



**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

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>7</b>
1.1	Podrozdział . . . . .	7
1.2	Podrozdział . . . . .	7
1.3	Podrozdział . . . . .	8
<b>2</b>	<b>State of the art</b>	<b>9</b>
2.1	Planowanie ruchu na skrzyżowaniach . . . . .	9
2.2	Planowanie ruchu przy użyciu świateł drogowych . . . . .	10
2.3	Planowanie ruchu bez sygnalizacji świetlnej . . . . .	12
2.4	Użycie algorytmu A* do planowania ruchu . . . . .	14
2.5	Modyfikacje A* . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Teza</b>	<b>18</b>
3.1	Podrozdział . . . . .	18
3.2	Podrozdział . . . . .	19
3.3	Podrozdział . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Implementacja</b>	<b>20</b>
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
<b>5</b>	<b>Wyniki</b>	<b>33</b>
5.1	Podrozdział . . . . .	33
5.2	Podrozdział . . . . .	33
5.3	Podrozdział . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Wnioski</b>	<b>35</b>
6.1	Podrozdział . . . . .	35
6.2	Podrozdział . . . . .	35
6.3	Podrozdział . . . . .	36
	<b>Spis rysunków</b>	<b>37</b>
	<b>List of Algorithms</b>	<b>37</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>38</b>

# 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 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.

### **1.3 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

## State of the art

### 2.1 Planowanie ruchu na skrzyżowaniach

#### **Cel podrozdziału**

Wskazanie złożoności problemu znajdowania drogi oraz wskazania algorytmów używanych w literaturze do tego typu problemów

#### **Zależność wydajności od rozmiaru problemu**

- Metody planujące są zawsze zależne od rozmiaru problemu
- Duża złożoność powoduje stosowanie algorytmów heurystycznych
- Pokazanie złożoności na przykładowych algorytmach

#### **Szybkość zmian w środowisku uniemożliwia użycia algorytmu zajmującego dużo czasu**

- Duża złożoność problemu powoduje, że jeżeli zajdzie zmiana w środowisku, algorytm musi natychmiast wyliczyć poprawny plan
- Algorytmy heurystyczne są w stanie działać w środowisku, gdzie zmiany zachodzą szybko

#### **Rozważana klasa problemów**

- Omówienie klasy problemów planowania ruchu na skrzyżowaniach
- Omówienie modeli środowisk i wiążących się z nimi złożoności

**Zgodnie z artykułem [15] szukanie ścieżki można podzielić na planowanie globalne oraz lokalne**

- W globalnym dla algorytmu znane musi być całe środowisko
- W lokalnym dla jednego pojazdu całe środowisko jest nie znane - jest poznawane w czasie rzeczywistym
- W mojej pracy zastosowany będzie algorytm globalny

## **2.2 Planowanie ruchu przy użyciu świateł drogowych**

### **Cel podrozdziału**

Przedstawienie rozwiązań koordynujących ruch drogowy przy użyciu świateł drogowych, omówienie ich optymalizacji oraz wskazanie co w nich powoduje opóźnienie, którego w moim rozwiązaniu nie ma.

### **W artykule [3] opisane zostały optymalizacje sygnalizacji świetlnej**

- Synchronized Traffic Lights
- Green Wave
- Random Offset
  
- Która optymalizacja co wnosi
- Jak niewelowane są opóźnienia
- Która z nich daje najlepsze wyniki

### **Krytyka**

Opóźnienia i tak są spowodowane przez użycie świateł (światło pomarańczowe) - te opóźnienia nie występują w moim rozwiązaniu

**Autorzy artykułu [2] opisują koordynację ruchu przy użyciu algorytmu - 'REAL TIME QUEUE LENGTH ESTIMATION: THE APTTC ALGORITHM'**

- Sterowanie adaptacyjne
- Statystyczna optymalizacja
- Estymacja na podstawie długości dynamicznej kolejki

**Krytyka**

Rozwiązanie nie bierze pod uwagę bezpieczeństwa, które w zwykłej sygnalizacji świetlnej jest zapewnione przez światło pomarańczowe.

**Opis kierowania ruchem drogowym na jednym skrzyżowaniu. Autorzy artykułu [5] dla ułatwienia pomijają światło pomarańczowe**

- Optymalizacja świateł za pomocą dwóch podanych funkcji polegających na optymalizacji kolejek na czterech pasach

**Krytyka**

Rozwiązanie nie bierze pod uwagę bezpieczeństwa, które w zwykłej sygnalizacji świetlnej jest zapewnione przez światło pomarańczowe.

**Kontrola ruchu drogowego za pomocą świateł. Autorzy artykułu [14] zaproponowali zdecentralizowany algorytm bazujący na krótkich prognozach ruchu**

- Optymalizacja świateł za pomocą dwóch podanych funkcji polegających na optymalizacji kolejek na czterech pasach
- Liczona długość światła zielonego w celu zwolnienia kolejki na pasie
- Limitacja - Zielone światła są zapalone dłużej niż zwykle powinny

**Krytyka**

Limitacja - Ruch jest optymalizowany dla sytuacji "średnich", które tak na prawdę nigdy nie występują, przez co optymalizacja nie jest stosowana dla 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**

#### **Cel podrozdziału**

Podanie metod w literaturze do planowania drogi, koordynowania ruchu. Wskazanie wad tych rozwiązań w porównaniu do mojego.

#### **Autorzy artykułu [18] opisali znajdowanie ścieżki za pomocą algorytmu Dijkstry**

- Opisanie sposobu zastosowanie dijkstry w planowaniu ruchu
- Opisanie sposobu unikania kolizji
- Ograniczenia algorytmu

#### **Krytyka**

- Algorytm A\* jest lepszy wydajnościowy względem Dijkstry

#### **Autorzy artykułu [12] przedstawiają ulepszoną wersję algorytmu Dijkstry w celu znalezienia najkrótszej ścieżki**

- Algorytm Dijkstry ma słabą wydajność, dlatego postanowiono go zmodyfikować. Według badań przeprowadzonych przez autorów algorytm jest 42%-76% szybszy
- Autorzy wspominają o algorytmie A\*, który jest szybszy od algorytmu Dijkstry ale może skończyć w nieskończonej pętli

### **Krytyka**

- W prowadzonych przeze mnie badaniach algorytm A\* ani raz nie został wprowadzony w nieskończoną pętlę oraz jest szybszy od algorytmu Dijkstry w szukaniu ścieżki.

### **Planowanie ruchu oraz unikanie kolizji przy użyciu AGV na podstawie artykułu [1]**

- Opis zastosowanego rozwiązania
- Opis sposobu unikania kolizji
- Omówienie przykładu z użyciem AGV na podstawie artykułu

### **Krytyka**

Zastosowanie AGV jest przeznaczone dla robotów. Jest tu także komunikacja między pojazdami co wprowadza dodatkową warstwę trudności jeżeli chodzi o wprowadzenie rozwiązania dla koordynacji ruchu na skrzyżowaniach.

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

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

### **Autorzy artykułu [11] przedstawiają system planujący ruch pojazdów połączonych za pomocą bezprzewodowej komunikacji. System dostarcza pojazdom optymalną trasę biorąc pod uwagę aktualny ruch na drogach**

- Użycie algorytmu Dijkstry w celu znalezienia najkrótszej ścieżki
- Celem patentu znalezienie drogi do celu w najkrótszym czasie poprzez omijanie zakorkowanych dróg

### **Krytyka**

- Jest to jedynie znajdowanie najszybszej drogi do celu poprzez komunikację bezprzewodową. Nie jest to dokładne zaplanowanie ruchu pojazdu wraz z unikaniem kolizji

**W Artykule [4] autorzy przedstawili system do kontroli ruchu i unikania kolizji na autostradach**

- Pod uwagę wzięte zostały: zmiany pasów, unikanie kolizji, kontrolowanie trasy pojazdu
- Unikanie kolizji jest zapewniane poprzez komunikację przez transmisory radiowe oraz radiodiodobiorniki zamontowane w każdym z pojazdów

**Krytyka**

System planuje trasy oraz zmiany pasów na autostradach przy czym zapewnione jest bezpieczeństwo kolizji. Rozwiązania nie można jednak zaaplikować do skrzyżowań dróg

**Autorzy artykułu [13] przedstawiają system dynamiczny system planowania ruchu do nawigacji samochodów przy użyciu 'virus genetic algorithms'**

Zaproponowany został 'Genetic Algorithm', który powinien dawać lepsze wyniki w porównaniu do algorytmu Dijkstry oraz algorytmu A\*

**Krytyka**

Brak unikania kolizji

## **2.4 Użycie algorytmu A\* do planowania ruchu**

**Cel podrozdziału**

Wskazania użycia A\* w literaturze do planowania ruchu. Czy można użyć A\* do planowania ruchu na skrzyżowaniach i wady użycia w porównaniu do mojego rozwiązania.

**Omówienie algorytmu A\* na podstawie artykułu [6]**

- Omówienie optymalności
- Omówienie funkcji heurystyki

### **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 znalezienie 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 pozycja na krok czasowy znajdujący się na 1 pozycji na drodze numer jeden. 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.

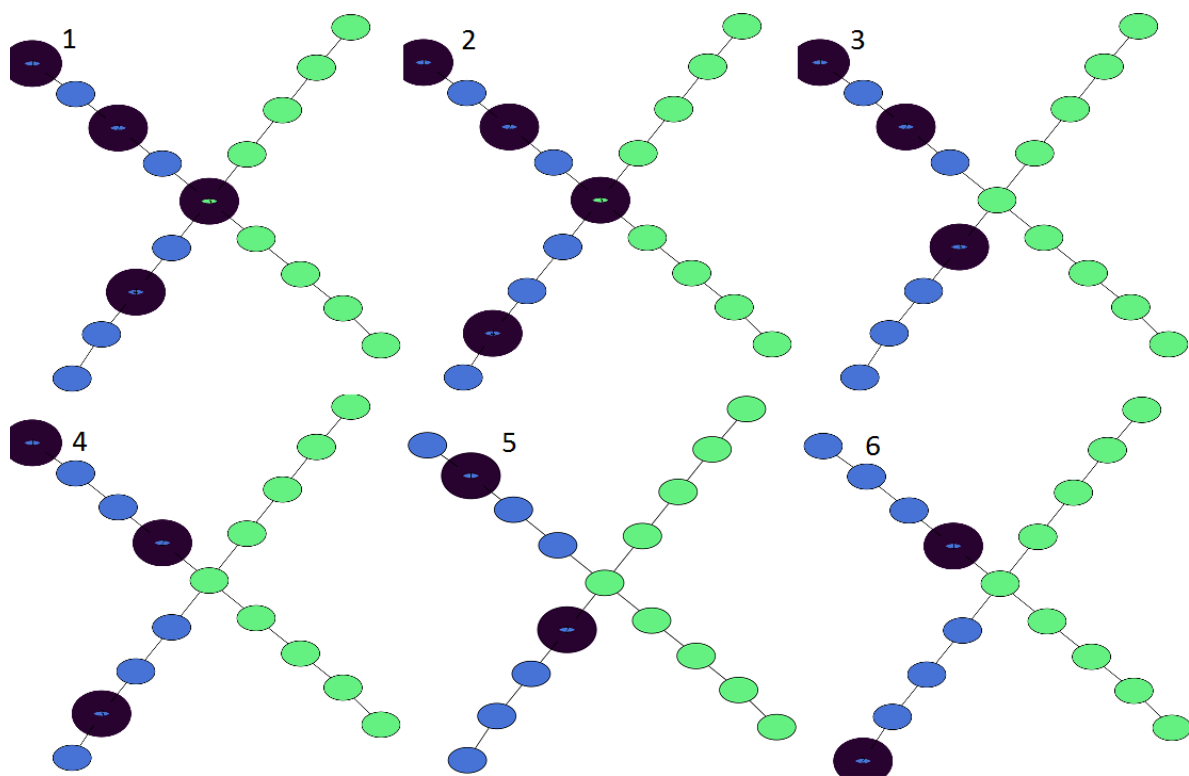
Unikanie kolizji zostało podzielone na dwa etapy

- 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.

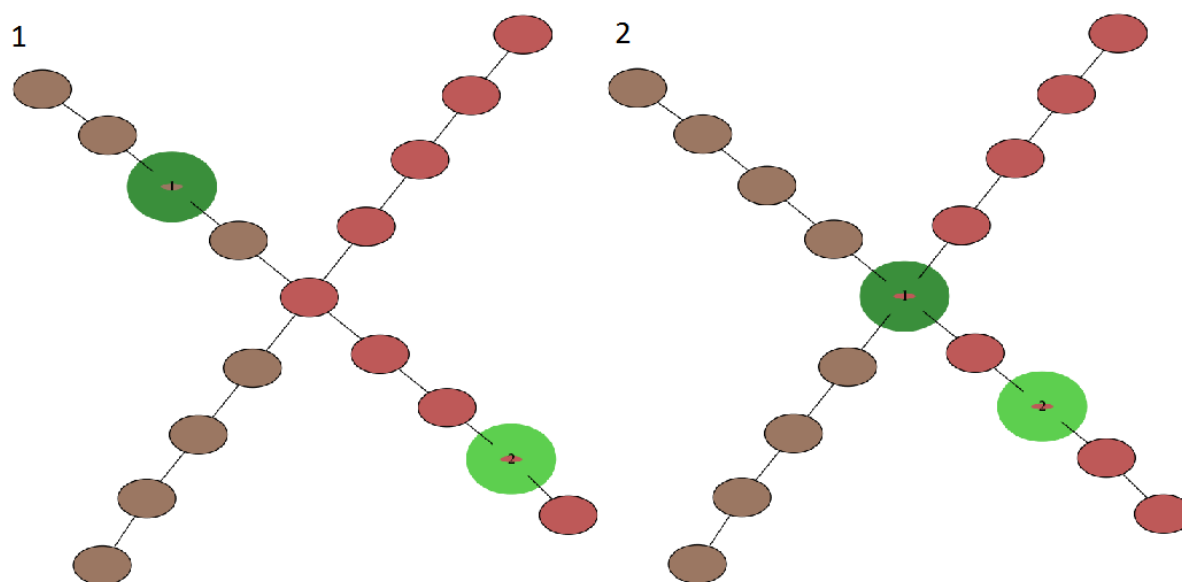
Jeżeli obszary dwóch samochodów na jednym pasie pokrywają się - taki stan jest usuwany i wówczas metoda 'neighbours' nie zwróci go jako stanu sąsiedniego.

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 przez pojazdy skrzyżowania.

## 4.5 Format danych wejściowych

System koordynacji ruchu 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, za którą musi się znaleźć. Poniżej przedstawiony jest przykład liczonej funkcji heurystyki.

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.

Każda droga jest oznaczona innym kolorem.

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.

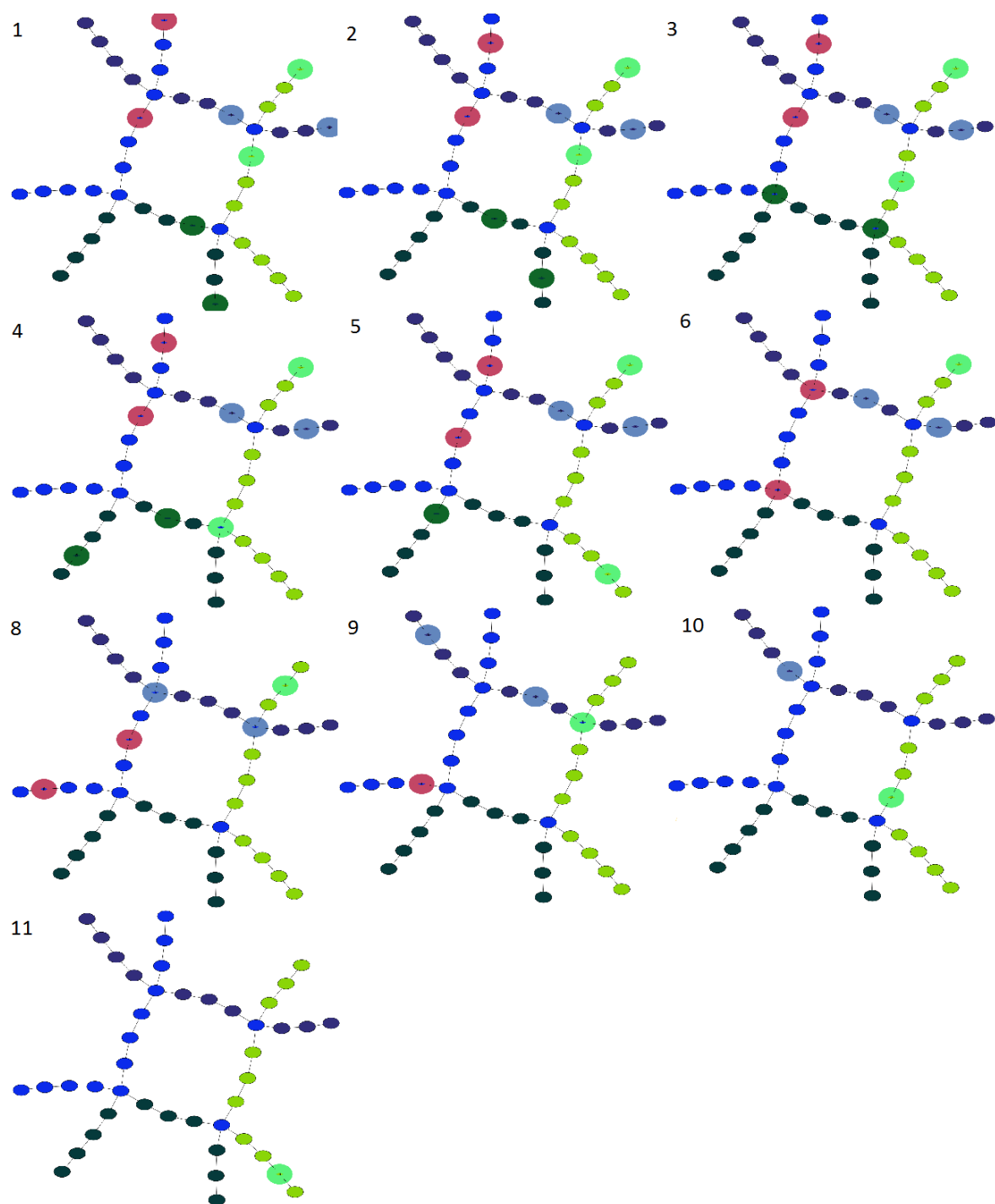
Moduł graficzny wczytuje wszystkie dane wejściowe: pozycję samochodów, dane skrzyżowania oraz ograniczenia. Kolejno na wejście otrzymuje plik zawierający JSON, który reprezentuje wszystkie stany samochodów na skrzyżowaniach od momentu startu, aż do opuszczenia skrzyżowań przez wszystkie samochody. Plik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

Moduł wczytując dane początkowy 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 grafu 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 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.

### **5.3 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 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.

## **6.3 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 (IIAIEM)*, 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.