



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

KATEDRA INFORMATYKI

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Koordinacja ruchu pojazdów na skrzyżowaniu dróg wielopasmowych
algorytmem planowania wielowariantowego

Autor:
Kierunek studiów:
Opiekun pracy:

Piotr Kala
Informatyka
dr inż. Wojciech Turek

Kraków, 2016

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „ Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....

SKŁADAM SZCZEGÓLNE PODZIĘKOWANIA MOJEMU
PROMOTOROWI, DR HAB INŻ. ?????,
PROFESOROWI NADZWYCZAJNEMU AGH ZA
ŻYCZLIWOŚĆ, CENNE UWAGI MERYTORYCZNE,
WSZECHESTRONNĄ POMOC ORAZ POŚWIĘCONY
CZAS.

Spis treści

1	Wstęp	7
1.1	Podrozdział	7
1.2	Podrozdział	7
1.3	Podrozdział	8
2	Istniejące rozwiązania w zakresie planowania ruchu i koordynacji ruchu na skrzyżowaniach	9
2.1	Planowanie ruchu na skrzyżowaniach	9
2.2	Planowanie ruchu przy użyciu świateł drogowych	11
2.3	Planowanie ruchu bez sygnalizacji świetlnej	13
2.4	Użycie algorytmu A* do planowania ruchu	14
2.5	Modyfikacje A*	16
3	Teza	18
3.1	Podrozdział	18
3.2	Podrozdział	19
3.3	Podrozdział	19
4	Implementacja	20
4.1	Opis modelu danych do reprezentacji skrzyżowań	20
4.2	Zmodyfikowany algorytm A*	21
4.3	Stan w opracowanym rozwiązaniu dla algorytmu A*	22
4.4	Unikanie kolizji	23

4.5	Format danych wejściowych	26
4.6	Funkcja heurystyki	26
4.7	Reprezentacja graficzna wyników	30
5	Wyniki	33
5.1	Podrozdział	33
5.2	Podrozdział	33
5.3	Podrozdział	34
6	Wnioski	35
6.1	Podrozdział	35
6.2	Podrozdział	35
6.3	Podrozdział	36
	Spis rysunków	37
	List of Algorithms	37
	Bibliography	38

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

1.2 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique ne-

que. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

1.3 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Rozdział 2

Istniejące rozwiązania w zakresie planowania ruchu i koordynacji ruchu na skrzyżowaniach

2.1 Planowanie ruchu na skrzyżowaniach

Cel - lista wymagań i cech mojego rozwiązania - tego nie będzie w treści

- Zastosowanie algorytmu A* do zaplanowania ruchu na skrzyżowaniach
- Brak świateł powinno przyspieszyć ruch na skrzyżowaniach - auta nie czekają na światło pomarańczowym
- Rozwiązanie uwzględnia unikanie kolizji
- A* powinien szybciej zaplanować drogę niż np. Dijkstra
- W rozwiązaniu zapewnione jest bezpieczeństwo - nie dochodzi do kolizji
- Rozwiązanie koordynuje ruch globalnie

Planowanie ruchu zawsze wiąże się z rozmiarem problemu. Dla koordynacji ruchu na skrzyżowaniach rozmiarem problemu jest rozmiar dróg, ich liczba oraz liczba przecięć mię-

dzy nimi, a także parametry pojazdów. Z planowaniem ruchu wiąże się trudność jaką jest szybkość zmian w środowisku. W przypadku nie zastosowania się pojazdu do planu, algorytm musi natychmiast wyliczyć poprawiony plan. Z tego względu algorytm nie powinien zajmować dużo czasu. Algorytmy heurystyczne są najczęściej stosowane w często zmieniających się środowiskach.

Często stosowany algorytmem do znajdowania najkrótszej ścieżki w grafie jest algorytm Dijkstry. O rzędzie złożoności algorytmu decyduje implementacja kolejki. W przypadku implementacji kolejki poprzez kopiec złożoność algortmu to:

$$O(E + V \log V)$$

gdzie E to liczba krawędzi grafu, a V liczba wierzchołków grafu.

Algorytmem heurystycznym stosowanym do szukania najkrótszej ścieżki jest Algorytm A^* . Złożoność czasowa algorytmu jest zależna od zastosowanej funkcji heurystyki. Jeśli funkcja heurystyki spełnia następujący warunek:

$$|h(x) - h^*(x)| = O(\log h^*(x))$$

gdzie h^* jest optymalną heurystyką - liczba przeszukanych węzłów rośnie wielomianowo w stosunku do długości rozwiązania.

W artykule [19] autorzy przedstawili algorytm A^* w celu planowania wielowymiarowego. W celu przybliżenia złożoności jako przykładowe środowisko podana została dwuwymiarowa przestrzeń kwadratowa o boku 7. Pojazdy mogą zajmować wówczas 49 pozycji oznaczonych współrzędnymi (x, y) . Dla jednego pojazdu, możliwość zajmowanych pozycji wynosi $(7 \times 7) = 49$. Dla dwóch pojazdów jest to już $(7 \times 7) \times (7 \times 7 - 1) = 2352$. Aktualny stan jest wówczas opisywany jako (x_1, y_1, x_2, y_2) . Złożoność rośnie wraz z przetrzymywaniem kolejnych informacji na temat pojazdów, czyli na przykład prędkości czy przyspieszenia. Autorzy artykułu [15] zwrócili uwagę na podział planowania na globalne i lokalne. W podejściu globalnym dla algorytmu musi być znane całe środowisko co wiąże się z dużym

obciążeniem pamięciowym - algorytm przechowuje informacje na temat stanów wszystkich pojazdów na skrzyżowaniach. W podejściu lokalnym środowisko dla pojedynczego pojazdu nie jest znane, algorytm poznaje je w czasie rzeczywistym. W przedstawionym rozwiązaniu zastosowane jest podejście globalne.

2.2 Planowanie ruchu przy użyciu świateł drogowych

Najczęściej stosowanym systemem do koordynacji ruchu na skrzyżowaniach są światła drogowe. Powodują one opóźnienia wiążące się z oczekiwaniem przy świetle pomarańczowym, które jednocześnie zapewnia bezpieczeństwo. Powstało wiele optymalizacji świateł drogowych w celu przyspieszenia ruchu na skrzyżowaniach.

W artykule [3] autorzy opisują następujące optymalizacje sygnalizacji świetlnej: *Synchronized Traffic Lights*, *Green Wave*, *Random Offset*. Synchroniczne światła drogowe oparte są o obliczane cykle oraz o klastry samochodów poruszających się po skrzyżowaniach. Klaster samochodów rusza, gdy pojawi się światło zielone. Pierwszy samochód rusza z największym przyspieszeniem, aż dojedzie do następnego skrzyżowania. Wówczas natychmiast włącza się światło czerwone i reszta samochodów w klastrze dojeżdża do skrzyżowania. Cykle są obliczane w sposób, aby opóźnienia na skrzyżowaniach były najmniejsze. Zgodnie ze zdaniem autorów, jedną z wad jest fakt, że rozwiązanie działa najlepiej dla nierealistycznych cykli. W celu usprawnienia autorzy zaproponowali strategię zielonej fali. Głównym celem tego podejścia jest to, aby duże klastry samochodów były w ruchu. W artykule, strategia zielonej fali daje lepsze efekty niż strategia synchronicznych świateł. Ostatnią przedstawioną strategią jest losowa zmiana świateł przed skrzyżowaniami. W przeciwieństwie do poprzednich strategii - światła na skrzyżowaniach nie przełączają się jednocześnie. Użycie tej strategii powoduje powstawanie dużych klastrow samochodów na niektórych drogach i szybki przepływ na innych. Globalnie strategia zielonej falii przynosiła najlepsze efekty. Przedstawione rozwiązania muszą jednak stosować światło w celu utrzymania bezpieczeństwa co powoduje opóźnienia na każdym skrzyżowaniu.

Autorzy artykułu [2] opisują koordynację ruchu przy użyciu algorytmu 'REAL TIME QUEUE LENGTH ESTIMATION: THE APTTC ALGORITHM'. Koordynacja ta działa przy użyciu tablicy sensorów fotoelektrycznych rozmieszczonych w topologii. Algorytm w

zależności od danych i estymacji kolejek odpowiednio steruje sygnalizacją świetlną w celu uniknięcia opóźnień. Algorytm został uruchomiony w mieście Chennai w Indiach, gdzie wystymowane zostały długości kolejek aut na drogach poprzez zamontowane sensory na każdy dzień tygodnia. Rozwiązanie jest jednak zaprojektowane do działania na jednym skrzyżowaniu oraz nie eliminuje opóźnień spowodowanych światłem pomarańczowym. Co więcej, w rozwiązaniu konieczne jest montowanie sensorów na drogach.

W artykule [5] opisane zostało kierowanie ruchem drogowym na jednym skrzyżowaniu poprzez optymalizację kolejek. W rozwiązaniu brane pod uwagę są takie dane jak: średni czas oczekiwania, średnia długość kolejki, najgorszy czas oczekiwania. Istnieje także możliwość przekazania parametrów odpowiadających za maksymalny czas trwania światła czerwonego oraz zielonego. Wynikiem rozwiązania jest schemat zmiany światel, który liczony jest za pomocą funkcji obiektowych na podstawie długości kolejek. W rozwiązaniu pominięty został element bezpieczeństwa jakim jest światło pomarańczowe. Rozwiązanie zostało pokazane także na jednym skrzyżowaniu, a nie na całej sieci skrzyżowań.

Autorzy artykułu [14] przedstawili system kontroli światel i przepływu pojazdów na sieciach drogowych. Rozwiązanie stosowane jest dla całych sieci skrzyżowań. Autorzy opierają się o krótkie prognozy ruchu i na ich podstawie liczą długość trwania światła zielonego. Klasyczne rozwiązania działają na wcześniej obliczonych danych oraz działają we wcześniej określonych miejscach największego ruchu. Takie rozwiązania powodują, że zielona fala trwa dłużej niż powinna. W rozwiązaniu zastosowana jest także strategia stabilizacji, która zapewnia fakt, iż długość kolejek nie będzie zbyt długa. Zapewnione jest to przez odpowiednią długość trwania światła zielonego. W rozwiązaniu, na każdym ze skrzyżowań, samochody będą tracić czas na świetle pomarańczowym, które w rozwiązaniu jest konieczne, aby było ono bezpieczne. Ruch jest także optymalizowany dla sytuacji "średnich", które tak na prawdę nigdy nie występują. Wynikiem tego zjawiska jest fakt, że optymalizacja nie jest nigdy stosowana dla prawdziwej, aktualnej sytuacji.

Zarządzanie światłami za pomocą komunikacji pojazdów między sobą [9]

Wszystkie auta muszą być wyposażone w:

- Urządzenia DSRC
- Tą samą wersję mapy
- GPS z dokładnością do pasa na którym są

Sieć bezprzewodowa w każdym z samochodów musi być niezawodna

Krytyka

Rozwiązanie w porównaniu do mojego jest kosztowne, jeżeli chodzi o wyposażenie. Jest ono możliwe także tylko wtedy kiedy wszystkie auta są odpowiednio wyposażone i sprawne.

2.3 Planowanie ruchu bez sygnalizacji świetlnej

W celu uniknięcia użycia świateł drogowych istnieją także rozwiązania z wykorzystaniem algorytmów znajdujących najkrótszą ścieżkę. W artykule [18] autorzy wykorzystali algorytm Dijkstry do zarządzania ruchem przy użyciu automatycznie prowadzonych pojazdów. Autorzy przedstawili zarządzanie ruchem pojazdów w magazynie chcąc ogarniczyć czas transportu. Algorytm Dijkstry wskazuje najkrótszą ścieżkę od jednego pojazdu do następnego. W przypadku, gdy na ścieżce znajdzie się przeszkoda - algorytm wylicza ścieżkę od nowa. Zastosowanie algorytmu Dijkstry do koordynacji ruchu na skrzyżowaniach jest zbyt złożone. Ponadto unikanie kolizji jest wykonane poprzez ponowne wyliczanie najkrótszej ścieżki, zamiast unikania ich na bieżąco.

Autorzy artykułu [12] przedstawiają ulepszoną wersję algorytmu Dijkstry w celu znalezienia najkrótszej ścieżki. Do algorytmu Dijkstry wprowadzona została funkcja dzięki której ignorowane są nieistotne wierzchołki w grafie. Dzięki tej modyfikacji algorytm jest 43%-76% szybszy. Rozwiązanie jest nadal zbyt złożone by zastosować go do koordynacji ruchu na skrzyżowaniach. W rozwiązaniu nie ma także uwzględnionego unikania kolizji.

W artykule [1] przedstawione zostało planowanie ruchu przy użyciu automatycznie prowadzonych pojazdów wraz z unikaniem kolizji. W rozwiązaniu każdy robot indywidualnie liczy najkrótszą dla siebie ścieżkę. Następnie dane tras są wymieniane pomiędzy robotami w celu ustalenia finalnego rozwiązania. Szukanie ścieżki jest wykonywane przy użyciu algorytmu Dijkstry. W celu unikania kolizji dla każdego pojazdu liczona jest funkcja kary. Waga kary jest większa tak długo, aż zostanie znaleziona bezkolizyjna ścieżka. Złożoność rozwiązania jest zbyt duża by zastosować je dla skrzyżowań. Wymienianie danych pomiędzy pojazdami oraz podany w rozwiązaniu sposób rozwiązywania kolizji nie znajduje zastosowania w koordynowaniu ruchu na skrzyżowaniach.

W patencie [11] autorzy przedstawili centralnie zaplanowany, generalny system przydzielający trasy w celu utrzymania optymalnego ruchu. System zawiera dużą ilość komputerów zamontowanych w pojazdach w celu komunikacji między nimi poprzez sieć bezprzewodową. Do znajdowania najkrótszej ścieżki autorzy wykorzystali algorytm Dijkstry. Ścieżki liczone są przy użyciu danych dostarczanych przez komputery zamontowane w pojazdach. Celem patentu jest znalezienie drogi do celu w najkrótszym czasie poprzez omijanie zakorkowanych dróg. Nie jest to dokładne zaplanowanie poruszania się pojazdu wraz z unikaniem kolizji.

Autorzy patentu [4] opisali system do kontroli ruchu i unikania kolizji na autostradach. Pod uwagę wzięte zostały zmiany pasów, unikanie kolizji oraz kontrolowanie trasy pojazdu. Unikanie kolizji zostało zapewnione poprzez komunikację przez transmitters radiowe oraz radioodbiorniki zamontowane w każdym z pojazdów. Rozwiązanie znajduje zastosowanie na autostradach, unikanie kolizji ma miejsce na równoległych pasach. Tego podejścia nie da się zastosować jeżeli chodzi o koordynację ruchu na skrzyżowaniach.

W artykule [13] przedstawiony został system dynamicznego planowania ruchu do nawigacji samochodów przy użyciu 'virus genetic algorithms'. Autorzy zaproponowali algorytm genetyczny, który jest bardziej wydajny od algorytmu A* czy algorytmu Dijkstry. W rozwiązaniu zastosowana jest strategia infekcji wirusowej, dzięki czemu omijane są korki na drogach. Rozwiązanie jest zaprojektowane do wskazania najlepszej trasy, nie jest to dokładne zaplanowanie ruchu samochodów wraz z wymijaniem kolizji.

2.4 Użycie algorytmu A* do planowania ruchu

Algorytm A* jest często stosowany do szukania najkrótszej ścieżki oraz planowania ruchu. W artykule [6] omówiona została optymalność tego algorytmu oraz funkcja heurystyki. A* jest algorytmem heurystycznym, który znajduje najkrótszą ścieżkę w grafie ważonym z dowolnego podanego wierzchołka do wierzchołka celu. Wierzchołkiem celu jest wierzchołek spełniający zadane warunki wygranej. W artykule przedstawione zostały poprzednie próby udowodnienia optymalności algorytmu. Autorzy przeprowadzili także własny dowód na optymalność algorytmu A*. Dowód polega na fakcie, iż kiedy funkcja heurystyki nigdy nie przeszacowuje wtedy algorytm A* jest optymalny. Dla grafu, algorytm A* od zadanego wierzchołka startowego tworzy ścieżkę, wybierając niezbadany sąsiedni wierzchołek. Wy-

biera go w sposób aby minimalizować funkcję:

$$f(x) = g(x) + h(x)$$

gdzie:

$g(x)$ - suma wag krawędzi od wierzchołka startowego do wierzchołka x $h(x)$ - przewidywana przez funkcję heurystyki suma wag z wierzchołka x do wierzchołka docelowego

Omówienie i porównanie algorytmów stosowanych do planowania drogi na podstawie artykułu [7]

- Dijkstra's Algorithm
- Priority Queues
- Bidirectional Search
- A*

Planowanie ruchu za pomocą zmodyfikowanego algorytmu A* na podstawie artykułu [16]

- Opis sposobu wprowadzenia zmodyfikowanego algorytmu A* do koordynowania ruchu na skrzyżowaniach
- Wady, zalety i ograniczenia

Planowanie ruchu za pomocą wielostanowego algorytmu A* oraz Wavefront na podstawie artykułu [19]

- Omówienie zastosowania tych dwóch algorytmów do planowania ruchu

Krytyka

- Złożoność użycia wielostanowego A* jest już duża do planowania ruchu na skrzyżowaniach
- dodając do tego wavefront złożoność jest jeszcze większa.

Omówienie przykładu użycia Multi-Entity A* na podstawie artykułu [19]

- Przytoczenie przykładu
- Omówienie wad, zalet i ograniczeń

Omówienie złożoności Multi-Entity A* na powyższym przykładzie.

- Złożoność jest zależna od liczby stanów w A^*
- Obliczenie złożoności i pokazania jak ona rośnie

Autorzy artykułu [8] zaproponowali użycie zmodyfikowanego algorytmu A^* w celu bezpieczniejszej nawigacji dla robotów

- Modyfikacja algorytmu polega na wzięciu pod uwagę rozmiaru robota w celu generowania przestrzeni ścieżki i w celu uniknięcia ostrych skrętów
- Do algorytmu A^* przekazywany jest stan początkowy i cel jaki robot chce osiągnąć
- Autorzy zmodyfikowali algorytm A^* tak aby unikał niebezpiecznych sytuacji, które mogą powodować kolizje

Krytyka

Algorytm jest liczony dla jednego robota - u mnie brane są pod uwagę wszystkie pojazdy na drogach

2.5 Modyfikacje A^*

Cel podrozdziału

Przytoczenie modyfikacji algorytmu A^* w literaturze. Wskazanie wad takich modyfikacji w porównaniu do mojej

Autorzy artykułu [19] przedstawili wielostanowy A^*

- Ścieżka powinna być rozumiana jako sekwencja stanów
- Autorzy zastosowali modyfikację wraz z algorytmem Wavefront

Krytyka

- Zastosowanie tych dwóch algorytmów do rozwiązania skrzyżowań wiąże się ze zbyt dużą złożonością

Opis modyfikacji A^* w artykule [16]

- Prezentacja szybkiego algorytmu A^* w celu nawigacji robota

- Autorzy użyli innych struktur w implementacji algorytmu A^* co daje lepsze wyniki **Krytyka**
- Rozwiązanie nie może być zastosowane do koordynacji ruchu na skrzyżowaniach - jest ono zaprojektowane do znalezienia najkrótszej ścieżki dla pojedynczego pojazdu

W artykule [17] autorzy zaproponowali genetyczny algorytm oparty na zmodyfikowanym algorytmie A^* w celu optymalizacji znajdowania ścieżek dla wielu obiektów

- Znajdowanie ścieżek dla robotów z wymijaniem przeszkód
- Autorzy zaproponowali modyfikację A^* w celu znalezienia suboptymalnej ścieżki w celu ustalenia początkowego rozwiązania dla algorytmu genetycznego.
- Modyfikacja została wykonana, aby A^* nie wyszukiwał najkrótszej ścieżki na rzecz wydajności

Krytyka

- Nie jest to jednak Algorytm A^* który opiera się na stanie wszystkich pojazdów w środowisku
- polega on na znalezieniu ścieżki dla jednego robota.

Rozdział 3

Teza

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

3.1 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus,

aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

3.2 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

3.3 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Rozdział 4

Implementacja

4.1 Opis modelu danych do reprezentacji skrzyżowań

Drogi są reprezentowane w sposób dyskretny. Każda droga zaczyna się w pozycji 1 i rośnie wraz z jej rozmiarem.

Samochody mogą poruszać się w następujących kierunkach:

- z północy na południe
- z południa na północ
- ze wschodu na zachód
- z zachodu na wschód

Powyższe ograniczenie nie wpływa na algorytm lub wyniki. Dodanie funkcjonalności wymagałoby dodania możliwości zmiany numeru drogi przez samochód, co nie wpływa na liczbę stanów, a co za tym idzie długość wykonywania algorytmu.

Droga jest reprezentowana poprzez następujące dane:

- unikatowy numer drogi
- rozmiar drogi
- informacja o przecięciach z innymi drogami

- kierunek w którym samochód się porusza na drodze (z północy na południe, czy z południa na północ lub z zachodu na wschód czy ze wschodu na zachód)

Samochody na drogach opisują następujące dane:

- unikatowy numer samochodu
- unikatowy numer drogi, na której pojazd się znajduje
- numer pozycji na drodze, na której samochód się znajduje
- prędkość początkowa
- numer pozycji docelowej na drodze - punkt za ostatnim skrzyżowaniem

Samochody poruszają się po drogach w krokach czasowych. Prędkość samochodu wyrażana jest w liczbie odcinków drogi w jednym kroku czasowym.

W Systemie można wybrać maksymalne przyspieszenia ujemne oraz dodatnie samochodów z następujących możliwości $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$. Oznacza to, że w następnym stanie pojazd może przyspieszyć o 1 lub 2 odcinki drogi na jeden krok czasowy. Dla wartości 0 pojazd utrzymuje swoją prędkość. Dla wartości ujemnych pojazd zwalnia o 1 lub 2 odcinki drogi na jeden kroku czasowym. Ilość możliwych dla samochodu przyspieszeń znacznie wpływa na złożoność czasową algorytmu, z tego względu, że wraz ze wzrostem ilości możliwych przyspieszeń rośnie ilość możliwości stanów sąsiednich dla samochodu, przez które algorytm musi przejść.

Do modelu przekazać należy także maksymalną prędkość, którą wszystkie samochody mogą osiągnąć oraz parametr prędkości, czyli liczba pozycji będąca dystansem trzymanym między pojazdami.

4.2 Zmodyfikowany algorytm A*

Zaprezentowany w tej pracy zmodyfikowanym algorytmu A* jest oparty na stanach, gdzie pojedynczym stanem jest rozłożenie samochodów na drogach wraz z ich prędkościami.

Algorytm zaczynając od zadanego stanu początkowego analizuje możliwe stany sąsiednie

i wybiera optymalną ścieżkę kierując się funkcją heurystyki. Ścieżka prowadzi do określonego celu.

W przypadku opracowanego rozwiązania, celem jest przekroczenie przez wszystkie samochody ostatniego skrzyżowania na drogach, na których się znajdują.

Zrealizowany Algorytm A* jest generyczny. Do algorytmu przekazujemy klasę reprezentującą dowolny stan. Klasa musi implementować metodę 'neighbours', która zwraca stany sąsiednie dla danej instancji stanu.

Do algorytmu przekazywana jest także funkcja heurystyki, zależna od danych danego stanu.

4.3 Stan w opracowanym rozwiązaniu dla algorytmu A*

Stan w modyfikacji algorytmu A* przedstawionej w tej pracy opisuje stan wszystkich samochodów na skrzyżowaniach wraz z ich prędkościami.

Zgodnie z wcześniej generycznością wierzchołek jest obiektem klasy, który implementuje metodę 'neighbours'. Metoda generuje wszystkie stany sąsiednie dla aktualnego stanu. Dla przykładu, dla ustawień przyspieszeń $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$, dla każdego z aut na skrzyżowaniu generowane są stany z jego prędkością dodając wartości przyspieszeń. Pomijane są stany, w których prędkość samochodu byłaby ujemna.

Przykładowo jest pojazd z prędkością 1 pozycji na krok czasowy znajdujący się na 1 pozycji na drodze numer 1. Dla pojazdu rozpatrywane są następujące stany:

- 1) Dodając przyspieszenie o wartości 0: 2 pozycja na drodze numer jeden z prędkością 1
- 2) Dodając przyspieszenie o wartości 1: 3 pozycja na drodze numer jeden z prędkością 2
- 3) Dodając przyspieszenie o wartości 2: 4 pozycja na drodze numer jeden z prędkością 3
- 4) Dodając przyspieszenie o wartości -1: 1 pozycja na drodze numer jeden z prędkością 0
- 5) Dodając przyspieszenie o wartości -2: Stan jest eliminowany, ponieważ prędkość byłaby

ujemna

Dodatkowo w przypadku ustawienia maksymalnej prędkości równej 2 pozycje na jeden krok czasowy - możliwość nr 3) także zostałaby wyeliminowana.

W metodzie usuwane są także stany powodujące kolizje, co będzie opisane w następnym rozdziale.

4.4 Unikanie kolizji

Koniecznym elementem w planowaniu ruchu jest unikanie kolizji.

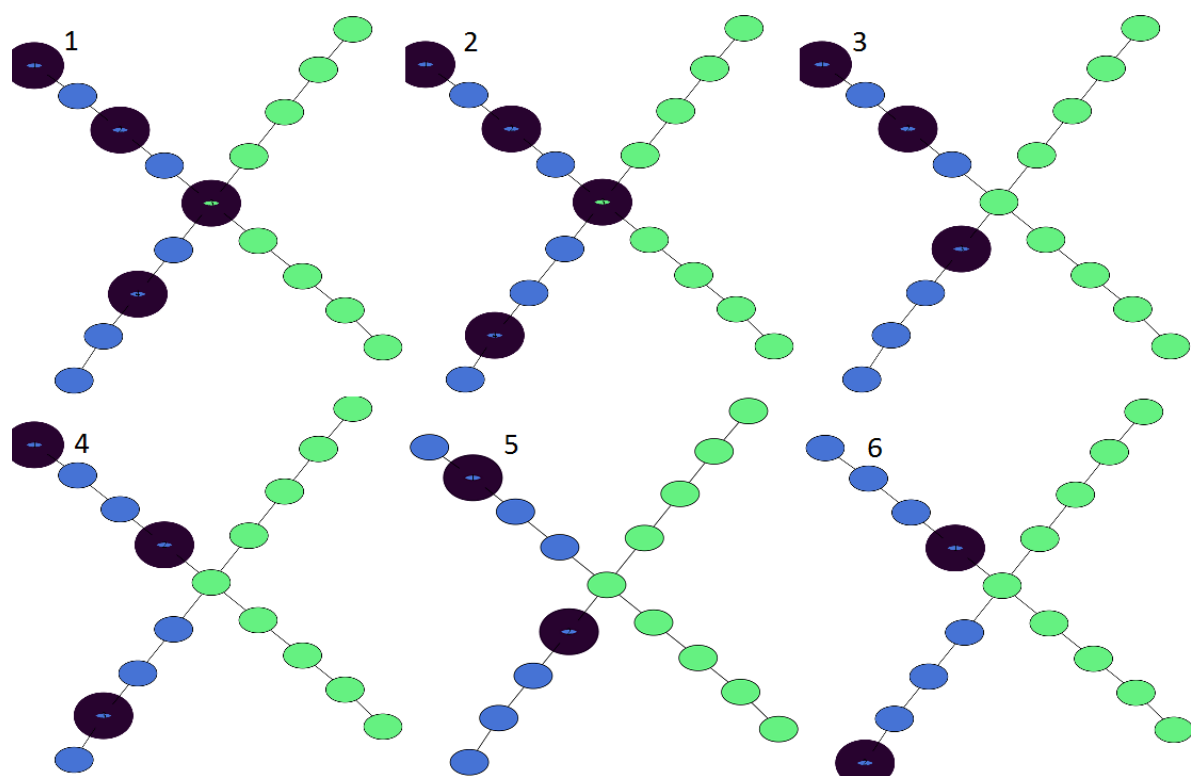
Unikanie kolizji zostało podzielone na dwa etapy

- Unikanie kolizji aut poruszających się po tym samym pasie
- Unikanie kolizji na skrzyżowaniach

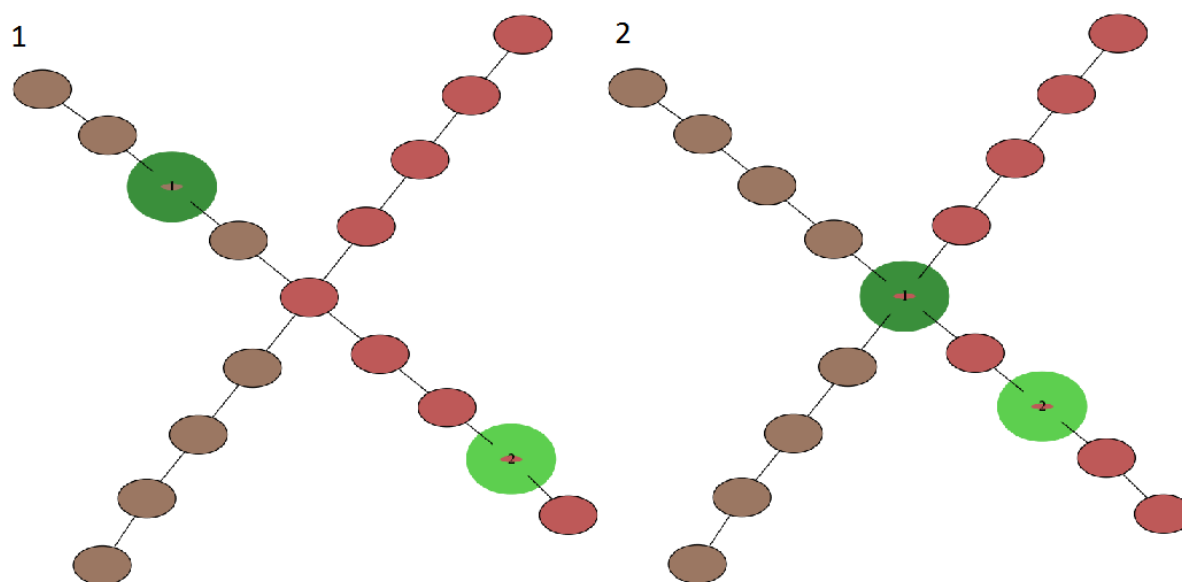
Implementacja unikania kolizji pojazdów na tym samym pasie polega na policzeniu obszarów dla samochodów znajdujących się na tym samym pasie, który będą one obejmowały w jednym kroku czasowym wraz z uwzględnieniem parametru bezpieczeństwa.

Jeżeli obszary dwóch samochodów na jednym pasie pokrywają się - taki stan jest usuwany i wówczas metoda 'neighbours' nie zwróci go jako stanu sąsiedniego.

Na rysunku 4.1 przedstawiony jest przykład unikania kolizji dla samochodów poruszających się jednym pasem. Przykład przedstawiony jest z parametrem bezpieczeństwa równym jeden. Samochody, mając przed sobą inny pojazd, czekają aż będzie dla nich miejsce.



Rysunek 4.1: Unikani kolizji na pasie



Rysunek 4.2: Unikanie kolizji na skrzyżowaniu

Unikanie kolizji na skrzyżowaniach polega na eliminacji stanów, w których conajmniej dwa auta przekroczyły w jednym kroku czasowym to samo skrzyżowanie. Metoda 'neighbors' także nie zwróci takich stanów.

Na rysunku 4.2 przedstawiony jest przykład unikania kolizji dla dwóch samochodów na prostym skrzyżowaniu. Samochód z numerem jeden przyspieszył o dwie jednostki i zmienił pozycję o dwie jednostki do przodu. Samochód z numerem dwa przyspieszył natomiast o jedną jednostkę i zmienił pozycję o jedną jednostkę do przodu w celu uniknięcia kolizji.

W algorytmie usunięty został stan, w którym oba pojazdy przyspieszyły o dwie jednostki. Został natomiast wybrany stan gdzie jeden z samochodów przyspieszył o dwie jednostki, a drugi o jedną jednostką, ponieważ prowadzi to, do najszybszego opuszczenia skrzyżowania przez pojazdy.

4.5 Format danych wejściowych

Zaprezentowane rozwiązanie potrzebuje dane na temat skrzyżowań, samochodów oraz ograniczeń parametrów samochodów.

Skrzyżowania reprezentowane są w pliku CSV posiadającym atrybuty: numer drogi, rozmiar, przecięcia, kierunek. Przecięcie reprezentowane są przez dwie liczby. Na przykład 5 7 - oznacza, że droga przecina drogę o numerze 5 w pozycji 7. Kolejne przecięcia oddzielane są średnikami.

Stany samochodów zapisane są w pliku CSV posiadającym atrybuty: numer samochodu, numer drogi samochodu, pozycję na drodze, pozycję końcową.

Ograniczenia przechowywane są w osobnym pliku CSV posiadającym atrybuty: maksymalna prędkość, parametr bezpieczeństwa, wartości przyspieszeń.

4.6 Funkcja heurystyki

Funkcja heurystyki dla algorytmu A* jest to suma kroków czasowych, po których wszystkie auta przekroczą ostatnie skrzyżowanie - czyli osiągną cel. Funkcja liczona jest, przy założeniu, że wszystkie samochody maksymalnie przyspieszają.

W opracowanym rozwiązaniu każdy samochód ma wyznaczoną pozycję, na której musi się znaleźć lub ją przekroczyć (jest to pozycja za ostatnim skrzyżowaniem). Poniżej przedstawiony jest przykład liczonej funkcji heurystyki dla dwóch stanów opisujących położenia samochodów na skrzyżowaniu.

Numer pojazdu	Numer drogi	Pozycja na drodze	Prędkość	Pozycja końcowa
1	1	1	1	6
2	2	1	1	6
3	3	1	1	6
4	4	1	1	6

Tabela 4.1: Stan 1

Numer pojazdu	Numer drogi	Pozycja na drodze	Prędkość	Pozycja końcowa
1	1	1	0	6
2	2	1	1	6
3	3	1	0	6
4	4	1	1	6

Tabela 4.2: Stan 2

Dla stanu opisanego w tabeli 4.1 funkcja heurystyki jest liczona następująco:

Dla pojazdów 1-4:

1 krok czasowy:

$\text{prędkość} = (\text{prędkość})_1 + (\text{maksymalne przyspieszenie})_1 = 2$

$\text{pozycja} = (\text{pozycja})_1 + (\text{prędkość})_2 = 3$

Pojazd znajduje się na pozycji 3, która jest przed pozycją końcową 6 - liczony jest kolejny krok czasowy.

2 krok czasowy:

$\text{prędkość} = (\text{prędkość})_2 + (\text{maksymalne przyspieszenie})_1 = 3$

$\text{pozycja} = (\text{pozycja})_3 + (\text{prędkość})_3 = 6$

Pojazd znajduje się na pozycji 6, która jest równa pozycji końcowej.

Razem 2 kroki czasowe dla jednego pojazdu. Dla wszystkich czterech pojazdów - 8 kroków czasowych.

Dla stanu opisanego w tabeli 4.2 funkcja heurystyki jest liczona następująco:

Dla pojazdów 1 i 3

1 krok czasowy:

$$\text{prędkość} = (\text{prędkość}) 0 + (\text{maksymalne przyspieszenie}) 1 = 1$$

$$\text{pozycja} = (\text{pozycja}) 1 + (\text{prędkość}) 1 = 2$$

Pojazd znajduje się na pozycji 2, która jest przed pozycją końcową 6 - liczony jest kolejny krok czasowy.

2 krok czasowy:

$$\text{prędkość} = (\text{prędkość}) 1 + (\text{maksymalne przyspieszenie}) 1 = 2$$

$$\text{pozycja} = (\text{pozycja}) 2 + (\text{prędkość}) 2 = 4$$

Pojazd znajduje się na pozycji 4, która jest przed pozycją końcową 6 - liczony jest kolejny krok czasowy.

3 krok czasowy:

$$\text{prędkość} = (\text{prędkość}) 2 + (\text{maksymalne przyspieszenie}) 1 = 3$$

$$\text{pozycja} = (\text{pozycja}) 4 + (\text{prędkość}) 3 = 7$$

Pojazd znajduje się na pozycji 7, która jest za pozycją końcową 6.

Razem 3 kroki czasowe dla jednego pojazdu. Dla pojazdów 1 i 3 - 6 kroków czasowych.

Dla pojazdów 2 i 4:

1 krok czasowy:

$$\text{prędkość} = (\text{prędkość}) 1 + (\text{maksymalne przyspieszenie}) 1 = 2$$

$$\text{pozycja} = (\text{pozycja}) 1 + (\text{prędkość}) 2 = 3$$

Pojazd znajduje się na pozycji 3, która jest przed pozycją końcową 6 - liczony jest kolejny krok czasowy.

2 krok czasowy:

$$\text{prędkość} = (\text{prędkość}) 2 + (\text{maksymalne przyspieszenie}) 1 = 3$$

$$\text{pozycja} = (\text{pozycja}) 3 + (\text{prędkość}) 3 = 6$$

Pojazd znajduje się na pozycji 6, która jest równa pozycji końcowej.

Razem 2 kroki czasowe dla jednego pojazdu. Dla pojazdów 2 i 4 - 4 kroki czasowe.

Razem dla wszystkich pojazdów - 10 kroków czasowych.

Podsumowując, dla stanu opisanego w tabeli 4.1 funkcja heurystyki zwróci wartość 8 (osiem kroków czasowych), a dla stanu opisanego w tabeli 4.2 funkcja heurystyki zwróci wartość 10 (dziesięć kroków czasowych). Algorytm wybierze wartość minimalną - czyli wybierze stan opisany w tabeli 4.1.

4.7 Reprezentacja graficzna wyników

W celu graficznej reprezentacji wyników zaimplementowany został moduł graficzny.

Działanie modułu graficznego oparte jest na rysowaniu grafów z wykorzystaniem biblioteki Graphviz oraz jej implementacji w języku Ruby.

Skrzyżowanie jest reprezentowane za pomocą grafu. Wierzchołkami grafu są poszczególne odcinki dróg. Krawędziami grafu są połączenia pomiędzy odcinkami.

Samochody poruszające się po tej samej drodze są zaznaczone grubszym obwodem oraz mają ten sam kolor. Samochody można rozróżnić poprzez unikatowy numer na nich napisany.

Kolejne kroki czasowe reprezentowane są poprzez następne grafy z kolejnymi ułożeniami samochodów.

Efektem końcowym jest stworzony GIF z następujących po sobie grafów przy użyciu biblioteki 'rmagick' dla języka Ruby.

Moduł graficzny wczytuje wszystkie dane wejściowe: pozycję samochodów, dane skrzyżowania oraz ograniczenia. Kolejno na wejście otrzymuje plik zawierający JSON, który reprezentuje wszystkie stany samochodów na skrzyżowaniach od momentu startu, aż do opuszczenia skrzyżowań przez wszystkie samochody. Plik powstaje w wyniku wykonania zaprezentowanego algorytmu A*.

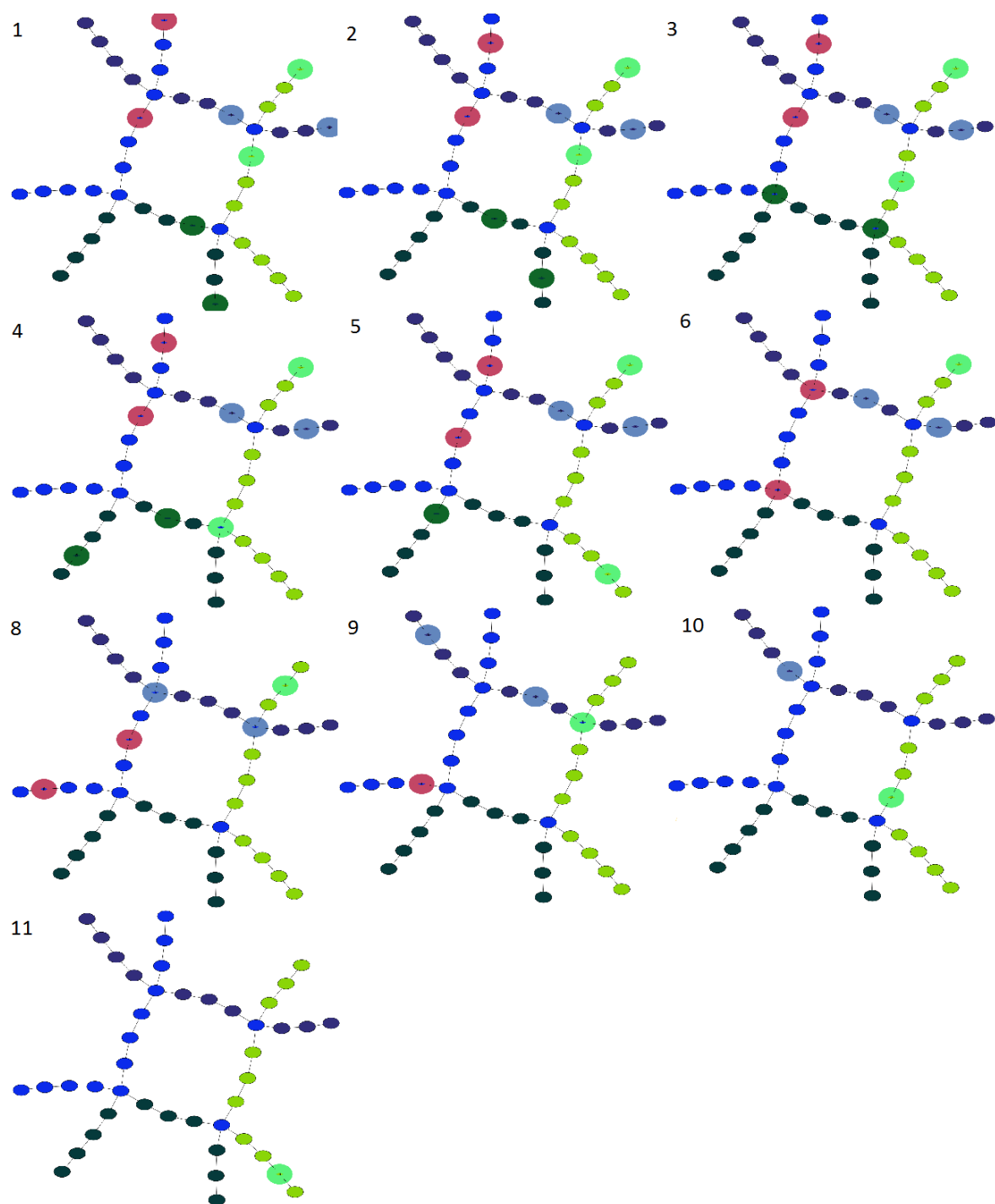
Moduł wczytując dane początkowe tworzy graf bazowy. Graf bazowy przedstawia skrzyżowanie wraz z pojazdami. Kolory dla dróg oraz samochodów są losowane oraz przetrzymywane w zbiorze tak, aby żaden z kolorów się nie powtórzył.

Następnie moduł, posiadający kolejne stany w kolejnych krokach czasowych, korzysta z gra-

fu bazowego i zmienia pozycję samochodów. Po każdym kroku czasowym zapisywane jest zdjęcie grafu z numerem kroku czasowego.

W module znajduje się także dodatkowe sprawdzanie kolizji. Jeżeli kolizja wystąpi, w danym kroku czasowym na zdjęciu dodany zostanie napis "Collision". Dzięki temu można zobaczyć prawdopodobieństwo kolizji w przypadku, gdy jeden z pojazdów nie zastosuje się do planu.

Na rysunku 4.3 zaprezentowane jest działanie modułu graficznego dla skrzyżowania czterech dróg i ośmiu pojazdów. Na 11 elemencie rysunku widać, że wszystkie samochody opuściły wszystkie skrzyżowania po 11 krokach czasowych.



Rysunek 4.3: Moduł graficzny

Rozdział 5

Wyniki

5.1 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

5.2 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique ne-

que. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

5.3 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Rozdział 6

Wnioski

6.1 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

6.2 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique ne-

que. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

6.3 Podrozdział

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Spis rysunków

4.1	Unikani kolizji na pasie	24
4.2	Unikanie kolizji na skrzyżowaniu	25
4.3	Moduł graficzny	32

List of Algorithms

Bibliografia

- [1] Ando M., Nishi T., Konishi M., Imai J.: An Autonomous Distributed Route Planning Method for Multiple Mobile Robots. In: *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 39, pp. 759–766, 2003.
- [2] Athmaraman N., Soundararajan S.: Adaptive predictive traffic timer control algorithm. In: *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*. 2005.
- [3] Brockfeld E., Barlovic R., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic. In: *Physical Review E*, vol. 64(5), p. 056132, 2001.
- [4] Broxmeyer C.: Vehicle longitudinal control and collision avoidance system for an automated highway system, 1994. URL <https://www.google.com/patents/US5369591>. US Patent 5,369,591.
- [5] De Schutter B., De Moor B.: Optimal traffic light control for a single intersection. In: *European Journal of Control*, vol. 4(3), pp. 260–276, 1998.
- [6] Dechter R., Pearl J.: Generalized best-first search strategies and the optimality of A. In: *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 32(3), pp. 505–536, 1985.
- [7] Delling D., Sanders P., Schultes D., Wagner D.: Engineering route planning algorithms. In: *Algorithmics of large and complex networks*, pp. 117–139. Springer, 2009.
- [8] ElHalawany B.M., Abdel-Kader H.M., TagEldeen A., Elsayed A.E., Nossair Z.B.: Modified A* algorithm for safer mobile robot navigation. In: *Modelling, Identification &*

- Control (ICMIC), 2013 Proceedings of International Conference on*, pp. 74–78. IEEE, 2013.
- [9] Ferreira M., Fernandes R., Conceição H., Viriyasitavat W., Tonguz O.K.: Self-organized traffic control. In: *Proceedings of the seventh ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking*, pp. 85–90. ACM, 2010.
 - [10] Fleischmann B., Gnutzmann S., Sandvoß E.: Dynamic vehicle routing based on online traffic information. In: *Transportation science*, vol. 38(4), pp. 420–433, 2004.
 - [11] Gazis D., Jaffe R., Pope W.: Optimal and stable route planning system, 1997. URL <https://www.google.com/patents/US5610821>. US Patent 5,610,821.
 - [12] Huang Y., Yi Q., Shi M.: An improved Dijkstra shortest path algorithm. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE)*, pp. 0226–0229. 2013.
 - [13] Kanoh H.: Dynamic route planning for car navigation systems using virus genetic algorithms. In: *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, vol. 11(1), pp. 65–78, 2007.
 - [14] Lämmer S., Helbing D.: Self-control of traffic lights and vehicle flows in urban road networks. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2008(04), p. P04019, 2008.
 - [15] Leena N., Saju K.: A survey on path planning techniques for autonomous mobile robots. In: *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 8, pp. 76–79, 2014.
 - [16] Muntean P.: Mobile Robot Navigation on Partially Known Maps using a Fast A Algorithm Version. In: .
 - [17] Oleiwi B.K., Hubert R., Kazem B.: Modified Genetic Algorithm based on A* algorithm of Multi objective optimization for Path Planning. In: *6th International Conference on Computer and Automation Engineering*, vol. 2, pp. 357–362. 2014.

- [18] Shaikh E.A., Dhale A.: AGV Path Planning and Obstacle Avoidance Using Dijkstra's Algorithm. In: *International Journal of Application in Engineering and Mangement (IJAIEEM)*, 2013.
- [19] Wojnicki I., Ernst S., Turek W.: A robust planning algorithm for groups of entities in discrete spaces. In: *Entropy*, vol. 17(8), pp. 5422–5436, 2015.