedną wartość: estymacje całkowitego kosztu dla ścieżki od węzła startowego przez obecny węzeł do celu (ta wartość zostanie teraz nazwana: estymowany koszt całkowity). Ta estymacja jest sumą dwóch wartości: kosztu dotychczasowego i wartości określającej jak daleko węzeł znajduje się od celu.

Estymacja jest powszechnie nazywana "wartością heurystyki" węzła i nie może być to wartość ujemna. Proces generowania wartości heurystyki jest punktem kluczowym w procesie implementacji algorytmu A\* - zostanie on omówiony później.

Rysunek 11prezentuje obliczone wartości dla paru węzłów w grafie. Węzły są opisane, również wartościami heurystyki. Przestawione są dwie wartości (dotychczasowy koszt, estymowany koszt całkowity), które informują, że dane węzły zostały przetworzone przez algorytm.

**Lista węzłów**

Jak w poprzednim przypadku algorytm trzyma w liście otwartej węzły, które zostały odwiedzone, ale nie przetworzone, a w liście zamkniętej te które zostały już przetworzone. Węzły są przenoszone do listy otwartej jeśli były węzłami końcowymi na liście dotychczasowo rozważanych połączeń. W przypadku listy zamkniętej - umieszczane



Rysunek A\* - działanie

są tam węzły, które zostały przetworzone w swojej iteracji. Węzeł z najmniejszym estymowanym kosztem całkowitym jest wybierany do każdej iteracji.

Powoduje, to że algorytm będzie przeszukiwał bardziej obiecujące węzły. Jeśli węzeł ma małą wartość estymowanego kosztu całkowitego, to musi on mieć też relatywnie niski koszt dotychczasowy i relatywnie małą estymacje dystansu do przebycia do celu. Jeśli estymacje są dokładne to węzły, które są bliższe celu są brane pod uwagę najpierw, nakierowując poszukiwania na najbardziej korzystny obszar.

**Obliczanie kosztu dotychczasowego dla otwartej i zamkniętej listy**

Jak wspomniano poprzednio podczas przebiegu procesu algorytmu może on dotrzeć do węzła oznaczonego jako zamknięty lub otwarty i trzeba dokonać aktualizacji zapisanych wartości.

Algorytm analogicznie oblicza wartość kosztu dotychczasowego i jeśli nowa wartość jest mniejsza od tej istniejącej w węźle, to dokonywana jest aktualizacja węzła. Warto zwrócić uwagę na fakt, że dokonywane jest porównanie wartości kosztu dotychczasowego, a nie estymowanego kosztu całkowitego.

Algorytm A\* może znaleźć lepsze drogi do węzłów, które już znajdują się na liście zamkniętej. Jeśli poprzednia estymacja była bardzo optymistyczna, to węzeł może zostać przetworzony z przekonaniem, że był to najlepszy wybór, jednak faktycznie nie był.

To powoduje pewien problem występujący również w algorytmie Dijkstry. Jeśli niepewny węzeł zostanie przetworzony i umieszczony na liście zamkniętej, to znaczy że wszystkie jego połączenia zostały sprawdzone. Może się zdarzyć, że zbiór wszystkich węzłów ma koszt dotychczasowy obliczony na podstawie kosztu jednego z niepewnych węzłów. W takim przypadku aktualizacja tylko tego węzła nie wystarczy. Należy dokonać aktualizacji wszystkich połączeń, przez propagacje nowej wartości. W przypadku węzła na liście otwartej nie jest to konieczne - jak wiadomo połączenia węzłów na liście otwartej nie zostały jeszcze przetworzone. Istnieje metoda, która pozwoli na ponownie przeliczenie i propagacje nowej wartości. Można to osiągnąć poprzez usunięcie węzła z listy zamkniętej i umieszczenie go na liście otwartej. Algorytm będzie dalej kontynuował swój proces przetwarzając usunięty węzeł, umieszczając go ponownie na liście zamkniętej. Każdy węzeł, którego wartość kosztu jest związana z ponownie rozpatrywanym węzłem, zostanie przetworzony jeszcze raz.

Rysunek 12przestawia aktualizacje grafu - jest to analogiczna sytuacja do grafu z rysunku 11, lecz dwie iteracje później. Przedstawia on sytuacje, w której aktualizowany jest zamknięty węzeł. Nowa trasa do węzła E przez węzeł C jest szybsza, więc dane węzła E odpowiednio aktualizowane i zostaje on umieszczony na otwartej liście. W następnej iteracji wartość węzła G zostaje zmieniona. Tak, więc węzły znajdujące się na zamkniętej liście mają zmienioną wartość kosztu i zostają z niej usunięte oraz przeniesione do listy otwartej. Otwarte węzły, które mają zmienione wartość zostają na otwartej liście.

**Przerywanie algorytmu**

W wielu implementacjach A\* przerywa swoje działanie, kiedy węzeł docelowy jest najmniejszym węzłem na liście otwartej.

Często jednak zdarza się, że węzeł posiadający najmniejszy estymowany koszt całkowity może zostać zaktualizowany. Nie da się zagwarantować, że węzeł, który jest pierwszym na otwartej liście jest tym, który posiada najkrótszą ścieżkę do tego miejsca. Dlatego przerwanie algorytmu w tym momencie nie daje gwarancji, że została znaleziona najkrótsza ścieżka.

Jest to oczywiste, że proces algorytmu mógłby trwać troszkę dłużej, żeby wygenerować optymalny wynik. Można to osiągnąć dzięki przerwaniu wykonania algorytmu w momencie, w którym węzeł na otwartej liście z najmniejszym dotychczasowym kosztem ma ten koszt większy niż koszt znalezionej ścieżki do celu. Wtedy i tylko wtedy jest zagwarantowane, że żadna przyszła ścieżka nie będzie krótsza.

Z racji tego, że proces A\* często jest bliski znalezieniu optymalnego wyniku, duża liczba implementacji przerywa algorytm, kiedy cel jest pierwszym odwiedzonym węzłem bez czekania, żeby był pierwszy na otwartej liście. Wzrost wydajności, jednak nie jest tak duży jak w przypadku zrobienia identycznej rzeczy w algorytmie Dijkstry.

**Odtwarzanie ścieżki**

Proces odtwarzania ścieżki zaczyna się od miejsca docelowego i gromadzi połączenia cofając się do punktu startowego. Połączenia muszą zostać odwrócone, żeby utworzyć poprawną ścieżkę.



Rysunek Aktualizacja zamkniętego węzła

## Algorytm JPS

Podczas każdej iteracji algorytm A\* rozszerza obszar poszukiwań w najlepszym

znanym kierunku. Jednak istnieją sytuacje, które mogą prowadzić do spadku jego efektywności. Spadek ten może pojawić się w przypadku przetwarzania dużych przestrzeni. Algorytm JPS(ang. jump point search) pozwala na przyśpieszenie obliczeń szukanej ścieżki.

Algorytm JPS można opisać w postaci dwóch prostych zasad obcinania, które są stosowane w rekursywnym przeszukiwaniu grafu. Pierwsza zasada dotyczy wertykalnego i horyzontalnego poruszania się, natomiast druga diagonalnego. Kluczowe w obydwóch przypadkach jest obcinanie zbioru bezpośrednich sąsiadów wokół bieżącego węzła, próbując udowodnić, że optymalna ścieżka (symetrycznie lub nie) istnieje od rodzica bieżącego węzła do każdego sąsiada.

W przypadku algorytmu A\* dokonywana jest operacja rozszerzania ścieżki w najprostszy z możliwych sposobów: poprzez dodanie węzła bezpośredniego sąsiada, bez badania następnego. Warto zastanowić się czy nie można pójść o krok dalej i pominąć niektóre węzły, które można intuicyjnie uznać za mało wartościowe. Można tego dokonać określając sytuacje, w której są obecne symetryczne ścieżki i pomijać niektóre węzły. Dwie ścieżki są symetryczne, jeżeli mają ten sam punkt początkowy i końcowy oraz zmiana kolejności składowych wektora punktów ścieżki pozwala przekształcić jedną ścieżkę w drugą. Rysunek 13 przedstawia podstawową idee algorytmu JPS.



Rysunek Idea algorytmu JPS

Węzeł *x* jest węzłem aktualnie przetwarzanym. Strzałka wskazuje kierunek podróży od jego rodzica, horyzontalnie lub diagonalnie. W obu przypadkach można od razu wykluczyć wszystkie szare węzły sąsiadów, ponieważ mogą zostać one osiągnięte bezpośrednio z rodzica węzła *x* bez potrzeby przechodzenia z węzła *x*.

Pojęcie naturalnego sąsiada bieżącego węzła będzie odnosić się do zbioru węzłów pozostałych po procesie obcinania. Są one oznaczone kolorem białym na rysunku 15. W idealnym przypadku rozważany jest zbiór naturalny sąsiadów podczas procesu rozszerzania. Jednak w niektórych przypadkach , obecność przeszkód może oznaczać, że trzeba również rozważyć mały zbiór k-dodatkowych węzłów (*0≤ k ≤ 2*). Zbiór jest zwykle nazywany zbiorem wymuszonych sąsiadów bieżącego węzła. Rysunek 16 przedstawia taki przypadek.

Węzeł *x* na rysunku 14 jest węzłem aktualnie przetwarzanym, strzałka wskazuje kierunek trasy od rodzica, horyzontalnie i diagonalnie. Należy zauważyć, że gdy węzeł *x* jest obok przeszkody to wyróżnieni sąsiedzi nie mogą zostać usunięci. Każda alternatywna droga z rodzica węzła *x* do każdego z tych węzłów jest zablokowana.



Rysunek Przykład wymuszonych sąsiadów

Wyżej opisane zasady obcinania węzłów stosuje się w następujący sposób: zamiast generować naturalnych i wymuszonych sąsiadów, wykonuje się rekursywne obcinanie zbioru sąsiadów wokół każdego węzła. Celem tej operacji jest wyeliminowanie symetrii przez rekursywne przeskoki pomiędzy węzłami, do których można dotrzeć ścieżką nie przechodzącą przez bieżący węzeł. Rekursja jest przerywana w momencie, kiedy algorytm natrafi na przeszkodę lub następcę punktu skoku. Punkty skoku są o tyle interesujące, ponieważ posiadają one sąsiadów, do których nie można dotrzeć żadną inną alternatywną symetryczną ścieżką. Podsumowując optymalna ścieżka musi przechodzić przez bieżący węzeł.

Rekursywny algorytm obcinania sąsiadów musi zapewniać optymalność. Jest ona zagwarantowana przez uporządkowany proces, w jakim przetwarzani są naturalni sąsiedzi (najpierw horyzontalnie/wertykalnie, a następnie diagonalnie). Rysunek 17 i 18 przedstawia dwa przykłady algorytmu obcinania w akcji. W pierwszym przypadku możemy określić punkt skoku przez rekursje horyzontalną, a w drugim punkt jest określany przez rekursje diagonalną.

Rysunki 15 i 16 przedstawiają przykładowe skoki. Węzeł x jest aktualnie przetwarzanym węzłem *p(x)* jest jego rodzicem.

Na rysunku 15 została przedstawiona prosta reguła przycinania i identyfikacji węzła y jako następcy skoku *x*. Węzeł ten jest rozważany, ponieważ ma sąsiada *z*, do którego optymalna ścieżka zgodnie z założeniami musi prowadzić przez punkty *x* i potem *y*.



Rysunek Skok diagonalny Rysunek Horyzontalny skok

Zastosowanie rekursji z wariantem przekątnej reguły obcinania (rysunek 16), powoduje wyznaczenie węzła y jak sukcesora *x*. Warto zwrócić uwagę, że przed każdym krokiem rozszerzania przekątnej najpierw odbywa się rekursja horyzontalna i wertykalna (linie przerywane). Tylko wtedy, gdy obie rekursje (wertykalna i horyzontalna) nie zwrócą punktu skoku wykonuje się ponownie krok diagonalny. Węzeł *w* w tym przypadku jest wymuszonym sąsiadem węzła *x*.

# System nawigacji

## Analiza zagadnienia

Skład problemów, z którymi przychodzi się zmierzyć podczas prac nad grą komputerową, zależy od pewnych ustaleń i wymagań jakie gra ma spełniać. W przypadku dodania do gry systemu nawigacyjnego warto dokonać analizy pewnych zagadnień.

Pierwszym z nich jest charakterystyka środowiska gry. Musi ono mieć odpowiednią reprezentacje, aby mogło zostać odpowiednio przetworzone. Środowiska gry mogą różnić się rozmiarem oraz stopniem skomplikowania. Środowiska o niewielkim stopniu skomplikowania, posiadają małą liczbę możliwych do przejścia ścieżek. Natomiast te o dużym stopniu skomplikowania mają strukturę podobną do labiryntu.

Kolejnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniego algorytmu. W grach komputerowych popularnym algorytmem jest algorytm A\*. I jest on stosowany w większości gier komputerowych. Jest to algorytm heurystyczny, z którym związane są pewne funkcje heurystyczne opisane w rozdziale x.x. Funkcje te mogą wpływać na czas w jakim zostanie odnaleziona ścieżka, zależnie od rozmiaru środowiska gry oraz stopnia jego skomplikowania. Zatem warto zastanowić się, w którym przypadku zastosować daną funkcję heurystyczną, aby droga została obliczona w jak najkrótszym czasie.

Obecnie producenci gier dostarczają środowiska gier o bardzo dużych rozmiarach, po których porusza się duża liczba agentów komputerowych. Przetwarzając tak dużą liczbę danych warto zastanowić się nad kwestiami optymalizacyjnymi. Jednym z rozwiązań powalających przyśpieszyć proces odnajdowania ścieżki jest implementacja algorytmu Jump Point Search.

## Założenia

Projekt dyplomowy jest trójwymiarowym środowiskiem służącym do badania wydajności algorytmu A\*. W skład tego środowiska wchodzą: trójwymiarowy model terenu oraz model agenta komputerowego. Na potrzeby badań zostaną wykonanie cztery modele terenu różniące się stopniem skomplikowania. W każdym ze środowisk gry zostaną umieszczeni agenci, których celem jest dotarcie do wskazanego przez użytkownika celu.

Do procesu odnajdywania ścieżki zostanie użyta gotowa biblioteka *A\* pathfinding project*. Dodatkowo zostanie zaimplementowany oddzielny system nawigacyjny zawierający algorytm Jump Point Search.

Proces uruchomienia testu będzie wymagał odpowiedniej konfiguracji biblioteki, umieszczenia agentów w środowisku gry oraz wskazania punktu docelowego.

Projekt dyplomowy zostanie wykonany w silniku Unity3D. Projekt ten będzie umożliwiał przeprowadzenie symulacji odnajdywania ścieżki na czterech zaprojektowanych środowiskach gry. Do implementacji zostanie zastosowany język C#. Trójwymiarowy model środowiska zostanie wykonany w programie Blender.

## Narzędzia

### Blender

Blender jest darmowym środowiskiem do tworzenia grafiki trójwymiarowej. Oprócz standardowej funkcjonalności (tworzenie statycznych modeli 3D, animacji) posiada też wbudowany silnik gier. Pozwala także modelować mapy świata gry (rysunek 13)

Rysunek Proces tworzenia mapy w programie Blender

### Unity3D

Unity3D (rysunek 18) jest silnikiem przeznaczonym do tworzenia gier komputerowych. Jest to w pełni zintegrowany potężny silnik renderujący. Posiada on komplet narzędzi wspomagających tworzenie interaktywnych treści 3D. Każdą zaprojektowaną aplikację można uruchomić w prosty sposób na większości z dostępnych platform (Windows, Linux, Mac, Android, Windows Phone, iPhone, XBOX360, Playstation 3), zaznaczając na którą z nich ma zostać zbudowana aplikacja. Unity3D jest dostępny w dwóch wersjach: darmowej: Basic oraz płatnej Pro.



Rysunek Zrzut ekranu prezentujący środowisko silnika Unity3D

Cechy silnika Unity3D:

Wygodny w użyciu edytor zawierający:

* + Podgląd logów wyświetlanych przez grę, a także ostrzeżeń i błędów. Logi wysyłamy do konsoli z poziomu skryptów.
  + Inspektor obiektów przy pomocy którego możemy ustalać różne właściwości obiektu takie jak: pozycja, rotacja, skala, parametry skryptów, parametry związane z wyświetlaniem czy fizyką.
  + Podgląd widoku hierarchii obiektów na scenie
  + Wspólny widok wszystkich elementów znajdujących się w projekcie: modele, materiały, skrypty, sceny.
  + Szybki podgląd jak po kompilacji i uruchomieniu będzie wyglądać gra.
  + Widok sceny, po którym projektant może dowolnie się poruszać ustawiać obiekty, światło czy kamerę

Wyraźny podział na obiekty, komponenty oraz skrypty:

* + Obiekt jest to rozszerzalny byt abstrakcyjny, który w bazowej postaci posiada transformacje, nazwę, dzieci, oraz może mieć rodzica. Może oczywiście być pustym obiektem i nie posiadać żadnej reprezentacji na ekranie, a może być również dowolnym modelem 3D, prymitywem, światłem, kamerą i w pełni oskryptowanym samochodem.
  + Komponent wchodzi w skład obiektów, a konkretnie rozszerza go o nowe funkcjonalności. Filozofia działania Unity3D związana jest właśnie z pracą na komponentach. Komponent przeważnie posiada pewną liczbę parametrów. Przykładowo renderowany na ekranie sześcian, (obiekt) składa z następujących elementów: GameObject zawierający komponent MeshFiler ( przechowuje dane o geometrii, jako parametr przyjmuje siatkę sześcianu). Następnie obiekt sześcianu zawiera kolejny komponent MeshRenderer, który posiada parametr ustawiający materiał renderowania. Co więcej, do sześcianu można przypisać komponent Rigidbody - w nim ustawiane jest parametry fizyczne dla obiektu. Nadawana jest mu masa oraz gęstość. Dzięki temu istnieje możliwość oddziaływania na obiekt siłą. Komponentem może też być skrypt.
  + Komponent skryptowy - jest to kluczowy komponent dla programisty. Pisząc jeden skrypt można go dodać do wielu obiektów. Oczywiście do obiektu można przypisać więcej niż jeden skrypt. Skrypty mogą być pisane w językach JavaScript, C# lub Boo. Skrypty są kompilowane w locie, więc na bieżąco widzimy czy nie został popełniony błąd. W przypadku wystąpienia wyjątku (np. NullPointerException) nie powoduje to zamknięcie Unity3D, tylko wstrzymanie działania aplikacji (aktywna pauza), dzięki czemu można sprawdzić w logach gdzie wystąpił błąd.

Bogata pomoc:

* + Unity Manual - dokumentacja zawierająca opis okien, sposób poruszania się po edytorze, skróty klawiszowe, itp.
  + Reference Manual - zawiera opis poszczególnych części edytora np. elementów odpowiedzialnych za fizykę, dźwięk czy rendering
  + Scripting Reference - znajduje się tutaj opis wszystkich klas, do których możemy się odwoływać z poziomu skryptów. Większość z klas i metod jest wsparta prostymi przykładami w trzech językach, które wspiera Unity3D: JavaScript, C# oraz Boo.
  + W sieci znajduje się duża liczba kursów oraz samouczków do Unity3D, także w wersji wideo.
  + Wokół Unity3D zebrała się duża społeczność programistów, którzy aktywnie działają na forach dyskusyjnych oraz służą pomocą w przypadku napotkania problemów

Elastyczność:

* + Rozszerzalność - programista może sam pisać własne skrypty i wtyczki rozszerzające funkcjonalność silnika
  + Elementy można przenosić między projektami poprzez eksportowanie/importowanie zasobów gry w postaci jednego pliku.
  + Używając prefabrykowanych elementów w trakcie zmiany parametrów jednego z nich, zmiany te są propagowane do pozostałych elementów tego samego typu. Pozwala to przyśpieszyć proces składania świata gry w całość.
  + Silnik Unity3D posiada wbudowaną bazę jednostek cieniujących (ang. shader), przetwarzających obiekty na poziomie grafiki i pikseli z wykorzystaniem procesora graficznego GPU. Oczywiście programista może rozbudować tą bazę piszą swoje własne.

## Specyfikacja zewnętrzna

Po uruchomieniu projektu należy wybrać scenę gry, na której mają odbywać się eksperymenty. Scenę w silniku Unity3D można utożsamiać jako projekt środowiska gry. Sceny są umieszczone w katalogu Assets/Sceen. Każda ze scen posiada skonfigurowaną bibliotekę. Proces konfiguracji biblioteki został opisany w rozdziale 6.4.1. Kilka elementów konfiguracyjnych biblioteki ulega zmianie, ponieważ są to parametry eksperymentu.

Ponadto na scenie można zmienić punkt docelowy agentów komputerowych ustawiając odpowiednio współrzędne obiektu *Target* oraz punkt startowy agentów.

Po ustawieniu parametrów należy włączyć eksperyment przyciskiem *Run* (trójkątny przycisk umieszczony w środku górnej części interfejsu użytkownika). Włącznie eksperymentu powoduje automatyczne przełączenie widoku na środowisko gry, na którym można obserwować poruszających się agentów komputerowych. Agenci przemieszczają się do wcześniej wyznaczonego celu. W dolnej części interfejsu użytkownika znajduje się konsola. Wyświetla ona informacje (czas obliczeń, liczba przeszukanych węzłów oraz długości ścieżki) o każdym agencie biorącym udział w eksperymencie.

### Konfiguracja dostarczonej biblioteki

Po uruchomieniu silnika Unity3D i zainstalowaniu dostarczonej biblioteki *A\* Pathfinding Project* pierwszym krokiem konfiguracyjnym jest dodanie do sceny trójwymiarowego modelu środowiska gry, na którym ma działać moduł odnajdowania ścieżki. Kolejno dodajemy pusty obiekt, który będzie zawierał całą konfigurację biblioteki (w projekcie nazwany jest on *A\**). Do obiektu *A\** dodajemy skrypt z biblioteki o nazwie *Astar Path*, którym dokonywana jest konfiguracja ustawień. Odpowiednia konfiguracja jest bardzo istotna z punktu widzenia optymalizacji oraz napotkanych błędów w czasie testowania aplikacji. Najbardziej istotne parametry konfiguracyjne algorytmu A\* to (rysunek 19):

* Rodzaj grafu – np. siatka (*Grid Graph*).
* Rozmiar węzła grafu. Mapa ma rozmiar 200x200, więc rozmiar węzła może przyjąć 4x4, zatem długości i szerokości grafu będzie wynosić 50x50. Wartości te będą się zmieniały w przypadku badań wydajności gęstości grafu na 100x100 i 200x200.
* Po ustaleniu rozmiaru siatki grafu należy ją umieścić tak aby całą swoją długością i szerokością (współrzędne x i z) obejmowały całą mapę.
* Parametr *MaxClimb* - opisuje maksymalną pozycje pomiędzy dwoma węzłami, tak aby istniało połączenie.
* *MaxSlope* - określa maksymalny kąt nachylenia dla węzła, aby można po nim przejść.
* Biblioteka automatycznie buduje graf przez dokonywanie testów wysokości środowiska gry. Robi to za pomocą rzucania promieni (ang. raycast). Związany jest z tym parametr opisujący długość tego promienia (*ray length*). Parametr ten pozwala ustalić maksymalną wysokość do jakiej ma być tworzony graf. Dla obszarów położonych wyżej tej wartości graf nie będzie budowany. Spowoduje to, że agenci nie będą mogli się poruszać po takich obszarach.



Rysunek Parametry konfiguracyjne biblioteki

## Specyfikacja wewnętrzna

### Struktura skryptów w Unity3D

Skrypty w Unity3D są to klasy dziedziczące po wybudowanej w silnik klasie MonoBehaviour. Skrypty te mają dostęp do metod, które można dowolnie nadpisać. Najczęściej nadpisywanymi metodami są:

Start – metoda wywoływana przed innymi metodami tylko raz. Pozwala ona na inicjalizacje pól klasy.

FixedUpdate/Update – metoda wywoływana jest w każdej klatce. Pozwala aktualizować położenie obiektów.

OnGUI – metoda pozwalająca na przechwytywanie zdarzeń związanych z graficznym interfejsem użytkownika (np. przyciśnięcie przycisku).

### Skrypt nawigacyjny

Wykorzystanie gotowej biblioteki wymaga implementacji skryptu odpowiedzialnego za przemieszczanie się obiektów po mapie na podstawie ścieżki. Skrypt został dodany (jako komponent) do każdego agenta występującego w grze.

Skrypt posiada pole target określające współrzędne celu, do którego mają dostać się agenci. Jest to pole publiczne - takie pola w Unity3D mają możliwość wstawienia obiektu z poziomu silnika.

Seeker jest skryptem dostarczonym wraz z biblioteką. Unity3D pozwala na traktowanie skryptów jak obiekty, co więcej można pobrać taki skrypt dodany do obiektu i wywołać z niego odpowiednie metody. Do pola Path zostanie przypisana ścieżka, którą musi przejść agent - jest ona zwracana przez wywołanie zwrotne metody ze skryptu Seeker.

Skrypt najpierw wykonuje metodę Start, w której pobierany jest skrypt z biblioteki. Z pobranego skryptu wywoływana jest metoda StartPath. Przyjmuje ona za parametry aktualną pozycję agenta, cel oraz wywołanie zwrotne metody, która przekaże obliczoną ścieżkę do skryptu. Metoda FixedUpdate aktualizuje stan gry.

### Skrypty modyfikujące

Jakość otrzymanego rozwiązania w postaci ścieżki można rozpatrywać jako czas obliczenia najkrótszej ścieżki. Jednak interesujący jest aspekt jakości w rozumieniu gracza. Mianowicie czy postacie poruszające się po ścieżce robią to w sposób taki, jak poruszałby się po niej człowiek? Na podstawie przeprowadzonych badań można dojść do wniosku, że wygenerowanie ścieżki i zaprogramowanie agentów, nie daje ładnego wizualnego rezultatu. Agenci poruszają się dokładnie po ścieżce. Przykładowo wykonując zakręt linia skrętu przedstawia złączenie odcinków, a nie wygładzony wycinek koła. Dlatego do podniesienia jakości wygenerowanego rezultatu stosuje się skrypty modyfikujące.

Skrypt modyfikujący jest komponentem dołączonym do agenta (agent może posiadać maksymalnie 2 rodzaje skryptów modyfikujących). Na potrzeby projektu zostały dołączone dwa skrypty modyfikujące:

* *funnel* - jest to prosty algorytm, który znajduje proste odcinki trasy. Rysunek 20 przedstawia efekt działania tego algorytmu. Czerwona linia to ścieżka wygenerowana przez główny algorytm, natomiast zielona jest modyfikacją tej ścieżki.



Rysunek Zasada działania skryptu *funnel*

* *alternative path* - generuje alternatywne ścieżki dla agentów. Powoduje to, że agenci nie poruszają się jeden za drugim.

Zastosowanie skryptów modyfikujących podnosi jakoś znalezionego rozwiązania z punktu widzenia gracza. Cały proces obróbki takiej ścieżki wymaga jednak wykonania dodatkowych obliczeń.

### Implementacja algorytmu Jump Point Search

Implementacja optymalizacji algorytmu A\* wymagała zaprogramowania całego modułu odnajdowania ścieżki. Poniżej zostaną przedstawione klasy biorące udział w procesie reprezentacji danych mapy oraz główny skrypt, w którym zawarta jest optymalizacja algorytmu.

Do reprezentacji siatki mapy wymagana była implementacja prostej klasy punktu (Point) opisanej za pomocą pól x i y.

Do reprezentacji węzła w grafie stosowana jest klasa Node, zawierająca wartość funkcji kosztu, wartość estymowanej wartości (mHeuristicEstimateCost) oraz dotychczas obliczonego kosztu (mCostFromStart). Z każdym węzłem związana jest lista sąsiadujących z nim węzłów – mNeighbors. Reprezentacja węzła na siatce jest związana z polami mX i mY, natomiast punkt w przestrzeni reprezentowany jest przez wektor mNodePosition. W trakcie działania algorytmu każdy węzeł będzie posiadał rodzica za wyjątkiem pierwszego węzła, który będzie miał ustawione pole mParentNode na wartość null. Dodatkową ważną informacją przechowywaną w klasie repezentującej węzeł jest to czy dany węzeł jest węzłem docelowym. Stan ten jest reprezentowane przez wartość logiczną w polu mIsDestinationNode.

Implementacja głównego skryptu znajduje się w klasie *JumpPointNavigationMesh*. Pierwsze z jej publicznych pól (Gizmo) jest obiektem, który służy do rysowania ścieżki na mapie. Może to być przykładowo jeden z prymitywów takich jak: kula czy sześcian. PathMaterial jest to materiał określający kolor ścieżki. StartTransform i DestinationTransform są obiektami określającymi początek i koniec ścieżki. Pole resolution określa jaką część powierzchni terenu będzie zajmowała graficzna reprezentacja węzła. Algorytm wykonujący obliczenia musi uwzględnić obiekty znajdujące się na scenie. Takimi obiektami są np. drzewa. Wartości ApproximationRadius oraz DistanceTolerance opisują tolerancje oraz promień wokół, którego będą usuwane węzły ze względu na znajdujące się tam obiekty blokujące ścieżkę. MaxHeightDelta określa do jakiego poziomu wysokości będzie budowany graf. Zwiększanie tej wartość spowoduje, że graf zacznie być generowany dla terenów położonych wyżej, co w efekcie pozwoli postaci poruszać się po wyższych partiach środowiska gry.

Wektor mTerrainPosition zawiera w sobie współrzędne terenu. Pole to będzie wykorzystane w procesie skalowania siatki i terenu. mGizmoHeight jest wektorem opisującym wysokość na jakieś będą rysowane znaczniki opisujące trasę. Pola mMeshScale i mTerrainScale opisują skalę siatki i terenu. mTerrainScale określa rozmiar terenu 3D, a mMeshScale zawiera przeskalowaną wartość mTerrainScale względem ustawionej rozdzielczości mapy wysokości. Pola te będą wykorzystywane podczas odczytywania współrzędnych świata posiadając współrzędne siatki oraz analogicznie w odwrotnym przypadku.

Obiekt terenu w Unity3D jest zapisany w specyficznej strukturze danych, którą programista może pobrać i przetwarzać w dowolny sposób. Struktura ta nazywana jest mapą wysokości (ang. *heightmap*). Zawiera ona pełen opis struktury mapy zapisany w tablicy dwuwymiarowej przechowującej wartości zmiennoprzecinkowe. Indeksy tablicy opisują położenie punktów mapy na osiach X i Z natomiast wartość zmiennoprzecinkowa określa wysokość punktu w terenie (oś Y). Tym sposobem można przykładowo zapisać trójwymiarową mapę do dwuwymiarowego pliku graficznego, gdzie trzeci wymiar jest reprezentowany przez wartość koloru piksela. W omawianym skrypcie mapa jest przechowywana w tablicy mHeightMap. Pola mWidth i mHeight określają początkowo, długość i szerokość mapy wysokości, a następnie siatkę grafu. Kolejnymi polami są dwie listy: mPaths oraz mNeighbors. Pierwsza z nich reprezentuje ścieżkę w trójwymiarowym świcie – jest to zbiór obiektów reprezentujących znalezioną drogę do celu. Druga z list jest tworzona osobno dla każdego węzła i zawiera listę jego sąsiadów.

Działanie skryptu JumpPointNavigationMesh rozpoczyna się od wykonania metody Start. W niej pobierany jest obiekt terenu (TerrainCollider), który jest przekazywany od metody InitTerrainData. Metoda tak pobiera długość i szerokość mapy wysokości z przekazanego obiekty terenu, ustawiana jest zmienna opisująca rozmiar terenu oraz dokonywane jest skalowanie mapy wysokości terenu do zadanej skali. Następnie tworzona jest nowa mapa wysokości z przeskalowanymi wartościami.

Jedną z metod dostępnych w skrypcie jest metoda OnGUI zajmująca się wyświetlaniem interfejsu graficznego i jego interakcji z użytkownikiem. Zawiera ona kod rysujący przycisk odpowiedzialny za rozpoczęcie procesu odnajdywania ścieżki.

Po kliknięciu na przycisk wywoływana jest metoda FindPath przyjmująca za argumenty dwa wektory początkowy i cel.

Pierwszym krokiem jest wyczyszczenie listy mPaths zawierającej obiekty rysujące ścieżkę w wirtualnym świeci 3D. Następnie tworzona jest lista paths zawierająca punkty ścieżki grafu. Implementacja metody zawiera listy: otwartą (openList) i zamkniętą (closedList).

Następnym krokiem jest pobranie punktów z przestrzeni świata 3D i zwrócenia ich reprezentacji na siatce grafu. Zajmuje się tym metoda GetGridPosition. Potem tworzony jest węzeł początkowy i dodawany do otwartej listy.

Dalszy bieg procesu sprawdza stan otwartej listy. W przypadku gdy znajdują się na niej jakieś elementy są one pobierane i przetwarzane. Pierwszy krok przetwarzania polega na sprawdzeniu warunku końca algorytmu, czyli jeśli aktualnie rozważany węzeł jest węzłem końcowym, to następuje budowanie ścieżki na siatce grafu. W przeciwnym wypadku wykonywana jest operacja pobrania sąsiadów (GetNeighbors).

Metoda GetNeighbors dokonuje analizy sąsiadów aktualnie rozpatrywanego węzła. Wylicza ona odległość od bieżącego węzła do sąsiada oraz dokonuje analizy sąsiadów pod względem tego czy dany węzeł jest osiągalny przez algorytm (znajduje się powyżej dopuszczalnego limitu wysokości lub znajduje się na nim przeszkoda). Za parametry wejściowe przyjmuje ona aktualnie rozpatrywany węzeł oraz węzeł docelowy. Wartością zwracaną jest lista węzłów (sąsiadów).

Metoda Jump zajmuje się rekursywnym rozszerzaniem ścieżki wertykalnie/horyzontalnie i diagonalnie tworząc kolejne punkty skoku. Za parametry przyjmuje współrzędne dziecka (x i y), współrzędne rodzica (parentX, parentY) oraz punkt docelowy. Wartością zwracaną jest koordynata punktu skoku.

W pierwszym kroku jest sprawdzane czy analizowana para węzłów dziecko-rodzic posiada połączenie oraz czy węzeł dziecka nie jest węzłem docelowym. Kolejno analizowane są przypadki wymuszonych sąsiadów i zwracane są ich koordynaty, jeśli tacy sąsiedzi istnieją. Następnie sprawdzane są zgodnie z założeniami punkty wertykalne i horyzontalne w pierwszej kolejności, a następnie poddawane są analizie punkty diagonalne. W każdym z tych przypadków następuje rekursywne wywołanie metody Jump, która zwraca punkt, do którego należy wykonać skok.

# Eksperymenty

Głównym celem będzie zbadanie wydajności algorytmów służących do nawigacji. Do tego celu zostanie wykorzystany moduł odnajdowania ścieżki. Przeprowadzone eksperymenty można podzielić na dwie części:

* Badania heurystyk oraz jakości uzyskanej drogi.
* Przyśpieszanie algorytmu A\* oraz analiza efektywności.

Zaprojektowane zostało proste środowisko testowe korzystające z systemu nawigacji postaci. Do rozwiązania problemu znajdowania ścieżki zastosowany został algorytm A\*. Parametrami eksperymentów związanych w badaniem heurystyk są:

* Poziom skomplikowania środowiska gry (od prostej ścieżki po labirynt),
* Użyta funkcja heurystyczna: odległość euklidesową, Manhattan, diagonalny Manhattan,
* Wykorzystane skrypty modyfikujące ścieżkę (opisane w rozdziale 5.2),
* Gęstość grafu (obszar poszukiwań zostaje zwiększony x4 i x16).

W przypadku eksperymentu związanego z algorytmem Jump Point Search parametrami są:

* Poziom skomplikowania środowiska gry (od prostej ścieżki po labirynt),
* Gęstość grafu (obszar poszukiwań zostaje zwiększony x4 i x16).

## Charakterystyka zaprojektowanych środowisk gry

Na rysunku 21 znajdują się cztery modele środowisk wraz z siatką grafu. Obszary niepokryte siatką są niedostępne dla agentów. Modele środowisk gry zostały wykonane przez autora pracy w programie Blender.

Środowiska gry znajdujące się na rysunku 21 można podzielić ze względu na stopnień skomplikowania. Środowiska numer 1 i 2 posiadają prostą strukturę. W tym przypadku istnieje niewielka liczba alternatywnych ścieżek do zbadania zatem przewidywany czas obliczeń będzie krótszy w porównaniu do dwóch pozostałych środowisk.

Środowiska gry o numerach 3 i 4 posiadają bardziej skomplikowaną strukturę terenu. Środowisko numer 3 posiada jedną ścieżkę, ale jest ona najdłuższa z spośród pozostałych środowisk. Natomiast środowisko gry numer 4 posiada strukturę labiryntu, przez co istnieje wiele alternatywnych ścieżek do rozpatrzenia przez algorytm odnajdujący ścieżkę.

|  |
| --- |
|  |

Rysunek Projekty środowisk gry

## Charakterystyka urządzenia zastosowanego do eksperymentów.

Eksperymenty zostały przeprowadzone na komputerze o parametrach zawartych w tabeli 1.

|  |  |
| --- | --- |
| Procesor | Intel Core i7-3630QM (4 rdzenie, od 2.40 GHz do 3.40 GHz, 6 MB cache) |
| Karta grafiki | 2 x NVIDIA GeForce GT 650M SLI |
| Dysk twardy | Samsung SSD 840 Series 120 GB |
| Pamięć | 16 GB (SO-DIMM DDR3, 1600 MHz) |
| System operacyjny | Microsoft Windows 8 x64 |

Tabela Charakterystyka urządzenia

## Eksperyment 1 – badanie heurystyk

Dla każdego z zaprojektowanych środowisk gry zostały przeprowadzone badania. Polegały one na umieszczeniu dziesięciu komputerowych agentów w wybranym punkcie startowym, następnie został im wskazany punkt docelowy, do którego mieli się udać.

**Eksperyment 1.1**

****

Rysunek Pierwsze środowisko z wygenerowaną ścieżką

Rysunek 22 przedstawia wygenerowaną ścieżkę (kolor zielony) z eksperymentu 1.2 z zastosowaniem skryptów modyfikacyjnych. Warto zauważyć, że skrypt *alternative path* spowodował, wygenerowanie dwóch zupełnie innych ścieżek. Jest to często występujący błąd w grach strategicznych. Wskazując grupie agentów cel, do którego mają dotrzeć powoduje, że w pewnym momencie droga, którą zmierzają do celu jest zupełnie inna.

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 1,595 | 1211 | 224 | 2,1 | 1632 | 224 | 1,7 | 1376 | 224 |

Tabela 2 przedstawia wyniki eksperymentu 1.1 na mapie 50x50 bez włączonych modyfikatorów ścieżki. Czasy wykonywania obliczeń są mierzone w milisekundach i dla heurystyki euklidesowej i diagonalnego Manhattan są wręcz identyczne. Wykorzystanie metody Manhattan spowodowało, że algorytm odwiedził najwięcej węzłów z pośród badanych heurystyk. Najmniej węzłów zostało odwiedzonych stosując heurystykę euklidesową.

**Eksperyment 1.2**

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 5 | 1211 | 224 | 5 | 1632 | 224 | 6,01 | 1376 | 224 |
| Agent 2. | 2 | 1301 | 225 | 2 | 1763 | 225 | 2 | 1419 | 225 |
| Agent 3. | 0,99 | 1351 | 225 | 3 | 1896 | 226 | 2 | 1458 | 225 |
| Agent 4. | 1 | 1380 | 228 | 2 | 1890 | 229 | 1 | 1466 | 226 |
| Agent 5. | 2 | 1414 | 228 | 2 | 1976 | 230 | 1 | 1512 | 228 |
| Agent 6. | 1 | 1442 | 228 | 2 | 1933 | 227 | 2 | 1473 | 229 |
| Agent 7. | 1 | 1423 | 231 | 2 | 2072 | 229 | 2 | 1482 | 225 |
| Agent 8. | 2,01 | 1441 | 231 | 3,01 | 2069 | 231 | 1 | 1496 | 230 |
| Agent 9. | 1 | 1461 | 232 | 1,98 | 2021 | 228 | 1 | 1499 | 231 |
| Agent 10. | 1 | 1479 | 233 | 2 | 2077 | 232 | 1 | 1550 | 233 |
| Wartości średnie | **1,7** | **1390,3** | **228,5** | **2,49** | **1932,9** | **228,1** | **1,90** | **1473,1** | **227,6** |

Tabela 3 przestawia symulacje dla eksperymentu 1.2, jednak do agentów zostały dołączone komponenty skrypty modyfikacyjne (opisane w rozdziale 4.4.1). Zestawiając obydwie tabele, można dojść do wniosku, że narzut czasowy związany z wykorzystaniem skryptów poprawiających jakość jest niewielki - rzędu ≤ 0,4[ms]. Natomiast obliczenia ścieżki w metodzie Manhattan wymagały odwiedzin ponad 400 węzłów więcej.

**Eksperyment 1.3**

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 5,39 | 4887 | 452 | 8,01 | 7389 | 452 | 7,47 | 5839 | 452 |

Tabela 4 przestawia wyniki eksperymentu 1.3. Eksperyment ten posiada identyczne parametry jak eksperyment 1.1, jednak algorytm ma teraz do przeszukania 4 razy więcej węzłów niż w poprzednim wypadku. Można zauważyć, że liczba odwiedzonych węzłów wzrosła znacząco. W przypadku metody Manhattan przyrost przekroczył 5000 węzłów, co jest procentowo dużą liczbą. Czasowo najlepsze wyniki uzyskała heurystyka euklidesowa, a najdłużej wykonywał się algorytm używając heurystyki Manhattan.

**Eksperyment 1.4**

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 8,99 | 4887 | 452 | 10,96 | 7389 | 452 | 12 | 5839 | 452 |
| Agent 2. | 3,99 | 5097 | 453 | 7,98 | 7578 | 453 | 7 | 5992 | 453 |
| Agent 3. | 6 | 5196 | 456 | 8,98 | 7771 | 454 | 10,01 | 6089 | 457 |
| Agent 4. | 6 | 5379 | 457 | 8,99 | 7804 | 456 | 14,01 | 6120 | 458 |
| Agent 5. | 7 | 5534 | 460 | 9,97 | 8014 | 459 | 16,01 | 6225 | 458 |
| Agent 6. | 7 | 5663 | 465 | 7,98 | 7979 | 458 | 11 | 6890 | 461 |
| Agent 7. | 6,99 | 5739 | 461 | 10,97 | 8542 | 466 | 9,01 | 6425 | 462 |
| Agent 8. | 5,99 | 5839 | 470 | 10,98 | 8815 | 464 | 16,01 | 6376 | 472 |
| Agent 9. | 7 | 5897 | 475 | 12,04 | 8914 | 470 | 10 | 6426 | 482 |
| Agent 10. | 7,01 | 5989 | 464 | 10,98 | 8832 | 473 | 8,98 | 6457 | 471 |
| Wartości średnie: | **6,597** | **5522** | **461,3** | **9,98** | **8163,8** | **460,5** | **11,4** | **6283,9** | **462,6** |

Tabela 5 przedstawia wyniki badań przeprowadzonych na grafie o rozmiarach 100x100. Zastosowanie skryptów modyfikacyjnych obciążyło czasowo najbardziej heurystykę diagonal Manhattan i uzyskała najgorszy wynik ze wszystkich heurystyk. Pomimo tego heurystyka Manhattan w dalszym ciągu odwiedza największą liczbę węzłów.

**Eksperyment 1.5**

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Włączony modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas[ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas[ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas[ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 21,84 | 20013 | 901 | 39,063 | 31313 | 901 | 44,892 | 24318 | 901 |

Tabela 6 przedstawia wyniki badań środowiska gry o rozmiarach 200x200. Jest to największy graf na jakim zostaną przeprowadzone badania. Porównując go z eksperymentem 1.1 można zauważyć, że czasy obliczeń są kilkunastokrotnie większe. Zwiększenie rozmiaru mapy spowodowało, że heurystyka diagonal Manhattan osiągnęła najdłuższy czas wykonania.

**Eksperyment 1.6**

Tabela Wyniki badań: środowisko 1, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 32,96 | 20013 | 901 | 34,96 | 31313 | 901 | 57,96 | 24318 | 901 |
| Agent 2. | 42,99 | 20311 | 904 | 34,84 | 32220 | 904 | 32,52 | 24278 | 904 |
| Agent 3. | 22,01 | 20508 | 907 | 37,93 | 32971 | 905 | 61,99 | 24370 | 907 |
| Agent 4. | 28,12 | 20874 | 912 | 47,93 | 34122 | 912 | 32,97 | 24673 | 908 |
| Agent 5. | 27,21 | 21184 | 911 | 54,88 | 34914 | 915 | 48,9 | 24795 | 915 |
| Agent 6. | 27,73 | 21338 | 915 | 41,88 | 34538 | 916 | 55,92 | 24741 | 920 |
| Agent 7. | 37,08 | 21628 | 915 | 66,8 | 35716 | 916 | 62,05 | 24731 | 920 |
| Agent 8. | 43,03 | 22076 | 919 | 49,96 | 34737 | 924 | 40 | 25007 | 924 |
| Agent 9. | 40,98 | 22506 | 929 | 97,97 | 36200 | 928 | 60,03 | 25008 | 926 |
| Agent 10. | 52,08 | 22758 | 933 | 81,05 | 35270 | 935 | 41,99 | 25159 | 940 |
| Wartości średnie: | **35,419** | **21319,6** | **914,6** | **54,82** | **34200,1** | **915,6** | **49,433** | **24708** | **916,5** |

Dodając do mapy nr 2 skrypty modyfikujące można zauważyć wzrost czasu obliczeń. W przypadku heurystyki euklidesowej wzrost ten zwiększył się o 14[ms], Manhattan o 15[ms]. Natomiast heurystyka diagonal Manhattan wykonała się wolnej tylko o 5[ms]. Wyniki przedstawia tabela 7.

Analizując powyższe wyniki można dojść do wniosku, że najlepsze wyniki osiągnęła heurystyka wykorzystująca odległość euklidesową.

Jest pierwsza z czterech omawianych map i posiada prostą strukturę.



Rysunek Środowisko numer 2 z wygenerowaną ścieżką

**Eksperyment 2.1**

Tabela 8 przedstawia wyniki działania algorytmu z różnymi heurystykami. Porównując wyniki z pierwszą mapą można zauważyć, że osiągnięte czasy są podobne. Podobnie jak w mapie nr 1 heurystyka Manhattan dokonuje przeglądu największej liczby węzłów. Jednak czasowo najszybciej wykonał się algorytm korzystający z heurystyki diagonalnej Manhattan, tym samym odwiedzając najmniejszą liczbę węzłów.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 1,7 | 1348 | 181 | 1,827 | 1537 | 181 | 1,495 | 1284 | 181 |

**Eksperyment 2.2**

W tabeli 9 przedstawiono wyniki działania algorytmu ze skryptami modyfikującymi. Porównując symulacje z eksperymentem 2.1, heurystyka Diagonal Manhattan osiągnęła lepszy wynik. Przypadek badawczy wykorzystujący odległość euklidesową jest minimalnie gorszy. Natomiast proces odnajdywania ścieżki wykorzystującego heurystykę Manhattan wykonał się najwolniej przeglądając również największą liczbę węzłów.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 5 | 1348 | 181 | 6 | 1537 | 181 | 5 | 1284 | 181 |
| Agent 2. | 2 | 1418 | 181 | 1 | 1594 | 181 | 1 | 1392 | 181 |
| Agent 3. | 1 | 1426 | 181 | 2 | 1582 | 181 | 2 | 1337 | 181 |
| Agent 4. | 2 | 1491 | 184 | 1,96 | 1696 | 181 | 1 | 1488 | 183 |
| Agent 5. | 1 | 1484 | 183 | 1,99 | 1698 | 184 | 2 | 1492 | 183 |
| Agent 6. | 1 | 1485 | 186 | 3,03 | 1684 | 184 | 1 | 1486 | 184 |
| Agent 7. | 2 | 1526 | 184 | 2 | 1774 | 183 | 1 | 1507 | 185 |
| Agent 8. | 1 | 1525 | 184 | 3 | 1751 | 186 | 1 | 1538 | 186 |
| Agent 9. | 2 | 1528 | 188 | 3 | 1751 | 185 | 1 | 1541 | 183 |
| Agent 10. | 1,99 | 1575 | 188 | 1 | 1801 | 185 | 2 | 1577 | 187 |
| Wartości średnie: | **1,899** | **1480,6** | **184** | **2,498** | **1686,8** | **183,1** | **1,7** | **1464,2** | **183,4** |

**Eksperyment 2.3**

Wyniki eksperymentu na mapie 2 zostały zawarte w tabeli 10. Można zauważyć, że czasy dla heurystyki liczonej odległością euklidesową oraz diagonalnym Manhattan czasowo zwracają podobne wartości. Jednak biorąc pod uwagę liczbę odwiedzonych węzłów to diagonalny Manhattan odwiedza ich najmniej.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Włączony modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 6,083 | 5943 | 363 | 10,5805 | 6917 | 363 | 6,296 | 5817 | 363 |

**Eksperyment 2.4**

Tabela 11 przestawia wyniki eksperymentu 2.4. Włącznie skryptów poprawiających jakość generowanych ścieżek obciążyło jednakowo heurystyki posiadające najlepsze wyniki czasowe. Heurystyka Manhattan osiągnęła przewidywalny najgorszy wynik czasowy oraz przetworzyła największą ilość węzłów.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 12 | 5943 | 363 | 10,99 | 6917 | 363 | 15 | 5817 | 363 |
| Agent 2. | 7 | 6057 | 364 | 8 | 7365 | 363 | 9,01 | 5910 | 363 |
| Agent 3. | 6,97 | 6138 | 367 | 7,98 | 7732 | 368 | 8 | 6021 | 370 |
| Agent 4. | 7,01 | 6207 | 372 | 10 | 8802 | 366 | 7,99 | 6245 | 367 |
| Agent 5. | 6,97 | 6451 | 374 | 11 | 8400 | 370 | 8,81 | 6348 | 369 |
| Agent 6. | 9 | 6496 | 375 | 9,93 | 8269 | 374 | 7,93 | 6469 | 370 |
| Agent 7. | 8,01 | 6581 | 380 | 11 | 8716 | 370 | 10 | 6545 | 375 |
| Agent 8. | 9 | 6532 | 376 | 11 | 8449 | 371 | 7 | 6553 | 370 |
| Agent 9. | 8 | 6625 | 377 | 11,04 | 8081 | 373 | 6 | 6739 | 374 |
| Agent 10. | 8,01 | 6731 | 379 | 10,97 | 8386 | 372 | 7 | 6724 | 378 |
| Wartości średnie: | **8,197** | **6376,1** | **372,7** | **10,191** | **8111,7** | **369** | **8,674** | **6337,1** | **369,9** |

**Eksperyment 2.5**

Tabela 12 przedstawia wyniki symulacji dla mapy o rozmiarze 200x200. Wzrost obszaru przeszukiwań nie wyłonił najlepszej heurystyki. Wyniki osiągnięte przez heurystyki diagonalny Manhattan oraz euklidesową są porównywalne.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 31,041 | 24109 | 716 | 39,121 | 29903 | 717 | 30,881 | 23906 | 716 |

**Eksperyment 2.6**

Wyniki kolejnego eksperymentu zostały umieszczone w tabeli 13. Dodanie skryptów modyfikacyjnych spowodowało, że minimalnie lepsza od heurystyki euklidesowej okazała się heurystyka diagonal Manhattan. Natomiast najdłuższy czas wykonania osiągnęła heurystyka Manhattan.

Tabela Wyniki badań: środowisko 2, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 31,75 | 24109 | 716 | 33,94 | 29903 | 717 | 30,67 | 23906 | 716 |
| Agent 2. | 32,93 | 24289 | 727 | 39,14 | 30188 | 751 | 24,98 | 24078 | 721 |
| Agent 3. | 34,94 | 24723 | 726 | 42,91 | 32157 | 732 | 24,99 | 24122 | 724 |
| Agent 4. | 35,05 | 24695 | 736 | 43,91 | 33426 | 731 | 30,99 | 24477 | 724 |
| Agent 5. | 32,95 | 24754 | 744 | 47,87 | 35708 | 741 | 28,99 | 24491 | 734 |
| Agent 6. | 32,98 | 25012 | 737 | 44,81 | 35113 | 751 | 46,99 | 24752 | 745 |
| Agent 7. | 34,96 | 25111 | 747 | 45,91 | 35889 | 752 | 48,98 | 24910 | 746 |
| Agent 8. | 35,99 | 25243 | 748 | 52,93 | 38486 | 749 | 30,96 | 25070 | 749 |
| Agent 9. | 34 | 25078 | 757 | 66,94 | 40690 | 752 | 32 | 25656 | 755 |
| Agent 10. | 35,94 | 25292 | 756 | 54,8 | 41450 | 769 | 33,98 | 25563 | 753 |
| Wartości średnie: | **34,149** | **24830,6** | **739,4** | **47,316** | **35301** | **744,5** | **33,353** | **24702,5** | **736,7** |



Rysunek Środowisko numer 3 z wygenerowaną ścieżką

Rysunek 24 przedstawia mapę z wygenerowaną ścieżką. Agenci rozpoczynają ruch z lewego górnego narożnika mapy. Warto zwrócić uwagę na konstrukcje mapy. Nie zawiera ona alternatywnych dróg – postacie podążając jedną ścieżką docierają do punktu docelowego. Algorytm sumarycznie ma w tym przypadku do przeszukania procentowo większy obszar w porównaniu do poprzednich map. Mapa 3 jest pierwszą z map zawierającą bardziej skomplikowaną strukturę terenu.

**Eksperyment 3.1**

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 1,597 | 1163 | 117 | 1,596 | 1196 | 117 | 1,398 | 1042 | 117 |

Tabela 14 przedstawia wyniki symulacji na mapie 3. W tej symulacji heurystyka euklidesowa, która do tej pory osiągała najlepsze wyniki osiągnęła wynik podobny do najgorszej z dotychczas testowanych heurystyk. Najszybciej wykonała się heurystyka diagonalna Manhattan oraz odwiedziła najmniej węzłów.

W tabeli 15 zostały zaprezentowane wyniki dla mapy 3 przy włączonych modyfikatorach ścieżki. Narzut czasowy wynikający z zastosowania skryptów jest niewielki i wynosi on od 0,7[ms] do 1.5[ms].

**Eksperyment 3.2**

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 5 | 1182 | 117 | 5 | 1250 | 117 | 5,01 | 1160 | 117 |
| Agent 2. | 0,99 | 1274 | 117 | 3 | 1572 | 117 | 2 | 1227 | 117 |
| Agent 3. | 3 | 1295 | 118 | 2 | 1611 | 117 | 1 | 1286 | 117 |
| Agent 4. | 2 | 1326 | 118 | 2 | 1438 | 119 | 2 | 1291 | 119 |
| Agent 5. | 1 | 1323 | 119 | 2 | 1710 | 119 | 1 | 1318 | 118 |
| Agent 6. | 2 | 1369 | 120 | 3 | 1683 | 120 | 1 | 1326 | 118 |
| Agent 7. | 3 | 1483 | 117 | 4,01 | 1518 | 118 | 1 | 1326 | 119 |
| Agent 8. | 3 | 1557 | 121 | 3 | 1630 | 119 | 3 | 1384 | 119 |
| Agent 9. | 3 | 1496 | 131 | 4,02 | 1770 | 119 | 2 | 1479 | 118 |
| Agent 10. | 2 | 1588 | 122 | 1 | 1558 | 122 | 2 | 1466 | 131 |
| Wartości średnie | **2,499** | **1389,3** | **120** | **2,903** | **1574** | **118,7** | **2,001** | **1326,3** | **119,3** |

Mapa numer 3 została powiększona do rozmiaru 100x100. Wartości w tabeli 16 wskazują na przewagę heurystyki diagonalnej Manhattan. Heurystyka Manhattan podobnie jak w pozostałych przypadkach przetwarza największą liczbę węzłów oraz posiada wysoką wartość czasu obliczeń.

**Eksperyment 3.3**

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 5,883 | 4946 | 231 | 7,488 | 5568 | 231 | 5,291 | 4766 | 231 |

**Eksperyment 3.4**

Wyniki symulacji przedstawione w tabeli 17 wskazują, że heurystyki euklidesowa oraz diagonalna Manhattan wykonały się w podobnych czasach. W poprzedniej symulacji heurystyka diagonal Manhattan posiadała najkrótszy czas wykonania. Można więc dojść do wniosku, że dodanie skryptów modyfikacyjnych jest bardziej obciążające czasowo dla tej właśnie heurystyki.

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 10 | 4980 | 231 | 10 | 5607 | 231 | 7,01 | 5097 | 231 |
| Agent 2. | 6,99 | 5173 | 231 | 8,99 | 7006 | 231 | 6 | 5211 | 231 |
| Agent 3. | 6,97 | 5215 | 234 | 11,01 | 7050 | 235 | 7,01 | 5314 | 235 |
| Agent 4. | 7 | 5447 | 233 | 8,98 | 7182 | 235 | 7,98 | 5522 | 234 |
| Agent 5. | 7 | 5535 | 234 | 9,96 | 6983 | 235 | 7,9 | 5594 | 236 |
| Agent 6. | 7,99 | 5747 | 237 | 10,01 | 6947 | 240 | 7 | 5667 | 236 |
| Agent 7. | 7 | 5989 | 235 | 10,01 | 7018 | 241 | 7 | 6034 | 234 |
| Agent 8. | 7 | 6321 | 238 | 18,02 | 7676 | 234 | 7,9 | 6362 | 241 |
| Agent 9. | 5,98 | 6534 | 260 | 13,02 | 7801 | 236 | 7,01 | 6382 | 260 |
| Agent 10. | 7 | 6072 | 245 | 15,02 | 7174 | 239 | 7,9 | 6420 | 241 |
| Wartości średnie | **7,293** | **5701,3** | **237,8** | **11,502** | **7044,4** | **235,7** | **7,271** | **5760,3** | **237,9** |

**Eksperyment 3.5**

Mapę poddawaną analizie zwiększono do rozmiaru 200x200. Analizując wyniki umieszczone w tabeli 18 można zauważyć stopniową przewagę heurystyki diagonalnej Manhattan. W poprzednich badanych mapach o rozmiarze 200x200 heurystyka ta uzyskiwała większe czas obliczeń, w tym przypadku jest jednak inaczej.

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów

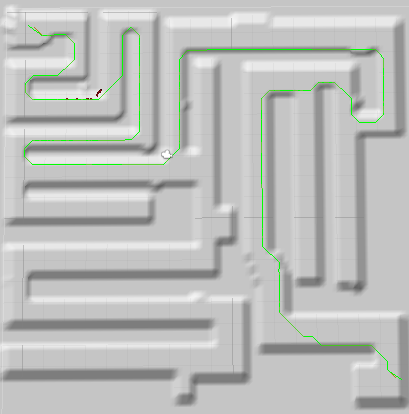
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 42,669 | 20224 | 461 | 67,367 | 23799 | 461 | 40,816 | 20064 | 461 |

Do agentów poruszających się po mapie 3 dodano skrypty modyfikujące. Wyniki symulacji poszukiwania drogi znajdują się w tabeli 19. Warto zwrócić uwagę, że dodanie skryptów modyfikujących najmniej obciążyło heurystykę diagonal Manhattan. Natomiast pozostałe heurystyki wykonały się o 15[ms](euklidesowa) i 11[ms] (Manhattan) dłużej.

**Eksperyment 3.6**

Tabela Wyniki badań: środowisko 3, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 28,87 | 20224 | 461 | 39,99 | 23799 | 461 | 27,98 | 20864 | 461 |
| Agent 2. | 34,87 | 20420 | 467 | 31,92 | 25941 | 466 | 40,04 | 21023 | 465 |
| Agent 3. | 37,95 | 20613 | 466 | 73,93 | 28172 | 470 | 64,14 | 21237 | 467 |
| Agent 4. | 54,92 | 21266 | 473 | 81,08 | 29453 | 471 | 47,05 | 21434 | 467 |
| Agent 5. | 60,95 | 21508 | 472 | 70,89 | 28984 | 475 | 42,98 | 21821 | 474 |
| Agent 6. | 64,87 | 21660 | 476 | 80,92 | 28910 | 480 | 33,05 | 22163 | 475 |
| Agent 7. | 68,94 | 22038 | 475 | 73,94 | 29667 | 477 | 69,08 | 22393 | 477 |
| Agent 8. | 77,01 | 22968 | 485 | 78,04 | 30025 | 489 | 35,01 | 22856 | 483 |
| Agent 9. | 60,95 | 24997 | 486 | 88,07 | 30739 | 489 | 39,86 | 22958 | 487 |
| Agent 10. | 80,99 | 25768 | 487 | 127,57 | 43759 | 489 | 47,04 | 22084 | 488 |
| Wartości średnie | **57,032** | **22146,2** | **474,8** | **78,4844** | **29944,9** | **476,7** | **44,623** | **21883,3** | **474,4** |



Rysunek Środowisko numer 4 z wygenerowaną ścieżką

Ostatnią analizowaną mapą jest mapa posiadająca strukturę labiryntu (rysunek 25). Agenci zostali umieszczani w lewym górnym rogu, a ich celem jest dotarcie do punktu końcowego znajdującego się w dolnym prawym rogu mapy. Zielona linia oznacza ścieżkę, którą podążają agenci.

**Eksperyment 4.1**

Wyniki symulacji na przedstawionej mapie o rozmiarze 50x50 zostały przedstawione w tabeli 20. Największy czas na uzyskała heurystyka Manhattan. Natomiast porównywalne wyniki uzyskały dwie pozostałe.

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 50x50, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agenci komputerowi: | 3,502 | 840 | 67 | 4,102 | 977 | 67 | 3,501 | 848 | 67 |

**Eksperyment 4.2**

Dodanie skryptów modyfikacyjnych w przypadku takich rozmiarów mapy obciążyło czasowo heurystykę diagonalną Manhattan (tabela 21). Uzyskała ona gorszy czas od najlepszej w tym przypadku heurystyki euklidesowej.

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 50x50, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 50x50 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 14,01 | 911 | 67 | 13,01 | 1003 | 69 | 14,01 | 869 | 67 |
| Agent 2. | 2 | 958 | 69 | 5 | 1633 | 67 | 3 | 989 | 69 |
| Agent 3. | 2 | 981 | 69 | 4,01 | 1679 | 69 | 2 | 1052 | 67 |
| Agent 4. | 3 | 982 | 67 | 7 | 1562 | 67 | 4 | 1020 | 69 |
| Agent 5. | 2 | 1023 | 69 | 3,01 | 1386 | 71 | 2 | 1077 | 69 |
| Agent 6. | 3 | 1051 | 68 | 4 | 1229 | 68 | 4 | 1074 | 67 |
| Agent 7. | 2 | 1037 | 69 | 4 | 1772 | 68 | 3 | 1080 | 69 |
| Agent 8. | 5 | 1041 | 69 | 6 | 1706 | 69 | 3 | 1110 | 68 |
| Agent 9. | 3 | 1076 | 70 | 4 | 1759 | 71 | 3 | 1113 | 69 |
| Agent 10. | 2 | 1083 | 70 | 4 | 1680 | 68 | 2 | 1150 | 67 |
| Średnia: | **3,801** | **1014,3** | **68,7** | **5,403** | **1540,9** | **68,7** | **4,001** | **1053,4** | **68,1** |

**Eksperyment 4.3**

Kolejna symulacja została przeprowadzona w środowisku numer 4 powiększonemu do rozmiaru 100x100. W tym przypadku z powodu braku skryptów modyfikujących wyniki heurystyk euklidesowej i diagonalnej Manhattan są zbliżone (tabela 22).

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 100x100, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Wartości średnie | 11,297 | 3463 | 132 | 15,415 | 4294 | 132 | 11,911 | 3592 | 132 |

**Eksperyment 4.4**

Odnosząc się do poprzednich wyników można było się spodziewać, że dodanie skryptów modyfikujących obciąży czasowo bardziej heurystykę diagonalną Manhattan i osiągnie gorszy czas wykonania. Warto zwrócić uwagę, że w tym przypadku zwiększania się rozmiaru mapy heurystyka ta osiąga najlepsze wyniki (tabela 23).

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 100x100, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 100x100 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 22 | 3538 | 131 | 25,01 | 4351 | 131 | 22,04 | 3640 | 131 |
| Agent 2. | 10,01 | 3662 | 133 | 32,04 | 9000 | 132 | 10,01 | 3802 | 133 |
| Agent 3. | 10,02 | 3860 | 137 | 31,04 | 9246 | 137 | 10,01 | 3888 | 132 |
| Agent 4. | 12,01 | 3783 | 135 | 35,09 | 8991 | 132 | 12,02 | 4120 | 137 |
| Agent 5. | 12,01 | 3927 | 138 | 32,05 | 9220 | 134 | 12,01 | 3940 | 135 |
| Agent 6. | 11,02 | 3974 | 134 | 31 | 8790 | 137 | 11 | 4004 | 137 |
| Agent 7. | 10,01 | 4030 | 138 | 40,03 | 11115 | 133 | 11,02 | 4094 | 138 |
| Agent 8. | 13,01 | 4040 | 138 | 39,31 | 10753 | 138 | 12,01 | 4136 | 134 |
| Agent 9. | 11,01 | 4154 | 136 | 45,13 | 11343 | 137 | 11,01 | 4174 | 136 |
| Agent 10. | 10,95 | 4177 | 140 | 40,05 | 10971 | 139 | 11,02 | 4266 | 140 |
| Wartości średnie: | **12,205** | **3914,5** | **136** | **35,075** | **9378** | **135** | **12,215** | **4006,4** | **135,3** |

**Eksperyment 4.5**

Tabela 24 zawiera wyniki badań przeprowadzonych dla największych rozmiarów mapy. Najlepszy wynik czasowy osiągnęła heurystyka diagonalna Manhattan, co potwierdzaj jej efektywność na mapach o dużych rozmiarach. Heurystyka euklidesowa osiągnęła o 6[ms] gorszy czas w porównaniu najlepszego wyniku dla omawianej symulacji.

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 200x200, bez modyfikatorów

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | brak modyfikatora | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Wartości średnie: | 46,943 | 14315 | 263 | 66,782 | 19087 | 263 | 40,096 | 10869 | 263 |

**Eksperyment 4.6**

Dodanie skryptów modyfikacyjnych do mapy 4 pozwoliło na uzyskanie wyników umieszczonych w tabeli 25. Metoda Manhattan uzyskała najgorszy wynik jej czas obliczeń jest 2.5 razy większy od pozostałych heurystyk. Najlepszy wynik czasowy uzyskała heurystyka diagonalna Manhattan. Wykonała się szybciej o 5[ms] szybciej w porównaniu do heurystyki euklidesowej.

Tabela Wyniki badań: środowisko 4, rozmiar 200x200, włączone modyfikatory

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rozmiar grafu: | 200x200 | | | | | | | | |
| Modyfikator: | Funnel, Alternative Path | | | | | | | | |
| Heurystyka: | Euclidean | | | Manhattan | | | Diagonal Manhattan | | |
|  | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość | Czas [ms] | Liczba odwiedzin | Długość |
| Agent 1. | 59,04 | 14594 | 263 | 79,06 | 19510 | 263 | 41,05 | 15202 | 263 |
| Agent 2. | 44,07 | 15234 | 264 | 76,46 | 21256 | 264 | 47,97 | 15406 | 264 |
| Agent 3. | 50,08 | 16255 | 266 | 83,1 | 24827 | 272 | 50,06 | 15950 | 265 |
| Agent 4. | 51,03 | 16178 | 272 | 89,09 | 25021 | 264 | 53,02 | 15700 | 272 |
| Agent 5. | 57,07 | 16462 | 269 | 97,11 | 25559 | 268 | 50,04 | 16165 | 268 |
| Agent 6. | 58,06 | 16316 | 274 | 90,8 | 25248 | 272 | 51,74 | 16608 | 273 |
| Agent 7. | 48,05 | 16109 | 271 | 178,15 | 48113 | 270 | 42,06 | 16066 | 272 |
| Agent 8. | 52,05 | 16499 | 273 | 183,2 | 50231 | 274 | 43,21 | 16260 | 275 |
| Agent 9. | 52,01 | 16299 | 274 | 194,15 | 50208 | 275 | 46,05 | 16249 | 273 |
| Agent 10. | 57,04 | 16494 | 274 | 194,11 | 50808 | 270 | 45,05 | 16214 | 277 |
| Wartości średnie | **52,85** | **16044** | **270** | **126,523** | **34078,1** | **269,2** | **47,025** | **15982** | **270,2** |

## Eksperyment 2 – badanie algorytmu Jump Point Search

W tym eksperymencie zostanie przeanalizowany ten sam zestaw środowisk gry. Na każdym z środowisk zostanie wywołany skrypt z algorytmem JPS. Rozmiar środowisk będzie zwiększany identycznie jak w poprzedniej analizie. Dzięki temu jest możliwe dokonanie porównania czasowego algorytmu przed i po optymalizacji. Eksperyment dokonuje analizy heurystyki diagonal Manhattan.

Eksperymenty były przeprowadzany dla dziesięciu agentów. Dla każdego z agentów został zapisany wynik obliczeń algorytmu znajdującego ścieżkę do celu. Wynik czasowy następnie został uśredniony. W ostatnim wierszu zestawu tabel z eksperymentami został zapisany uśredniony wynik algorytmu A\*. Wynik ten jest rezultatem otrzymanym w eksperymentach z rozdziału 7.4 dla heurystyki diagonalnej Manhattan oraz przy wyłączonych skryptach modyfikacyjnych.

Tabela 26 przedstawia wyniki eksperymentu 5.1 przeprowadzanego w środowisku numer 1. Można zauważyć, że dla małych i średnich środowisk wynik czasowy jest porównywalny. W przypadku środowiska o największym rozmiarze algorytm JPS wykonuje się o 19[ms] szybciej.

Tabela Wyniki działania algorytmu JPS, środowisko 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Eksperyment 5.1** | | | |
| Rozmiar: | 200x200 | 100x100 | 50x50 |
| Agent nr: | Rezultat czasowy [ms] | | |
| 1 | 23,51 | 9,77 | 3,34 |
| 2 | 26,61 | 6,54 | 1,42 |
| 3 | 26,19 | 6,57 | 1,53 |
| 4 | 26,48 | 6,78 | 1,43 |
| 5 | 23,13 | 6,64 | 1,41 |
| 6 | 25,8 | 8,74 | 1,41 |
| 7 | 26,3 | 4,86 | 1,41 |
| 8 | 25,84 | 5,13 | 1,41 |
| 9 | 25,94 | 6,86 | 1,82 |
| 10 | 25,95 | 6,95 | 1,05 |
| Średnia: | **25,575** | **6,884** | **1,623** |
| Średnia -poprzedni eksperyment: | 44,89 | 7,473 | 1,7 |

Tabela Wyniki działania algorytmu JPS, środowisko 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Eksperyment 5.2** | | | |
| Rozmiar: | 200x200 | 100x100 | 50x50 |
| Agent nr: | Rezultat czasowy [ms] | | |
| 1 | 19,84 | 8,52 | 4,72 |
| 2 | 13,85 | 4,82 | 1,47 |
| 3 | 18,98 | 5,37 | 1,66 |
| 4 | 13,98 | 4,82 | 1,46 |
| 5 | 13,9 | 4,84 | 1,46 |
| 6 | 14,35 | 5,49 | 1,67 |
| 7 | 14,28 | 4,81 | 1,62 |
| 8 | 13,93 | 9,74 | 1,03 |
| 9 | 14,45 | 4,82 | 6,25 |
| 10 | 19,41 | 3,41 | 1,59 |
| Średnia: | **15,697** | **5,664** | **2,293** |
| Średnia -poprzedni eksperyment: | 30,88 | 6,29 | 1,495 |

W analizie środowiska gry numer 2, którego wyniki zostały zawarte w tabeli 27 można zauważyć, że algorytm JPS zwraca gorszy wynik, niż rezultat otrzymany bez algorytmu JPS. W przypadku środowiska średniej wielkości wynik czasowy jest o 1[ms] lepszy. Warto zauważyć, że algorytm JPS uzyskuje najlepsze przyśpieszenie dla dużych środowisk.

Przed analizą eksperymentu 5.3 warto zwrócić uwagę na strukturę środowiska gry. Posiada ono proste ścieżki. Ta właściwość pozwoli algorytmowi JPS na wstawienie mniejszej liczby punktów skoku – jeden będzie zaczynał się na początku prostego odcinka drogi, a drugi na jego końcu. W wyniku tego uzyskane czasy (tabela 28) dla rozmiarów 50x50 i 100x100 są mniejsze od tych z przed optymalizacji. Analizując środowisko o rozmiarze 200x200 algorytm osiągnął mniejszy czas zestawiając go z wynikiem z poprzedniego eksperymentu 3.5 (rezultat osiągnięty dla heurystyki Diagonal Manhattan), jednak nie jest on tak niski jak w przypadku mniejszych środowisk.

Wyniki badań nad środowiskiem 4 znajdują się w tabeli 29. Środowisko to zawiera skomplikowaną strukturę, więc uzyskane rezultaty czasowe są większe od poprzednio analizowanych. Zestawiając wyniki dla poszczególnych środowisk można zauważyć, że dla każdego rozmiaru środowiska zastosowanie algorytmu JPS skraca czas obliczeń. Przyśpieszenie czasowe zwiększa się wraz z rozmiarem środowiska gry.

Tabela Wyniki działania algorytmu JPS, środowisko 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Eksperyment 5.3** | | | |
| Rozmiar: | 200x200 | 100x100 | 50x50 |
| Agent nr: | Rezultat czasowy [ms] | | |
| 1 | 35,24 | 3,13 | 3,26 |
| 2 | 32,5 | 0,68 | 0,5 |
| 3 | 29,67 | 0,6 | 0,56 |
| 4 | 29,02 | 0,29 | 0,48 |
| 5 | 33,3 | 0,29 | 0,34 |
| 6 | 34,94 | 0,3 | 0,46 |
| 7 | 35,5 | 0,29 | 0,47 |
| 8 | 39,22 | 0,28 | 0,46 |
| 9 | 29,43 | 0,59 | 0,48 |
| 10 | 34,65 | 0,37 | 0,35 |
| Średnia: | **33,347** | **0,682** | **0,736** |
| Średnia -poprzedni eksperyment: | 40,81 | 5,291 | 1,398 |

Tabela Wyniki działania algorytmu JPS, środowisko 4

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Eksperyment 5.4** | | | |
| Rozmiar: | 200x200 | 100x100 | 50z50 |
| Agent nr: | Rezultat czasowy [ms] | | |
| 1 | 31,53 | 7,54 | 5,91 |
| 2 | 22,09 | 7,31 | 1,65 |
| 3 | 20,38 | 7,26 | 1,87 |
| 4 | 22,54 | 7,3 | 2,43 |
| 5 | 20,76 | 7,7 | 2,14 |
| 6 | 22,6 | 7,68 | 2,16 |
| 7 | 26,99 | 7,56 | 4,59 |
| 8 | 22,34 | 7,44 | 2,22 |
| 9 | 26,96 | 7,61 | 2,15 |
| 10 | 22,57 | 7,44 | 2,14 |
| Średnia: | **23,876** | **7,484** | **2,726** |
| Średnia -poprzedni eksperyment: | 40,09 | 11,91 | 3,501 |

# Podsumowanie i wnioski

Celem pracy było dokonanie analizy technik nawigacji stosowanych w grach komputerowych. Powszechnie stosowanym algorytmem do nawigacji postaci jest algorytm A\*. Wykorzystana biblioteka pomogła w analizie wydajności tego algorytmu ze względu na stosowaną funkcję heurystyczną. Dodatkowo dokonano implementacji algorytmu JPS przyśpieszającej działanie wyszukiwania ścieżki.

Cele pracy zostały zrealizowane. Na potrzeby analizy w zostały przeprowadzone pomiary czasu wykonania algorytmu oraz liczby odwiedzonych węzłów w grafie. Badanie te zostały przeprowadzony na czterech różnych mapach. Mapy te różniły się w swoje strukturze. Pierwsze z nich posiadały mniej skomplikowaną strukturę, a ostatnia miała formę labiryntu. Dodatkowo obszar poszukiwań dla każdej mapy był zwiększany z rozmiaru 50x50 do 100x100 oraz następnie do 200x200.

Rozwój gier komputerowych powoduje, że twórcy dostarczają graczom rozmaite światy rozgrywki. Światy te mogą być zróżnicowane pod względem struktury oraz wielkości. Z reguły światy te zawierają postacie sterowane przez komputer. Postacie te wyposażone są moduł nawigacyjny zawierający algorytm odnajdujący ścieżkę. Dzięki niemu są one w stanie poruszać się po mapie. Taki algorytm jest zwykle algorytmem heurystycznym. Warto zatem dokonać analizy światów rozgrywki i wybrać dla każdego z nich najlepszą heurystykę pod względem czasu wykonania. W branży gier komputerowych niezwykle popularny jest algorytm A\*, ze względu na szybkość oraz duże możliwości optymalizacyjne.

Badania nad heurystykami wykazały, że dla map posiadających prostą strukturę i niewielkie rozmiary najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie heurystyki euklidesowej. Uzyskuje ona najmniejszy czas przeznaczony na odnalezienie ścieżki. Odnośnie skryptów modyfikujących, które poprawiają jakość ścieżek, warto wspomnieć o tym, że dla map o prostej strukturze narzut czasowy związany z zastosowaniem tych skryptów nie jest wysoki (od 0,2[ms] do 3[ms]). Jednak w przypadku map o dużych rozmiarach (200x200) zastosowanie skryptu modyfikującego obciążyło obliczeniowo heurystykę euklidesową aż o 15[ms]. Podczas gdy obciążenie czasowe heurystyki diagonalnej Manhattan wyniosło zaledwie 5[ms]. W tym przypadku programista powinien się zastanowić nad wyborem heurystyki, ponieważ dla większych map obciążenie czasowe heurystyki euklidesowej może spowodować spadek efektywności algorytmu na korzyść jednej z pozostałych heurystyk.

Dalsza część badań dotyczyła map o złożonej strukturze (np. mapa w kształcie labiryntu) . Wyniki badań wykazały, że dla małych i średnich map zarówno heurystyka euklidesowa jak i diagonalna Manhattan uzyskują podobne wyniki czasowe oraz przetwarzają zbliżoną liczbę węzłów w grafie. W tym przypadku narzut czasowy spowodowany wykorzystaniem skryptów modyfikujących spowolnił wykonanie wyżej wymienionych heurystyk od 0,3[ms] do 3[ms]. Natomiast heurystyka Manhattan jak do tego pory uzyskała najgorszy rezultat czasowy, co więcej narzut wynikający z zastosowania skryptów wyniósł, aż 20[ms]. W przypadku map o dużych rozmiarach zdecydowanie najlepiej zastosować heurystykę diagonalną Manhattan. Uzyskała ona najkrótszy czas obliczeń. Zastosowanie skryptów modyfikujących, co prawda spowolniło czas wykonania algorytmu, jednak mimo to algorytm wykonał się najszybciej.

Ostatni eksperyment badawczy wykazał, że zastosowanie optymalizacji JPS przyśpiesza wykonanie algorytmu od 7% do 80%. Rozrzut przyśpieszenia wynika z tego, że dla małych map było ono niewielkie. Natomiast w przypadku dużych map wynosiło ono około 50%. Interesującym faktem jest, że przyśpieszenie równe 80% zostało zanotowane dla jednej z map o skomplikowanej strukturze. Struktura ta była o tyle specyficzna, że posiadała rozległą przestrzeń. Dzięki czemu algorytm JPS mógł wykonać duże „skoki” na mapie pomijając duże obszary, tym samym wykluczając je z dalszej analizy. Podsumowując optymalizacja przyniosła bardzo dobre efekty i warto podjąć się implementacji algorytmu JPS, który przyśpieszy proces nawigacji postaci, co jest bardziej odczuwalne w przypadku dużych map.

Zagadnienie nawigacji w grach komputerowych jest ściśle związane z problemem odnajdowania ścieżki. Problem ten przedstawiono na łamach tej pracy. Badania wykazały, że warto zwrócić uwagę, na to czy wybrane rozwiązanie będzie efektywne. Rozwiązania zajmujące długi okres czasu są nie do przyjęcia przy obecnym poziomie gier komputerowych. Gracz jako odbiorca może szybko się zniechęcić grą, w której system nawigacji postaci działa wolno, co może rzutować na porażkę danej gry komputerowej. Na efektywność rozwiązania mają wpływ czynniki takie jak: rozmiar i poziom skomplikowania mapy, zastosowana funkcja heurystyczna oraz dodatkowe przetwarzanie drogi mające na celu poprawienie jej jakości (np. wygładzanie ścieżek). Istotnym elementem systemu nawigacji jest jego optymalizacja, która może znacznie przyśpieszyć czas wyszukiwania ścieżki.

# Bibliografia