



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

KATEDRA TELEKOMUNIKACJI

Praca dyplomowa magisterska

*Opracowanie algorytmu wyszukiwania tras dla rowerzystów na
podstawie heterogenicznych zbiorów danych geo-przestrzennych*
*Development of the search algorithm of routes for cyclists on the basis
of heterogeneous geo-spatial data sets.*

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Paweł Milota, Jan Posz

Elektronika i Telekomunikacja

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk

Kraków, 2019

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, artystycznego wykonania 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.

Serdecznie dziękujemy dr hab. Mikołajowi Leszczukowi za nadzór i pomoc podczas tworzenia pracy.

Spis treści

1. Cel Pracy	7
2. Wstęp	9
3. Nawigacje dla rowerzystów	11
3.1. Specyfika tematu	11
3.2. Istniejące rozwiązania	11
3.3. Aplikacje webowe	11
3.4. Aplikacje mobilne	11
4. Charakterystyka środowisk	13
4.1. Urządzenia mobilne z systemem iOS	14
4.2. Środowisko webowe	14
4.2.1. Przeglądarki web na popularne systemy operacyjne	14
4.3. Dane geoprzestrzenne	14
4.3.1. Dane urzędu miasta krakowa na temat ścieżek rowerowych (CartoDB)	14
4.3.2. Dane społeczności rowerowej (DaroPlan)	14
4.3.3. OpenStreetMap oraz Apple Maps	14
4.4. Użyte algorytmy	14
4.4.1. Algorytm Dijkstry	14
4.4.2. Algorytm A*	14
4.4.3. Metoda Haversine	14
4.5. Wykorzystane języki programowania	14
4.5.1. Język programowania JavaScript	14
4.5.2. Biblioteka ReactJS	14
4.5.3. Język programowania Swift	14
4.6. Użyte narzędzia	14
4.6.1. Środowisko programistyczne Xcode	14
4.6.2. Narzędzie do testowania API Postman	14
4.6.3. System kontroli wersji Git	14

5. Tworzenie oprogramowania.....	15
5.1. Opis użytej technologii i bibliotek	15
5.1.1. Opis udostępnionych endpointów	16
5.1.2. Proces wyznaczania grafu na podstawie pobranych danych.....	19
5.1.3. Opis procesu wyznaczania trasy dla użytkownika.....	23
5.2. Opis stworzonej aplikacji mobilnej	24
5.2.1. Opis technologii	24
5.2.2. Schemat klas aplikacji mobilnej	24
5.2.3. Spis ekranów i stanów aplikacji.....	25
5.2.4. Opis działania nawigacji	29
5.2.5. Opis testów.....	31
5.3. Opis stworzonej strony internetowej	31
5.3.1. Opis technologii i użytych bibliotek	31
5.3.2. Spis ekranów, opis działania	32
6. Analiza otrzymanych wyników.....	35
6.1. Analiza działania użytych algorytmów	35
6.1.1. Porównanie działania algorytmu z wykorzystaniem algorytmu Dijkstra i A*	35
6.1.2. Czas działania algorytmu A* i Dijkstra w zależności od długości trasy	37
6.1.3. Porównanie algorytmu zachłannego A* i standardowej implementacji A*	38
6.1.4. Porównanie algorytmu NBA i standardowej implementacji A*	40
6.1.5. Przeprowadzenie testu warunków skrajnych dla aplikacji serwerowej w zależności od zastosowania algorytmu A* lub NBA	41
6.2. Porównanie wyników w stosunku do tras wyznaczonych przez Google Maps	42
7. Wnioski i możliwe dalsze usprawnienia.....	45

1. Cel Pracy

Celem pracy było opracowanie algorytmu wyszukiwania optymalnych tras rowerowych w Krakowie na podstawie bazy danych ulic udostępnianej przez serwis <http://rowery.zikit.pl>. Algorytm ma na celu wyznaczenie najkrótszej trasy przebiegającej po istniejących drogach dla rowerów, a w przypadku ich braku, ulicach o możliwie najniższym ograniczeniu prędkości. Opierając się na uzyskanych wynikach została opracowana aplikacja mobilne, umożliwiająca pobranie trasy pomiędzy dwoma wprowadzonymi adresami oraz nawigowanie użytkowników podczas poruszania się do celu, a także aplikacja internetowa umożliwiająca pobranie trasy i zaznaczenie jej przebiegu na mapie. W celu weryfikacji działania algorytmu zostały przeprowadzone badania mające na celu porównanie opracowanego rozwiązania z istniejącym oferowanym przez Google Maps. Zostały także przeprowadzone badania w celu weryfikacji optymalnego dla tego zastosowania algorytmu wyszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie.

2. Wstep

3. Nawigacje dla rowerzystów

3.1. Specyfika tematu

3.2. Istniejące rozwiązania

3.3. Aplikacje webowe

3.4. Aplikacje mobilne

4. Charakterystyka środowisk

4.1. Urządzenia mobilne z systemem iOS

4.2. Środowisko webowe

4.2.1. Przeglądarki web na popularne systemy operacyjne

4.3. Dane geoprzestrzenne

4.3.1. Dane urzędu miasta krakowa na temat ścieżek rowerowych (CartoDB)

4.3.2. Dane społeczności rowerowej (DaroPlan)

4.3.3. OpenStreetMap oraz Apple Maps

4.4. Użyte algorytmy

4.4.1. Algorytm Dijkstry

4.4.2. Algorytm A*

4.4.3. Metoda Haversine

4.5. Wykorzystane języki programowania

4.5.1. Język programowania JavaScript

4.5.2. Biblioteka ReactJS

4.5.3. Język programowania Swift

4.6. Użyte narzędzia

4.6.1. Środowisko programistyczne Xcode

4.6.2. Narzędzie do testowania API Postman

4.6.3. System kontroli wersji Git

5. Tworzenie oprogramowania

5.1. Opis użytej technologii i bibliotek

W celu implementacji aplikacji serwerowej użyto biblioteki Node.js, jest to stosunkowo nowa technologia, jej pierwsza wersja ujrzała światło dzienne w roku 2009. Node.js umożliwia wykonywanie kodu Javascript poza przeglądarką użytkownika, po stronie serwerowej, składa się z silnika V8 zaimplementowanego przez firmę Google oraz zestawu bibliotek dołączonych przez twórcę języka w celu stworzenia wieloplatformowego środowiska do uruchamiania skryptów napisanych w kodzie Javascript. Biblioteka Node.js jest zaimplementowana w oparciu o architekturę *event-driven* i asynchroniczne operacje wyjścia i wejścia, co oznacza, że biblioteka wydajnie wykorzystuje wielowątkowość i nie zostaje zablokowana wykonywaniem długich operacji przez równoległe działające procesy. Zważając na opisane wcześniej charakterystyki, oprogramowanie stworzone przy użyciu Node.js wyróżnia się dużą wydajnością oraz optymalnym wyborem dla aplikacji oczekujących szybkiego przetwarzania lub komunikacji w czasie rzeczywistym. Dodatkową zaletą biblioteki Node.js jest fakt, że wykorzystuje ten sam język programowania, którego używa się do programowania stron internetowych, z racji tego bariera wejścia do tworzenia pełnych systemów jest znacznie mniejsza. Aplikacja serwerowa korzysta z wielu pomocniczych bibliotek, które umożliwiają szybsze tworzenie kodu. Standardowym oprogramowaniem służącym do zarządzania zewnętrznymi bibliotekami jest aplikacja *npm*, jednak podczas tworzenia tego projektu użyto aplikacji *yarn*, która działa w bardzo przybliżony sposób, zabezpiecza jednak przed usunięciem przez twórcę oprogramowania kodu źródłowego każdej z bibliotek. W poniższych punktach opisano kilka wybranych bibliotek użytych do stworzenia aplikacji wraz z krótkim opisem i przykładem użycia:

Express - biblioteka służąca do pisania aplikacji serwerowych przy użyciu biblioteki Node.js. Udostępnia prosty interfejs do tworzenia punktów końcowych i jest określana jako jeden ze standardów podczas tworzenia aplikacji serwerowych przy użyciu Node.

Eslint - biblioteka służąca jako tzw. *linter*, czyli proces na bieżąco sprawdzający jakość kodu pisanego przez użytkownika. Dzięki użyciu eslint programista nie musi martwić się o niejednorodność we wcięciach, nieużywane zmienne czy niepoprawne ilości znaków białych, jest to sprawdzane przez program. Eslint korzysta z pliku *.eslintrc* który definiuje wszystkie zasady które mają być spełnione w

projekcie, aby kod został uznany za bezbłędny.

Axios - biblioteka umożliwiająca proste interakcje z interfejsami serwerowymi innych serwisów. Dzięki stworzeniu globalnego klienta axios zawierającego podstawową konfigurację nie ma potrzeby powielania tych samych konfiguracji w wielu zapytaniach, wystarczy jedynie zdefiniować rzeczy, które się różnią, jak na przykład URL czy metoda HTTP.

Cors - w celu komunikacji aplikacji serwerowej i strony internetowej znajdujących się pod jednym adresem IP należy skonfigurować „*Cross Origin Resource Sharing*”. Ma to zapobiec możliwości przesyłania złośliwych skryptów w formularzach, które zostaną wykonane przez aplikację. Do umożliwienia Cross Origin Resource Sharing użyto biblioteki cors, która po inicjalizacji automatycznie dodaje nagłówek HTTP Access-Control-Allow-Origin z odpowiednią domeną, dla której tego typu zapytania mają być możliwe.

Aplikacja w celu wyznaczania tras korzysta z dwóch zewnętrznych serwisów - ZiKIT Carto oraz openstreetmap. Carto jest to platforma do zarządzania danymi geoprzestrzennymi, która umożliwia pobranie, wizualizację oraz przeszukiwanie dróg przy użyciu odpowiednich komend SQL. Kod carto jest otwarty i każdy może uruchomić go w swojej stronie internetowej w celu uproszczonej wizualizacji tras na mapie. Krakowski ZiKIT korzysta z własnej instancji carto w celu wizualizacji i przetrzymywania wszelkiego rodzaju danych, takich jak zbiory różnych typów dróg oraz wydarzenia (np. wypadki samochodowe) na mapach. Openstreetmap jest to darmowy portal udostępniający usługę map oraz oferujący szeroki zakres innych danych geoprzestrzennych. Openstreetmap jest projektem otwartym, portal jest utrzymywany przez fundację o tej samej nazwie, a swoje dane zawdzięcza użytkownikom, którzy wprowadzają je w celu ich późniejszego wykorzystania lub jako wolontariusze.

5.1.1. Opis udostępnionych endpointów

W celu umożliwienia komunikacji aplikacji mobilnej oraz strony internetowej, przygotowana aplikacja serwerowa udostępnia pod zdefiniowanymi adresami URL end-point'y, które po przekazaniu odpowiednich parametrów w kwerendzie, umożliwiają pobranie danych. Zaimplementowano je przy pomocy obiektu *router*, będącego częścią opisaną wcześniej biblioteki express. Poniżej przedstawiono dwa end-point'y udostępnione przez aplikację razem z dokumentacją oraz przykładową, skróconą, odpowiedzią w formacie JSON:

1. Endpoint findOptimized

Używany przez aplikację mobilną w celu pobrania optymalnej trasy pomiędzy dwoma punktami przekazanymi w formie kwerendy. Wykorzystuje metodę HTTP GET. Możliwe parametry do przekazania w kwerendzie URL:

- `startLocation` - parametr określający punkt początkowy wyznaczonej trasy w przypadku, gdy jest on przekazany jako adres.
- `startLocationLatitude` oraz `startLocationLongitude` - przez te parametry zostaje przekazana pozycja użytkownika w przypadku, gdy zostaje ona zdefiniowana przez współrzędne geograficzne punktu początkowego. Jeśli lokalizacja punktu początkowego zostaje przekazana w tej postaci, parametr `startLocation` zostaje zignorowany, niezależnie od tego czy został zdefiniowany w kwerendzie.
- `endLocation` - parametr określający punkt końcowy trasy w postaci adresu. Aplikacja nie daje możliwości przekazania punktu końcowego trasy w postaci współrzędnych geograficznych, dlatego też w przypadku punktu końcowego trasy przekazanie lokalizacji w tej postaci nie zostało zaimplementowane.
- `routeType` - określenie czy wyznaczona trasa ma być najkrótsza, czy optymalna z wagowego punktu widzenia. Przyjmuje parametr typu String o wartość `BEST` lub `SHORTEST`.

Przykładowe zapytanie HTTP GET w celu uzyskania odpowiedzi zawierającej optymalną trasę przejazdu można uzyskać pod adresem URL:

bazowy_adres_url/api/routes/findOptimized?startLocation=romera&endLocation=karmelicka&routeType=BEST

Przykładową odpowiedź, skróconą do postaci przedstawiającej jej formę przedstawiono poniżej.

```

1  {
2    "startLocation": {
3      "displayName": "Tyniec, Bogucianka, Tyniec, Dębniki, Kraków, małopolskie, 30-398, RP",
4      "location": {
5        "latitude": 50.0155104,
6        "longitude": 19.8088997
7      }
8    },
9    "endLocation": {
10     "displayName": "Ułanów, Ugorek, Prądnik Czerwony, Kraków, małopolskie, 31-450, Polska",
11     "location": {
12       "latitude": 50.0769263,
13       "longitude": 19.9842483
14     }
15   },
16   "totalLength": 18700.85029855749,
17   "totalWeight": 16866.407069214307,
18   "totalLengthCombined": 18700.85029855749,
19   "totalWeightCombined": 16866.407069214307,
20   "routes": [
21     {
22       "id": "e5a3fc3d-dc09-4006-8297-87321855b8b6",
23       "name": "",
24       "category": "",
25       "start": {
26         "latitude": 50.01913675,
27         "longitude": 19.803819125,
28         "stringIdentifier": "50.01913675,19.803819125"
29       },
30       "end": {
31         "latitude": 50.019280375,
32         "longitude": 19.80384825,
33         "stringIdentifier": "50.019280375,19.80384825"
34       },
35       "startPointVertexId": 2087,
36       "endPointVertexId": 2085,
37       "segments": [
38         {
39           "id": "281b48a5-3a9d-43eb-83e4-c01c909860b1",
40           "isBeginning": false,
41           "isEnding": false,
42           "start": {
43             "latitude": 50.01913675,
44             "longitude": 19.803819125,
45             "stringIdentifier": "50.01913675,19.803819125"
46           },
47           "end": {
48             "latitude": 50.0191315,
49             "longitude": 19.80384325,
50             "stringIdentifier": "50.0191315,19.80384325"
51           },
52           "length": 1.8198160953142581
53         },
54         { ... },
55       ]
56     },
57     { ... }
58   ]
59 }

```

Rys. 5.1. Przykładowa odpowiedź na zapytanie serwera pod endpoint findOptimized.

2. Endpoint visualizationPoints:

Używany przez stronę internetową, będącą częścią przygotowanego systemu, w celu wizualizacji trasy na mapach openstreetmap. Wykorzystuje metodę HTTP GET. Możliwe parametry do przekazania w kwerendzie URL:

- startLocation - parametr określający początkową lokalizację użytkownika w postaci adresu.
- endLocation - parametr określający końcową lokalizację użytkownika w postaci adresu.
- routeType - określenie czy wyznaczona trasa ma być najkrótsza, czy optymalna z wagowego punktu widzenia. Przyjmuje parametr typu String o wartości BEST lub SHORTEST.
- algorithm - parametr określający jaki algorytm ma zostać użyty do wyszukania trasy. Przyjmuje parametr typu String o wartości ASTAR, AGREEDY lub NBA.

Przykładowe zapytanie HTTP GET w celu uzyskania odpowiedzi zawierającej optymalną trasę przejazdu można uzyskać pod adresem URL:

bazowy_adres_url/api/routes/visualizationPoints?startLocation=romera&endLocation=karmelicka&routeType=BEST&algorithm=ASTAR

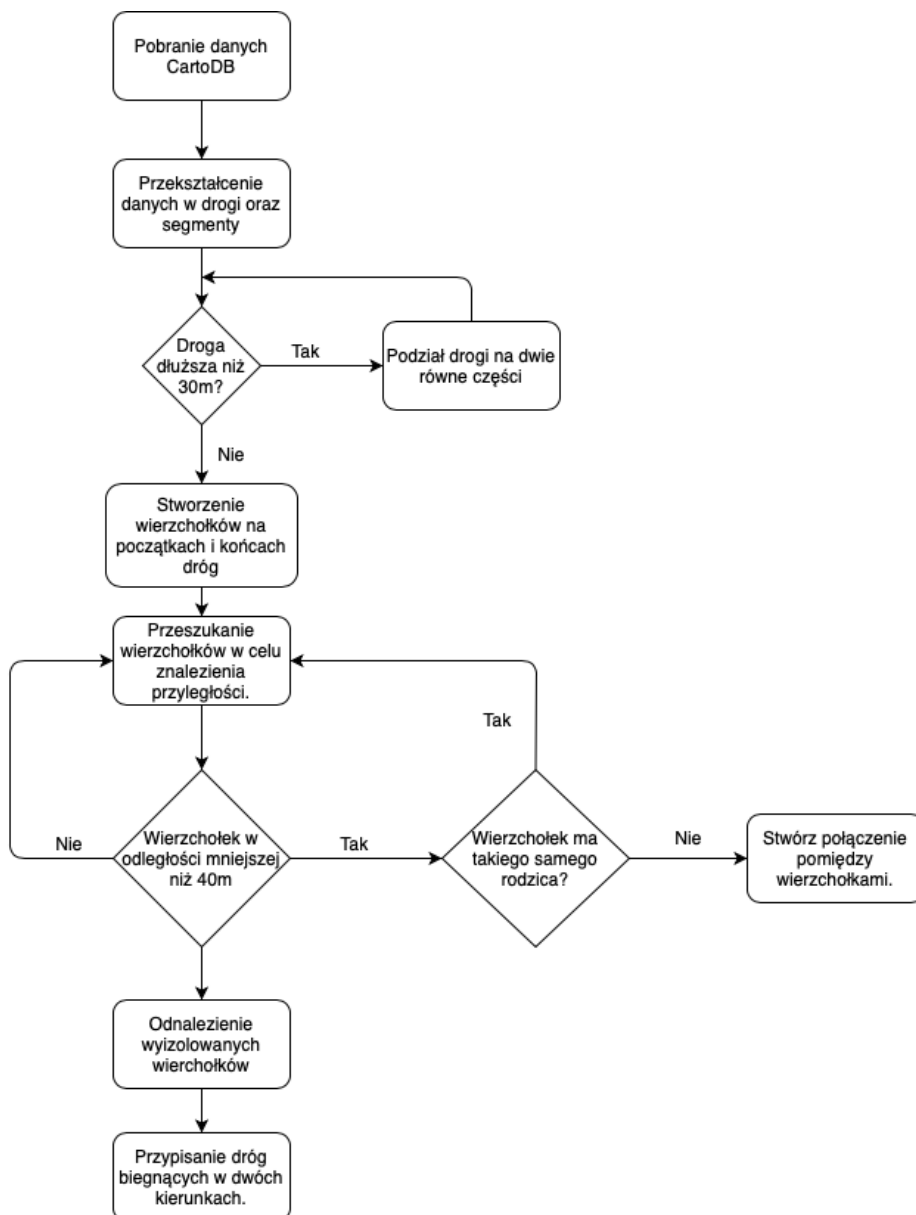
Przykładową odpowiedź, skróconą do postaci przedstawiającej jej formę przedstawiono poniżej:

```
1  {
2    "reachStart": [
3      [
4        50.0760809,
5        19.8955455
6      ],
7      [
8        50.07598475,
9        19.896798
10     ]
11   ],
12   "reachEnd": [
13     [
14       50.07535579920677,
15       19.936059638857838
16     ],
17     [
18       50.0753897,
19       19.9360861
20     ]
21   ],
22   "route": [
23     [
24       50.07598475,
25       19.896798
26     ],
27     [
28       50.0759666875,
29       19.896794
30     ],
31     [ ... ],
32   ]
33 }
```

Rys. 5.2. Przykładowa odpowiedź na zapytanie serwera pod endpoint visualization-Points.

5.1.2. Proces wyznaczania grafu na podstawie pobranych danych

W celu dodatkowej wizualizacji na poniższym schemacie blokowym przedstawiono proces wyznaczania grafu na podstawie pobranych danych geoprzestrzennych:



Rys. 5.3. Schemat blokowy algorytmu użytego do stworzenia grafu na podstawie danych geoprzestrzennych.

W celu optymalizacji czasu działania systemu, dane geoprzestrzenne są pobierane oraz przetwarzane przez aplikację tylko jeden raz, zaraz po włączeniu. Jest to czasochłonny proces, wymagający wielu iteracji po rozległym zbiorze danych. Jego rezultatem jest stworzenie grafu, który może być w kolejnych etapach wykorzystywany jako gotowa dana wejściowa. Tworzenie grafu zostaje rozpoczęte przez pobranie zestawu danych geoprzestrzennych dla miasta Kraków z portalu <https://zikit.carto.com>. Pobrana baza danych zawiera zarówno trasy rowerowe, jak i drogi z ograniczeniem prędkości poniżej 50 kilometrów na godzinę, obydwie bazy są następnie scalane i przekształcane w zbiór odpowiednich dróg i segmentów. Droga jest logiczną reprezentacją krzywej poprowadzonej na mapie pomiędzy dwoma punktami, składa

się z segmentów, które zawierają jedynie punkt początkowy oraz końcowy i definiują zestaw linii prostych, które mogą zostać użyte, aby narysować linię drogi na mapie. Wykorzystując metodę Haversine, zostają wyznaczone długości każdej drogi przez zsumowanie długości wszystkich segmentów, które się na nią składają.

Kolejnym etapem jest proces przygotowywania dróg do procesu tworzenia grafu. Aby mieć pewność, że wszystkie przyległości zostaną poprawnie odnalezione, w pierwszym kroku należy odpowiednio podzielić wszystkie pobrane drogi na takie o mniejszej długości. Trasy pobrane z serwisu Carto mają bardzo losowe długości oraz są zaznaczone w taki sposób, że nie występuje segmentacja w okolicach końców innych tras oraz przy przecięciach z nimi. Z tego powodu wyznaczenie poprawnego grafu z uzyskanych danych wymaga wcześniejszego przetworzenia. Pierwszym krokiem przetwarzania danych jest podzielenie segmentów uzyskanych z przeanalizowanych, pobranych danych na takie, które mają maksymalnie trzy metry długości. Dzieje się to przez podział każdego segmentu na pół do momentu aż osiągną one pożądaną długość. W następnej kolejności, gdy posiadamy już podzielone segmenty, następuje podzielenie tras. Dzieje się to na zasadzie podzielenia tablicy segmentów na części o określonej długości a następnie utworzenia zestawu nowych dróg z uzyskanych części. Każda droga, stworzona przez podzielenie innej drogi na mniejsze części, posiada także przypisanie swojego "zodzica", czyli pierwotnej drogi z której nastąpił podział. Droga, będąca zodzicem", posiada za to tablicę zawierającą wszystkie drogi będące jej "dziećmi". Na tym etapie następuje także przypisanie drodze odpowiedniej wagi oraz stwierdzenie czy droga przebiega po moście - jest to stwierdzane na podstawie wykrycia słów kluczowych „most” lub „kładka” w nazwie trasy. Niestety baza danych carto ZiKiT nie oferuje w swoich danych takich informacji, dlatego też występuje potrzeba przewidzenia tej danej w inny sposób.

Proces tworzenia grafu rozpoczyna się od stworzenia wierzchołka w każdym miejscu będącym zakończeniem lub rozpoczęciem drogi. W tym celu następuje iteracja po wszystkich drogach będących "zodzicami", dla każdej z nich następuje iteracja po wszystkich jej "dzieciach" i tworzone są wierzchołki na początku pierwszej drogi oraz na zakończeniu każdej następnej. Każdy z utworzonych w tym procesie wierzchołków ma także przypisywaną trasę "zodzica", który jest "zodzicem" drogi, dla której wierzchołek został stworzony. Kolejnym etapem jest wyszukanie przyległości dla każdego z wierzchołków. W tym celu następuje zagnieżdżona iteracja po wszystkich stworzonych wierzchołkach i porównywana jest odległość pomiędzy nimi. W przypadku, gdy odległość ta jest mniejsza niż 40 metrów, następuje połączenie wierzchołków drogą o typie *standard link*. W tym procesie ignorowane są wierzchołki posiadające takiego samego "zodzica", w celu uniknięcia łączenia wierzchołków już ze sobą połączonych w obrębie jednej drogi. Ignorowane są także wierzchołki których trasa-rodzic znajduje się na moście, wyodrębniając z tego wyjątek, gdy aktualnie rozpatrywany wierzchołek jest początkiem lub końcem trasy, do której przynależy. Zabieg ten ma na celu uniknięcie łączenia za sobą dróg znajdujących się na różnej wysokości. W kolejnym kroku działania algorytmu, obsługiwane są drogi dwukierunkowe, są to takie które w polu kategoria zawierają jeden z poniższych skrótów:

– dwr - droga rowerowa.

- cpr - ciąg pieszo-rowerowy.
- c16t22 - chodnik z dopuszczonym ruchem rowerowym (skrót pochodzi od identyfikatora znaku drogowego).
- kontrapas i kontraruch - zakładamy, że w tym przypadku użytkownik może poruszać się w przeciwną stronę po ulicy, na której znajduje się dana ścieżka.
- skróty pokrewne zawierające kombinację powyższych lub dopisek w postaci cyfry.

Każda z dróg przypisanych do każdego z wierzchołków, w przypadku gdy jest oznaczona jako dwukierunkowa, musi zostać odpowiednio przetworzona, aby algorytm wyszukiwania mógł przez nią prowadzić. W tym celu wszystkie takie drogi wychodzące z wierzchołka zostają dodane do dróg wchodzących do wierzchołka, a następnie zostają odwrócone, czyli podmieniany jest identyfikator wierzchołka początkowego oraz końcowego, współrzędne końca i początku, a także w analogiczny sposób zostaje odwrócony każdy segment przynależący do danej drogi. Ta sama procedura zostaje powtórzona w celu transformacji także dróg wchodzących do wierzchołka. Ostatnim z kroków przygotowywania grafu jest wyodrębnienie samotnych wierzchołków. Są to wierzchołki, które znajdują się w mało zagęszczonym obszarze i znajdują się zbyt daleko, aby znaleźć dla nich przyległości, pomimo że powinny one zostać znalezione. Przykładem dla tego przypadku może być droga rowerowa na mało uczęszczanej ulicy, która w pewnym momencie z braku możliwości poprowadzenia zostaje przzerwana na odcinku długości 100-150m, po czym następuje jej kontynuacja w obrębie tej samej ulicy. W tym celu dla każdego z wierzchołków, który posiada tylko jedną drogę przychodzącą, zostaje przeszukana okolica najbliższych 150 metrów. W przypadku znalezienia zbyt dużej ilości przyległości, proces jest ignorowany. W przeciwnym wypadku wierzchołek zostaje z nimi połączony drogą typu *isolation link*.

Po przeprowadzaniu całego powyższego procesu zostaje wygenerowany graf składający się z wierzchołków, w którym drogi pełnią rolę krawędzi. Ostatnim krokiem, przeprowadzanym podczas tworzenia docelowego grafu, jest przypisanie wagi każdej z dróg. Zważając na fakt, że baza danych carto zawiera informacje odnośnie typów większości tras, aplikacja stara się przewidzieć zysk użytkownika z przebycia dłuższego dystansu znacznie bardziej komfortowymi drogami. W tym celu przypisywane są w zależności od kategorii wagi:

- Ddr - waga 0.7
- Cpr - waga 0.8
- Kontrapas, kontraruch - waga 0.8
- C16t22 - waga 0.9

- Standard link - w przypadku, gdy krótszy niż 10 metrów, posiada wagę 1.5. W przeciwnym wypadku waga jest równa 2.
- Isolation link - waga 4
- Droga rowerowa bez kategorii - waga 1
- Droga z bazy sugerowanych tras - waga 1.2

5.1.3. Opis procesu wyznaczania trasy dla użytkownika

Kolejnym etapem działania algorytmu jest wyszukiwanie tras na podstawie danych wejściowych przekazanych przez użytkownika. Gdy zostanie zarejestrowane zapytanie pod endpoint „findOptimized”, aplikacja odpowiednio przetwarza dane w celu uzyskania współrzędnych geograficznych punktu początkowego oraz końcowego trasy. Wykorzystywany jest do tego serwis openstreetmap, odpowiednio skonfigurowany w celu dekodowania lokalizacji znajdujących się w Krakowie. W zależności od wybranej metody przeszukiwania brany jest także pod uwagę przekazany przez użytkownika parametr routeType. W przypadku przekazania drogi typu „BEST” przy tworzeniu odpowiedniego typu obiektu „graph”, używanego później do przeszukiwania, do połączenia każdego z wierzchołków używana jest rzeczywista waga drogi, za to w przypadku przekazania drogi typu „SHORTEST” ignorowane są wagi dróg i brana pod uwagę jest tylko ich całkowita długość.

W następnym etapie graf zostaje przeszukany w celu znalezienia wierzchołków znajdujących się najbliższej pozycji wybranych przez użytkownika. W celu zminimalizowania prawdopodobieństwa sytuacji, w której znalezione wierzchołki znajdują się w grafie niespójnym, są także wyznaczane trzy alternatywne wierzchołki, będące kolejnymi najbliższymi. Każdy z wyznaczonych wierzchołków należy także do innej drogi żoźdźca”. Metoda ma na celu w głównej mierze wykluczenie wierzchołków przynależących do odosobnionych dróg rowerowych, które ze względu na zbyt dużą odległość nie zostały włączone do żadnego większego grafu. Są one reprezentowane przez odrębny graf składający się jedynie z jednej krawędzi i dwóch wierzchołków, wyznaczających początek i koniec drogi. Kolejnym krokiem działania algorytmu jest wyznaczenie wszystkich możliwych ścieżek pomiędzy wszystkimi odnalezionymi punktami początkowymi i końcowymi. Wykorzystywany jest do tego algorytm A*. Każda z odnalezionych ścieżek ma przypisywaną zsumowaną wagę wszystkich dróg, które do niej przynależą z wagą 1 oraz sumę odległości początku i końca ścieżki w stosunku do punktów początkowego i końcowego przekazanych przez użytkownika z wagą 20. Krok ten ma na celu eliminację dróg, które są najkrótsze, ale są podzbiorem innej dłuższej drogi, która prowadzi użytkownika tą samą trasą. Ze wszystkich wyznaczonych dróg zostaje wybrana ta, która ma najmniejszą wagę.

Wyznaczona ścieżka zostaje zwrócona użytkownikowi jako odpowiedź w formacie JSON, zawierającym współrzędne punktów początkowego i końcowego oraz zbioru dróg podzielonych na segmenty, które pomiędzy nimi prowadzą.

5.2. Opis stworzonej aplikacji mobilnej

5.2.1. Opis technologii

Aplikacja mobilna została zaimplementowana pod system iOS przy użyciu SDK dostarczonego przez firmę Apple, umożliwiające stworzenie aplikacji. Implementację interfejsu użytkownika umożliwia biblioteka CocoaTouch będąca jego częścią. Z racji faktu, że aplikacja wykorzystuje moduł GPS w celu wyznaczania aktualnego położenia użytkownika oraz bibliotekę MapKit, wchodzącą w skład biblioteki CocoaTouch, w poniższych akapitach opisano działanie obydwu bibliotek wraz z przykładami użycia wewnątrz zaimplementowanej aplikacji.

CoreLocation jest biblioteką wchodzącą w skład iOS SDK. Oferuje interfejs do wyznaczania lokalizacji użytkownika, ale odpowiada także za obsługę wielu innych sensorów obsługiwanych przez telefon, jak na przykład magnetometru, barometru, a nawet Bluetooth - do wyznaczania położenia w stosunku do urządzeń w standardzie iBeacon. Przed uzyskaniem lokalizacji użytkownika, w celu ochrony prywatności, musi zostać wyświetlony odpowiedni komunikat, w którym użytkownik wyraża zgodę na udostępnienie swojej lokalizacji dla aplikacji. W następnej kolejności, przy użyciu delegacji klasy CLLocationManager aplikacja uzyskuje co sekundę odpowiedź zwrótną zawierającą aktualną lokalizację użytkownika, a także jej dokładność w metrach. Biblioteka CoreLocation jest również używana do wyznaczania kierunku, w którym użytkownik skierował swój telefon. Umożliwia to płynną animację ikony roweru podczas prowadzenia użytkownika po trasie. W interfejsie użytkownika jest on skierowany w tę samą stronę na mapie, co telefon w rzeczywistości. Dodatkową funkcją biblioteki wykorzystywaną w aplikacji jest geocoding, czyli wyznaczanie współrzędnych geograficznych na podstawie wpisanego adresu lub działanie do tego odwrotne. Użyta została do tego klasa CLGeocoder będąca częścią CoreLocation.

Drugą biblioteką zapewniającą działanie aplikacji iOS jest **MapKit** - biblioteka umożliwiająca wyświetlanie map na ekranie telefonu. Została wybrana zamiast map Google z powodu prostszej implementacji w aplikacjach pisanych pod system iOS, a także fakt, że jest rozwiązaniem natywnym, zaimplementowanym przez firmę Apple, a nie zewnętrzną biblioteką.

5.2.2. Schemat klas aplikacji mobilnej

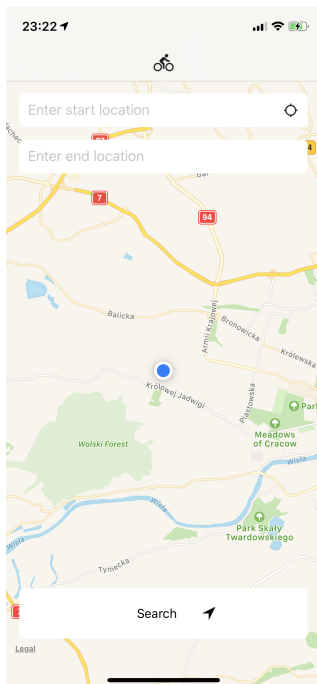
Za zarządzanie danymi oraz stanem aplikacji odpowiada klasa **NavigationManager**, która jest swojego rodzaju łącznikiem pomiędzy widokiem głównym a wszelkimi serwisami, takimi jak klient nawigacji, serwis zapewniający lokalizację użytkownika lub klasa odpowiedzialna za wykonywanie zapytań HTTP. Zarządza w odpowiedni sposób danymi wejściowymi oraz interakcjami użytkownika przekazanymi z ekranu głównego, aby zareagować odpowiednimi akcjami i zmianą stanu, który następnie przekazany do warstwy widoku przez delegację odpowiada za wyświetlenie odpowiednich danych dla użytkownika. Do odpowiedzialności klasy NavigationManager należą:

1. Obserwacja danych wpisywanych przez użytkownika do pól punktu startowego oraz końcowego.

2. Obsługa przycisku wyznaczenia aktualnego adresu użytkownika. Po jego wciśnięciu do klasy zostaje przekazane odpowiednie zdarzenie, na które reaguje dekodowaniem aktualnej lokalizacji użytkownika na adres na mapie.
3. Pobranie trasy przy użyciu endpointu „findOptimized” po akcji użytkownika w postaci wciśnięcia przycisku „Navigate” oraz zmianę stanu aplikacji na zaznaczenie trasy, gdy zapytanie się powiedzie.
4. Włączenie oraz wyłączenie procesu nawigowania użytkownika w przypadku, gdy została zatrzymana przez użytkownika lub znalazł się on w punkcie końcowym.

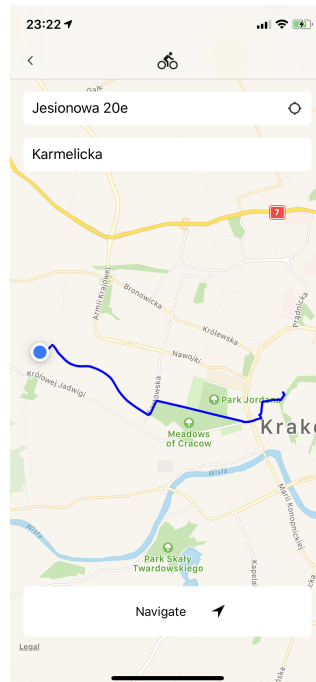
5.2.3. Spis ekranów i stanów aplikacji

Zaimplementowana aplikacja mobilna składa się z zestawu ekranów, które umożliwiają użytkownikowi intuicyjne wprowadzenie parametrów trasy oraz przejście przez każdy stan nawigacji aż do doprowadzenia do końca trasy. W poniższych akapitach zestawiono przykładowe ekrany aplikacji wraz z opisem ich celu i możliwych interakcji ze strony użytkownika. Bezpośrednio po wejściu do aplikacji, użytkownikowi zostaje przedstawiony ekran z mapą oraz dwoma polami tekstowymi, każde z nich posiada *placeholder* w celu zasugerowania, którą z wartości należy wpisać. Po prawej stronie pola tekstowego, służącego do wpisania adresu początkowego, znajduje się przycisk służący do lokalizacji użytkownika. Po kliknięciu aplikacja pobiera z modułu GPS aktualną pozycję użytkownika, a następnie używając wbudowanej w iOS SDK klasy CLGeocoder, wykonuje translację współrzędnych geograficznych na tekstową reprezentację adresu. Wyznaczony adres zostaje wpisany w pole tekstowe. Na poniższej ilustracji przedstawiono ekran początkowy w stanie, gdy nie ma wprowadzonych danych.



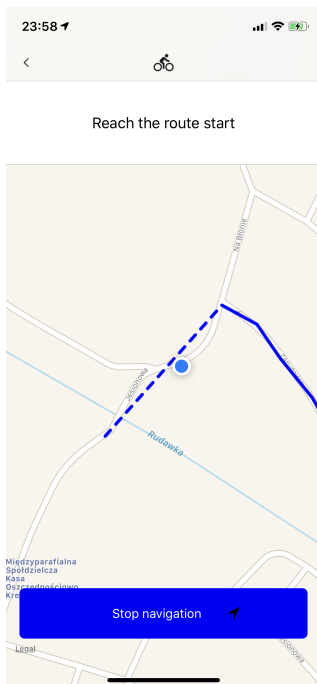
Rys. 5.4. Ekran początkowy aplikacji z możliwością wpisania punktów startowego i końcowego.

Po wprowadzeniu punktów końcowych trasy, następuje jej wyszukanie, w tym celu aplikacja przygotowuje zapytanie pod endpoint „findOptimized”, przekazując dane wpisane w polach tekstowych, a na czas ładowania odpowiedzi wyświetla indykator ładowania na górnym panelu oraz blokuje interakcje użytkownika ze wszystkimi elementami interfejsu poza mapą. Po pobraniu trasy jest ona przekształcana na modele po stronie aplikacji oraz rysowana na mapie. Linia ciągłą zaznaczona jest trasa, linią przerywaną odcinki poza trasą, które trzeba pokonać, aby dostać się z aktualnej lokalizacji użytkownika do początku trasy oraz z końca trasy do punktu końcowego wprowadzonego przez użytkownika. W celu wizualizacji, po narysowaniu mapa jest odpowiednio przybliżana tak, aby zaprezentować użytkownikowi przebieg całej trasy od jej początku do końca. Ekran z narysowaną mapą przedstawiono na poniższej ilustracji.



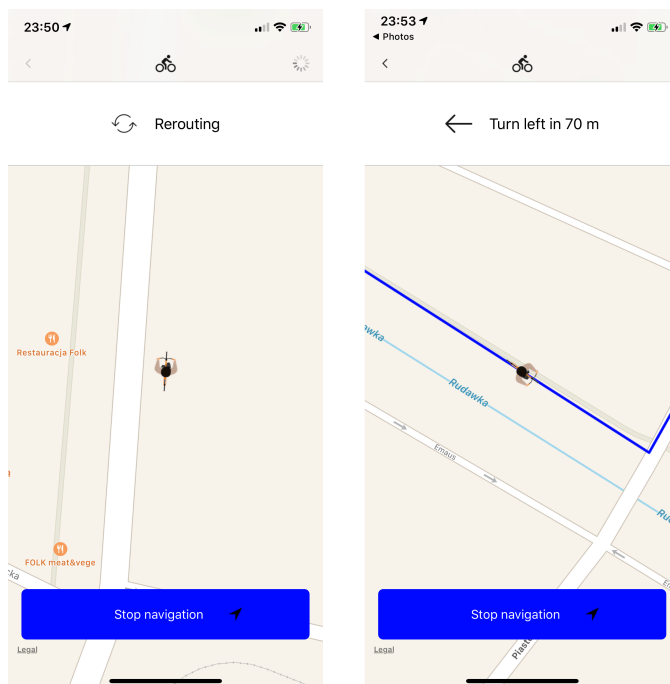
Rys. 5.5. Ekran aplikacji mobilnej podczas prezentacji wyznaczonej trasy.

Po wciśnięciu przycisku nawiguj zostaje włączony proces nawigacji użytkownika po trasie. W pierwszej fazie jest to prowadzenie do początku trasy. Mapa zostaje odpowiednio przybliżona, aby objąć drogę z aktualnego położenia użytkownika do początku trasy. Lokalizacja użytkownika jest przedstawiona w postaci standardowego punktu na mapie, obsługiwanego przez bibliotekę MapKit.



Rys. 5.6. Ekran aplikacji mobilnej w stanie, w którym użytkownik ma za zadanie dotrzeć do początku trasy.

Po dojściu użytkownika w obręb wyznaczonej trasy, interfejs aplikacji rozpoczyna nawigowanie go po trasie. Punkt wyznaczający aktualną lokalizację jest co sekundę animowanie przesuwany na pozycję na trasie, odpowiadającą najbliższemu segmentowi w stosunku do rzeczywistej pozycji użytkownika na mapie. W przypadku wykrycia przez aplikację zakrętu w zasięgu około najbliższych 200 metrów, na górnym panelu jest wyświetlana wskazówka zawierająca kierunek zakrętu oraz aktualną odległość po której wystąpi. W przypadku, gdy użytkownik zjedzie z trasy, na górnym panelu jest przedstawiona instrukcja sugerująca powrót na trasę, zaś gdy oddali się od niej za daleko, instrukcja zmienia się w informację o wyznaczaniu nowej trasy do punktu końcowego.



Rys. 5.7. Ekrany aplikacji mobilnej przedstawiające wskazówki nawigacji podczas poruszania się po trasie.

5.2.4. Opis działania nawigacji

System nawigacji w aplikacji został zaimplementowany w celu wizualizacji aktualnej lokalizacji użytkownika w stosunku do trasy, która została wyznaczona. Działanie systemu składa się z zestawu stanów pomiędzy, którymi algorytm może przechodzić w przypadku wykrycia określonych warunków. W poniższym akapicie została przedstawiona lista stanów, na które składa się proces nawigacji, a także dokładny opis warunków koniecznych do przejścia pomiędzy nimi. W celu wizualizacji procesu został także stworzony diagram stanów odwzorowujący cały proces.

Lista stanów, w których może znaleźć się proces nawigacji użytkownika:

- Dotarcie z aktualnej lokalizacji do punktu startowego trasy
- Nawigacja użytkownika po trasie
- Dotarcie z końca trasy do punktu końcowego nawigacji
- Zejście z trasy - w przypadku, gdy użytkownik znalazł się w odległości większej niż 30m, ale nie większej niż 150m od trasy.
- Potrzeba wyznaczenia nowej trasy - gdy użytkownik znalazł się w odległości większej niż 150m od najbliższego segmentu trasy.

W momencie, gdy użytkownik rozpoczyna nawigację, zostaje włączony proces, który co sekundę pobiera aktualną lokalizację użytkownika z klienta lokalizacji i wyznacza aktualny stan aplikacji. Startowym stanem jest prowadzenie użytkownika do początku trasy. Jako, że pokrycie Krakowa drogami dla rowerów oraz drogami z niskim ograniczeniem prędkości jest względnie małe, w większości przypadków użytkownik na początku będzie musiał przemieścić się kilkaset metrów poza trasami wspieranymi przez aplikację. W tym celu jest rysowana prosta linia pomiędzy punktem początkowym, wpisanym przez użytkownika, a początkiem trasy, a mapa jest odpowiednio przybliżana, aby umożliwić użytkownikowi proste dotarcie do drogi.

W czasie fazy prowadzenia użytkownika na start trasy, co każdy cykl odświeżania aktualnego stanu, jest sprawdzane czy użytkownik znalazł się w otoczeniu 10 metrów w stosunku do początku któregośkolwiek z segmentów składających się na trasę. Sprawdzanie jedynie segmentu będącego punktem początkowym trasy nie daje w tym wypadku oczekiwanego rezultatu ze względu na częste błędy w wyznaczeniu pozycji użytkownika przez moduł GPS, a także przez fakt, że często na trasę wjeżdżamy niedokładnie w punkcie jej początku, a przykładowo dopiero po pierwszych stu metrach. Posiadając dostępny zbiór danych aplikacja niestety nie jest w stanie wyznaczyć optymalnej drogi użytkownika pomiędzy jego aktualnym położeniem a punktem końcowym trasy. Jesteśmy w stanie jedynie oszacować, że najbardziej prawdopodobnym punktem będzie najbliższy wierzchołek grafu, zakładając odpowiednią granulację wszystkich wierzchołków otrzymanych podczas procesu jego tworzenia.

W przypadku wykrycia wejścia użytkownika w obręb wyznaczonej dla niego trasy, aplikacja przechodzi w stan nawigowania po drodze. Aby uniknąć błędów w wyznaczaniu pozycji użytkownika i prowadzenia go w odległości 10-20 metrów obok zaznaczonej drogi, został zaimplementowany mechanizm "dociągania" do wyznaczonej ścieżki. W każdym kroku filtrowane są wszystkie drogi w celu znalezienia tej znajdującej się najbliżej użytkownika, zastosowano do tego porównanie sumy odległości od początków z każdej tych dróg, podzielonej przez jej długość. Dzięki temu rozwiązaniu algorytm wyeliminował znajdowanie jedynie krótkich dróg, dla których suma odległości do początku oraz do końca była najmniejsza. Po odnalezieniu najbliższej drogi, algorytm przeszukuje wszystkie jej segmenty w celu znalezienia tego znajdującego się najbliżej. Jako że długości segmentów zostały ujednolicone w jednym z kroków tworzenia grafu, na tym etapie możemy zastosować prostsze porównanie, które sprawdza jedynie sumę odległości użytkownika od początku oraz końca każdego z segmentów. W następnym kroku, uzyskany segment zostaje podzielony na 20 równych sobie odcinków. Najbliższy aktualnej pozycji użytkownika zostaje przypisany jako najbardziej odpowiedni, a aplikacja sztucznie dociąga lokalizację użytkownika do tego właśnie punktu.

Metoda opisana powyżej działa w przypadku, gdy wyznaczona pozycja użytkownika znajduje się nie dalej niż 50 metrów od trasy. W przypadku, gdy użytkownik znajdzie się w odległości większej niż 50 metrów, algorytm przestaje zwracać pozycję użytkownika dociągniętą do trasy, a zamiast tego zwraca rzeczywiste położenie użytkownika na mapie. Ten tryb został zaimplementowany w celu przedstawienia użytkownikowi informacji o tym, że znalazł się poza trasą i powinien na nią wrócić. Ogranicza to także niepotrzebne zapytania do strony serwerowej w przypadku, gdy użytkownik celowo zszedł z trasy, aby

na przykład wejść do sklepu. W przypadku, gdy wykryte położenie znajduje się dalej niż 150m od trasy zaznaczonej na mapie, algorytm zakłada, że należy dla użytkownika wyznaczyć nową trasę, o czym informuje przez wysłanie określonego sygnału oraz zakończenie działania. W tym momencie zostaje wysłane zapytanie do serwera o nową trasę zawierające aktualną pozycję użytkownika oraz miejsce docelowe określone na początku procesu nawigacji. W przypadku gdy zapytanie się powiedzie, algorytm zostaje zrestartowany i wraca do stanu początkowego, czyli prowadzenia użytkownika do początku trasy. W każdym kroku działania algorytmu jest także sprawdzana odległość aktualnej pozycji użytkownika od końca wyznaczonej trasy. Jeśli jest ona mniejsza niż 50 metrów, zakładamy, że użytkownik dotarł do końca i nawigacja przechodzi w tryb prowadzenia użytkownika do punktu końcowego trasy, pokazując jednocześnie odpowiednio przybliżony obszar na mapie. W tym kroku założona odległość od punktu końcowego musi być znacznie większa niż ta która stanowi o momencie wejścia na trasę, ponieważ użytkownik może znajdować się w najbliższym otoczeniu punktu końcowego jedynie przez krótką chwilę.

5.2.5. Opis testów

Do testów działania nawigacji zostały wykorzystane pliki GPX (*GPS Exchange Format*), które sformatowane w odpowiedni sposób umożliwiają symulację lokalizacji użytkownika zarówno przy użyciu symulatora, jak i na rzeczywistym urządzeniu z systemem iOS. Plik GPX jest to plik w formacie XML, który składa się ze zbioru punktów oraz czasów skorelowanych z każdym z nich. System odczytując ten plik animuje lokalizację użytkownika tak, aby przeszła ona pomiędzy wszystkimi określonymi punktami w ściśle wyznaczonym czasie. Do stworzenia plików użyto strony <http://www.gpsies.com/createTrack.do> która udostępnia graficzny interfejs do zaznaczania punktów na mapie oraz określenia z jaką prędkością chcielibyśmy, aby użytkownik się pomiędzy nimi przemieszczał. Pobrany stamtąd plik następnie trzeba poddać obróbce w postaci usunięcia kilku linii, aby był wspierany przez symulację lokalizacji w systemie iOS.

5.3. Opis stworzonej strony internetowej

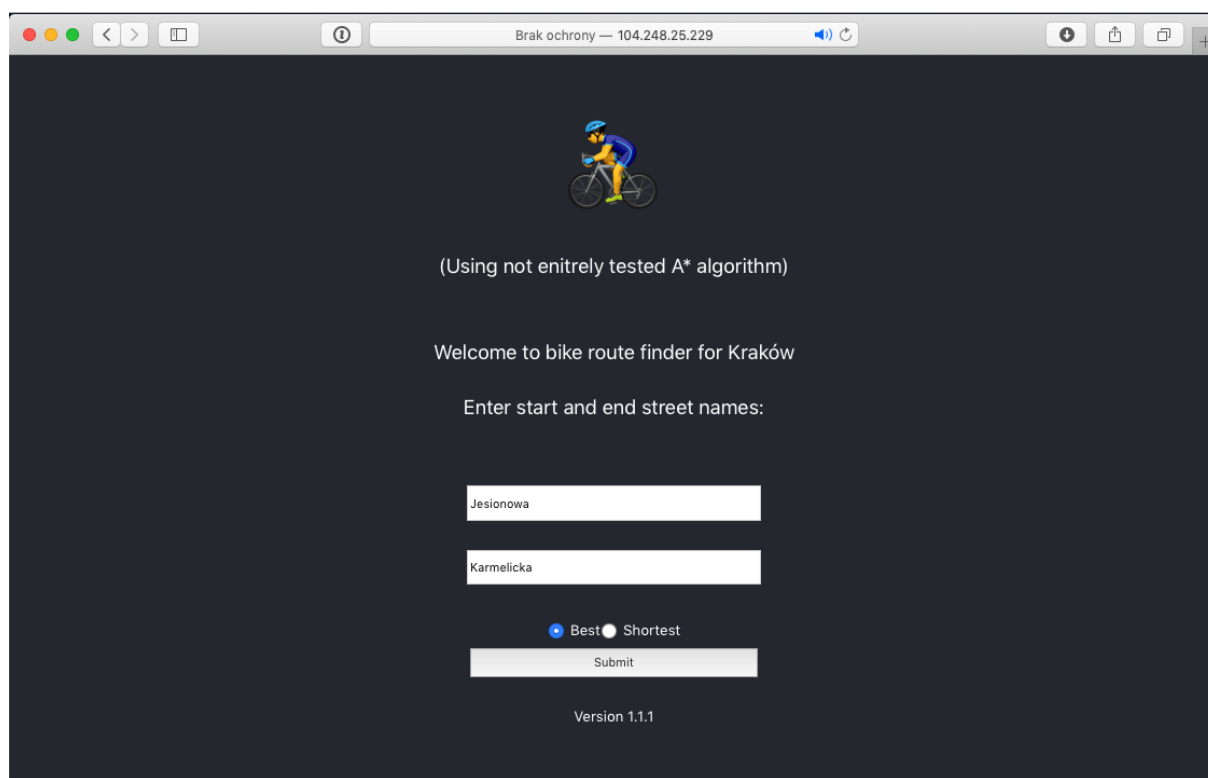
5.3.1. Opis technologii i użytych bibliotek

W ramach projektu została zaimplementowana także strona internetowa, która w intuicyjny sposób pozwala użytkownikowi wyszukać trasę pomiędzy wpisanymi adresami oraz wyświetla ją na mapie. Aplikacja została stworzona w oparciu o bibliotekę ReactJS, która pozwala w szybki sposób zbudować prototyp strony internetowej przy użyciu języka Javascript oraz predefiniowanych elementów strony, takich jak przyciski czy pola tekstowe. Do wyświetlenia map użyto map udostępnionych przez *openstreetmap* używając biblioteki React Leaflet. Leaflet jest to biblioteka umożliwiająca bardzo proste renderowanie map przy użyciu Javascript, React Leaflet dodaje do tego mapy w postaci gotowych komponentów React. Wybór został podyktowany faktem, że prostsze w użyciu i wydajniejsze mapy Google, w celu wyświetlenia przy użyciu języka Javascript, wymagają płatnej subskrypcji. W projekcie strony

internetowej, do zarządzania zewnętrznymi zależnościami, użyto programu yarn, a do zapytań http użyto biblioteki axios. Narzędzia te nie różnią się od tych dla aplikacji serwerowej, dlatego też w tym akapicie pominięto ich opis.

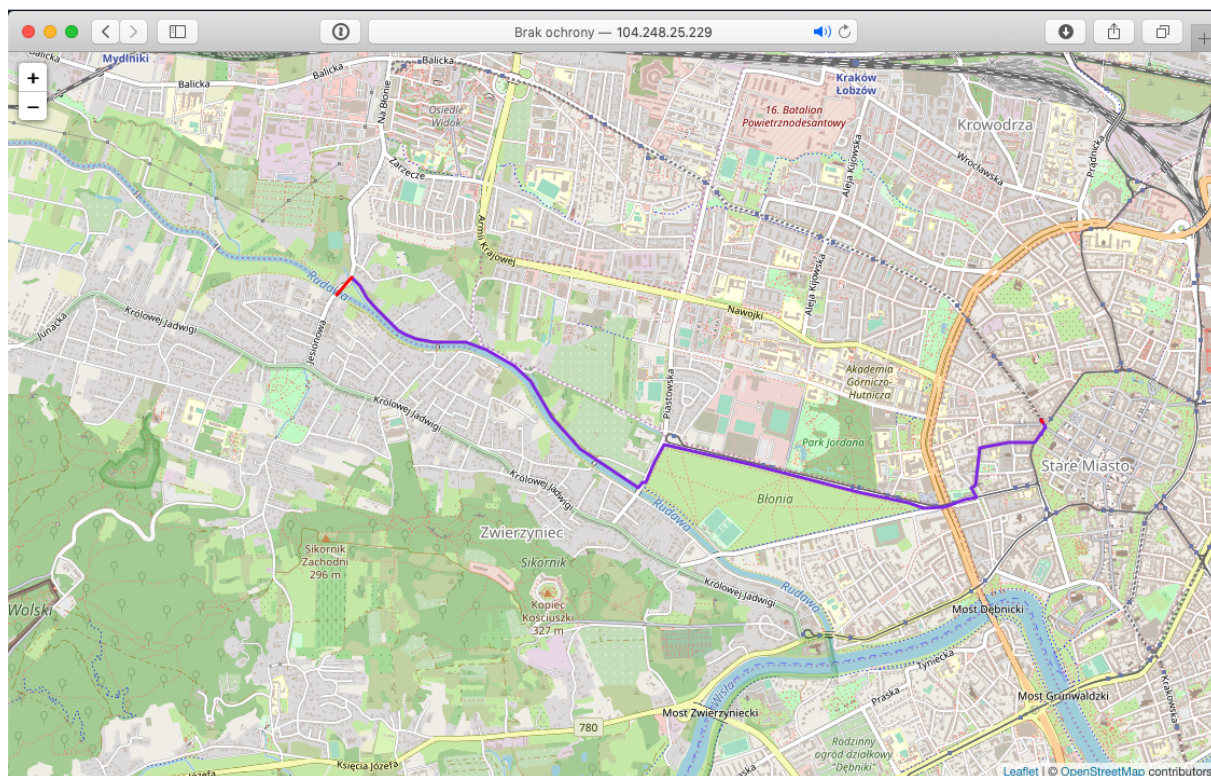
5.3.2. Spis ekranów, opis działania

Aplikacja jest nieskomplikowana, składa się z dwóch ekranów. Na pierwszym z nich są przedstawione dwa pola tekstowe oraz przycisk umożliwiający wyszukanie trasy. Jej wygląd przedstawiono na poniższej ilustracji.



Rys. 5.8. Ekran domowy strony internetowej.

Kolejny z ekranów ma zaimplementowaną logikę pobierania trasy w zależności od stanu przekazanego do niego z ekranu wpisywania danych. Wykorzystując bibliotekę axios wykonuje zapytanie pod endpoint „visualizationPoints” zawierając w kwerendzie wymagane dane. Zwrócona odpowiedź w formacie JSON zawiera zbiór wszystkich punktów na mapie, które należy ze sobą połączyć, aby przedstawić użytkownikowi wizualizację wyznaczonej ścieżki. Ścieżka przedstawiona jest na mapie obejmującej całość ekranu.



Rys. 5.9. Ekran strony internetowej z zaznaczoną trasą.

6. Analiza otrzymanych wyników

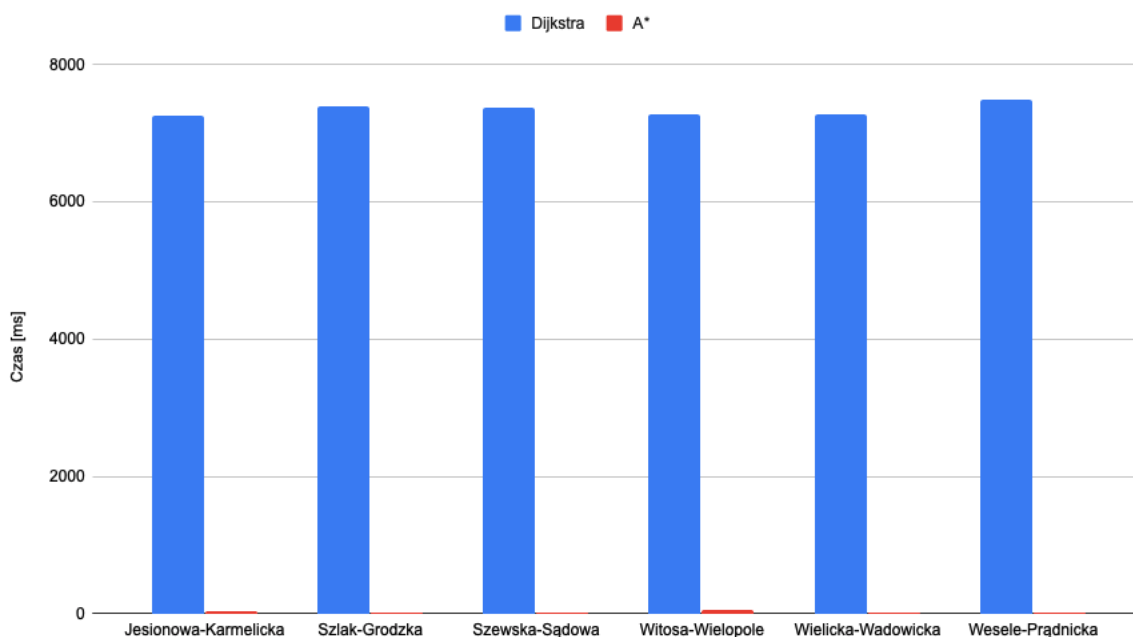
6.1. Analiza działania użytych algorytmów

W celu implementacji algorytmu wyszukania optymalnych tras, w aplikacji została zaimplementowana obsługa kilku algorytmów wyszukiwania ścieżek w grafie. Standardowo aplikacja korzysta tylko z jednego z nich, implementacja ma na celu tylko ich porównanie. W poniższych akapitach przedstawiono testy porównawcze prędkości działania algorytmów podczas wyznaczania tras pomiędzy zestawem wybranych losowo punktów na mapie Krakowa. W celu heterogenizacji wyznaczonych tras, punkty początkowe i końcowe każdej z nich zostały dobrane w taki sposób aby pokryły odpowiedni obszar Krakowa a także przebiegały w miejscach gęsto i luźno obstawionych przez ścieżki zawarte w posiadanym zbiorze danych. Z tego powodu niektóre z nich przebiegają w okolicach rynku, a inne przez Wolę Justowską gdzie jedyną ścieżką w posiadanym zbiorze jest droga po wale rzeki Rudawy. Obydwa z zaimplementowanych algorytmów gwarantują każdorazowo wyznaczenie optymalnej trasy, nie kończą przeszukiwania po uzyskaniu pierwszej znalezionej trasy, stąd porównanie można uznać za miarodajny wynik złożoności obliczeniowej każdego z algorytmów.

6.1.1. Porównanie działania algorytmu z wykorzystaniem algorytmu Dijkstra i A*

Na poniższym wykresie zestawiono czasy działania obydwu algorytmów wraz z opisem trasy dla której każdy z czasów został wyznaczony.

Porównanie czasu wykonania algorytmu Dijkstra i A*

**Rys. 6.1.** Czasy wykonania algorytmu Dijkstra i A* dla wybranych danych testowych.

Z wykresu można odczytać że algorytm A* sprawdza się nieporównywalnie lepiej w stosunku do algorytmu Dijkstra w kontekście czasu wykonania. Z wykresu ciężko nawet odczytać różnice w czasie działania ze względu na minimalny wkład czasów osiągniętych przez A*. W najgorszym z zaprezentowanych przypadków jego działanie było około 200 krotnie szybsze, w najlepszym z przypadków różnica w prędkości działania była prawie 500 krotna. Z powyższego zestawienia jasno wynika, że do produkcyjnego zastosowania w aplikacji w porównaniu z algorytmem Dijkstra nadaje się tylko algorytm A*. Jest on za to znacznie bardziej czasochłonny w implementacji, stąd jego zastosowanie do zdecydowanie mniej złożonych grafów może być korzystniejsze. W celu zminimalizowania czasu wykonywania algorytmu Dijkstra można było zastosować odpowiednie zmniejszenie grafu na podstawie filtracji wierzchołków które znajdują się wewnątrz obszaru na mapie zawartego przez punkt końcowy i początkowy. Jednak ze względu na brak potrzeby optymalizacji i odpowiednią wizualizację różnic czasu działania zaniechano tej modyfikacji. W przypadku przeszukania grafu w którym wierzchołki mogą być określone jako punkty na mapie, algorytm A* jest zdecydowanie szybszy ze względu na prostotę wyznaczenia heurystyki. W tym wypadku przewidywanie czy droga zbliża się do końca może być określone przez wyznaczenie odległości pomiędzy ma złożoność obliczeniową $O(1)$ i polega na wyznaczeniu odległości pomiędzy kolejnym sprawdzanym wierzchołkiem a punktem końcowym trasy. Dzięki temu, w przeciwieństwie do algorytmu Dijkstra, A* nie prowadzi przeszukania całego grafu przed wyznaczeniem optymalnej ścieżki a ogranicza się jedynie do przeszukania szeregu dróg które prowadzą pomiędzy punktem końcowym i początkowym. Ogólną złożoność obliczeniową algorytmu A* przedstawiono poniższym wzorem.

// tutaj wzór na złożoność ogólną A*

Dla przykładu algorytmu użytego w aplikacji może zostać wyznaczona wzorem:

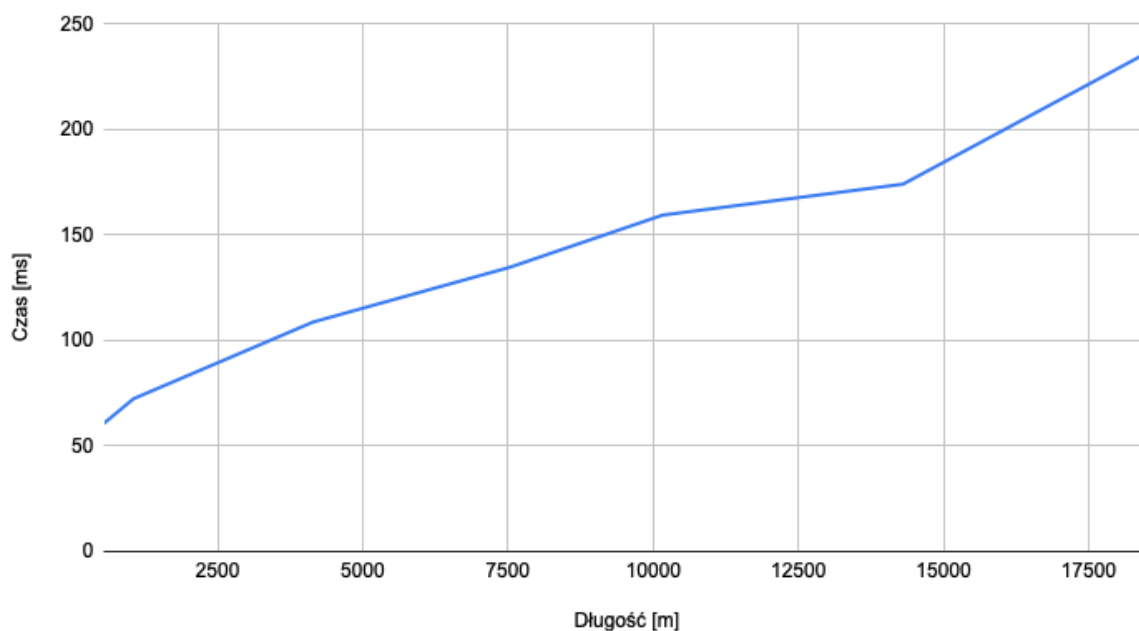
// tutaj wzór na złożoność A* w tym przypadku.

Na podstawie wzoru widać że złożoność algorytmu A* w dużej mierze zależy od złożoności obliczeniowej wyznaczenia heurystyki. W przypadku gdy proces ten przedstawiał by się złożonością obliczeniową $O(n^2)$, algorytm działał by z prędkością porównywalną do algorytmu Dijkstra.

6.1.2. Czas działania algorytmu A* i Dijkstra w zależności od długości trasy

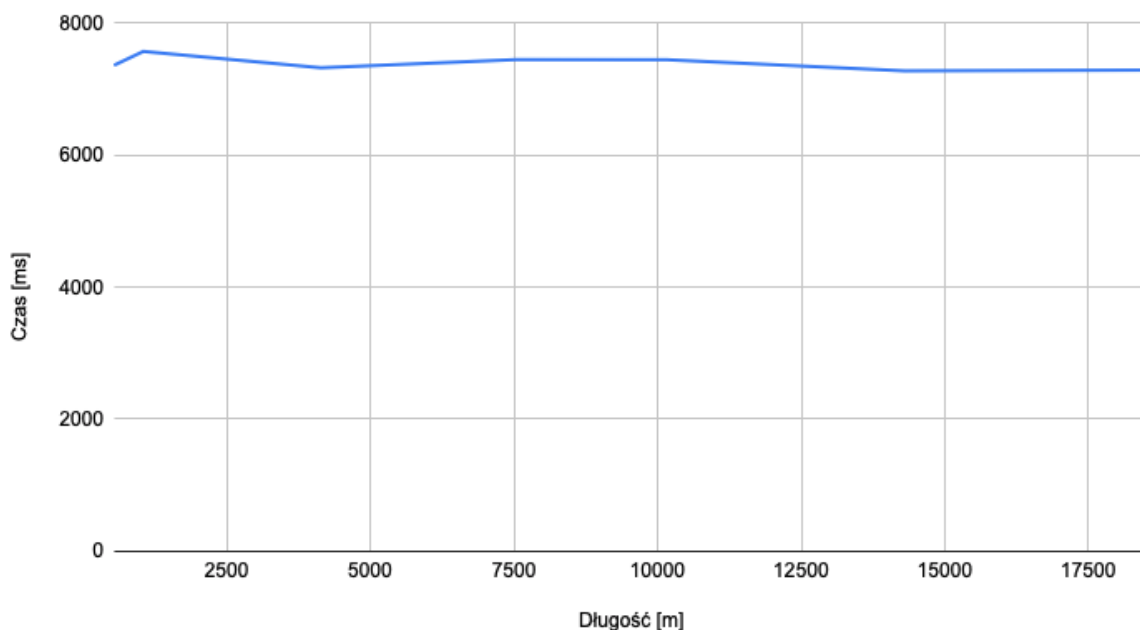
Na poniższych wykresach przedstawiono czas działania algorytmu A* i Dijkstra w zależności od obszaru objętego przeszukiwaniem. W tym celu na terenie Krakowa wyznaczono zestaw tras w zakresie od bardzo krótkich, obejmujących tylko kilkaset metrów do takich obejmujących teren całego Krakowa.

Prędkość działania A* w stosunku do długości trasy



Rys. 6.2. Czas wykonywania algorytmu A* w zależności od długości wyznaczonej trasy.

Prędkość działania Dijkstra w stosunku do długości trasy.



Rys. 6.3. Czas wykonywania algorytmu Dijkstra w zależności od długości wyznaczonej trasy.

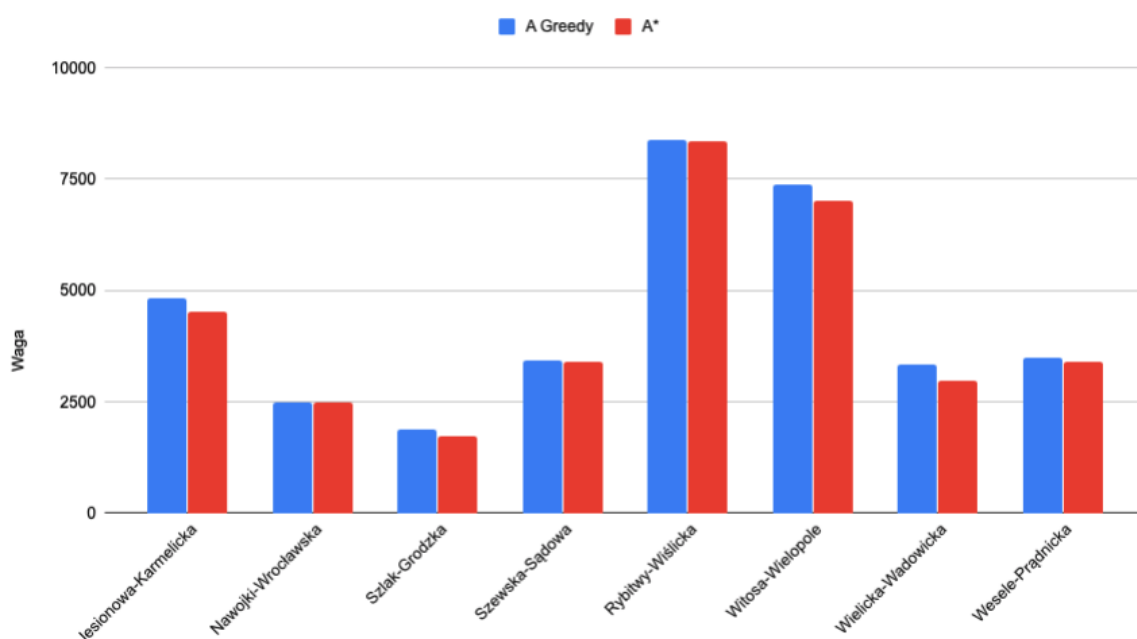
Z przedstawionych wykresów można odczytać że czas działania algorytmu Dijkstra nie zależy od długości wyznaczonych tras. Delikatne fluktuacje czasu wykonania zależą od aktualnego użycia pamięci i procesora komputera podczas wykonywania testu. Jest to spowodowane zasadą działania algorytmu Dijkstra, który w każdym przypadku w pierwszej kolejności wykonuje obliczenia najkrótszych ścieżek pomiędzy wszystkimi wierzchołkami grafu. Przeciwny przypadek obowiązuje dla algorytmu A* który dzięki zastosowaniu heurystyki jest w stanie wykryć gdy najkrótsza ścieżka została już odnaleziona i zatrzymać przeszukiwanie w odpowiednim przypadku. Z tego powodu w zależności od obszaru grafu obejmowanego przez przeszukiwanie, algorytm A* wykazuje znaczny, liniowy wzrost czasu wykonania.

6.1.3. Porównanie algorytmu zachłannego A* i standardowej implementacji A*

Kolejnym etapem analizy jest określenie czasu oraz jakości działania algorytmu zachłannego A* w stosunku do podstawowej wersji A*. W przeciwieństwie do standardowej implementacji, algorytm zachłanny, zyskując na czasie wykonania, nie gwarantuje wyznaczenia optymalnej ścieżki pomiędzy wierzchołkiem początkowym i końcowym. Bazując na przekazanej heurystyce, stara się wyznaczyć najlepsze lokalne rozwiązania podzbiorów składających się na wynikową trasę, następnie łączy uzyskane podzbiory w celu wyznaczenia trasy. W poniższych akapitach zawarto analizę czasu wykonania oraz

wyznaczonych wag tras w zależności od typu algorytmu. Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie wag tras wyznaczonych przez obydwa algorytmy dla uprzednio wyznaczonego zestawu ścieżek testowych.

Porównanie wag wyznaczonych przez algorytmy A* oraz A* zachłanny.

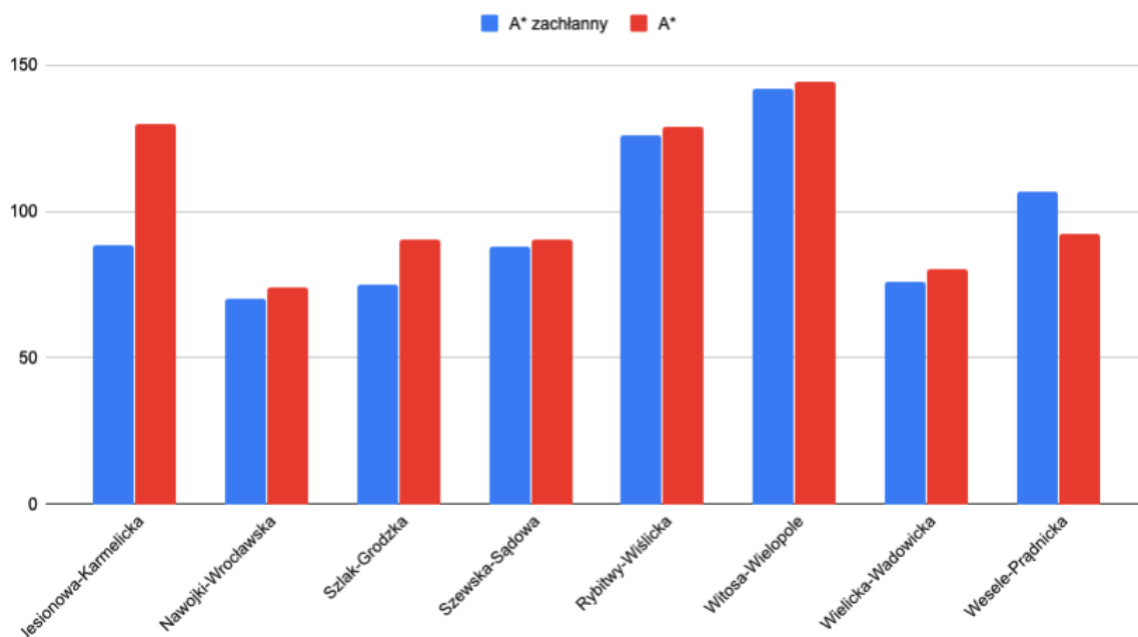


Rys. 6.4. Zestawienie wag wyznaczonych przez algorytm A* oraz A* zachłanny dla wybranego zestawu danych testowych.

Korzystając z wartości przedstawionych na powyższym wykresie można odczytać że poza przypadkiem bardzo krótkiej drogi pomiędzy ulicami Nawojki i Wrocławską, zachłanna odmiana algorytmu A* w każdym wypadku wyznaczyła trasę która z punktu widzenia waga jest gorsza niż ta wyznaczona przez standardową odmianę algorytmu A*.

Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie czasu działania dla uprzednio wyznaczonego zestawu testowych ścieżek.

Porównanie czasów wyznaczania tras przez algorytmy A* oraz A* zachłanny.



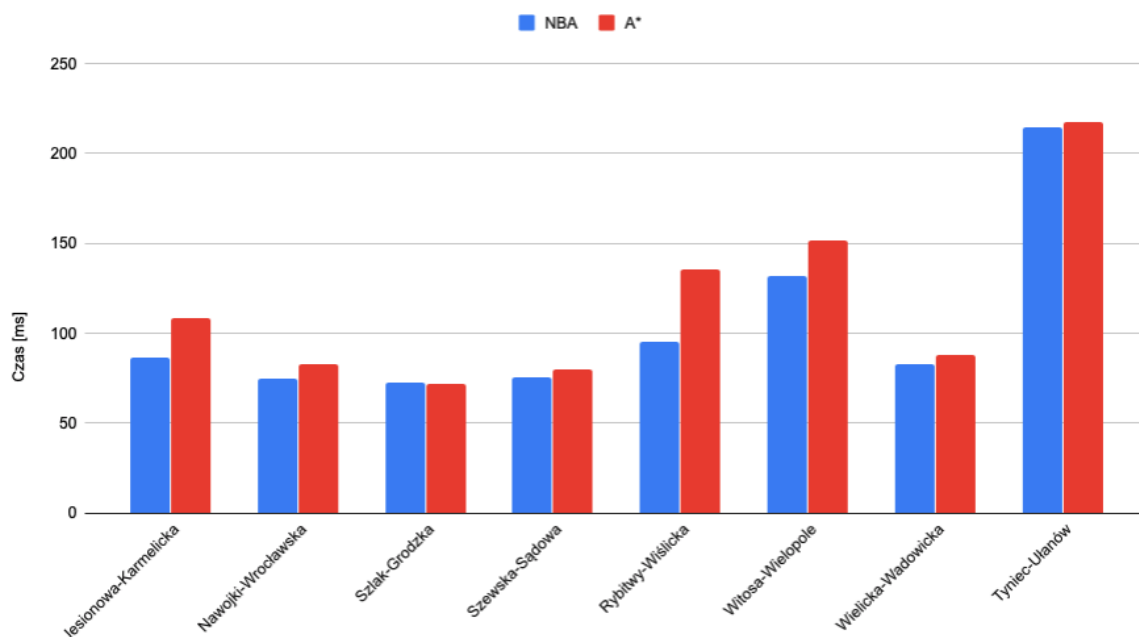
Rys. 6.5. Zestawienie czasów wykonania algorytmów A* oraz A* zachłannego dla wybranego zestawu danych testowych.

Za wyjątkiem jednego przypadku, który może być spowodowany chwilową mniejszą wydajnością maszyny na której działały testy, algorytm zachłanny uzyskał lepszy średni czas wyznaczania trasy. Jest to spodziewane, ponieważ algorytm ten w swojej zasadzie działania stara się optymalizować czas wykonania kosztem jakości. Różnice w czasie działania dla większości przypadków są bardzo niewielkie, sumując je z brakiem gwarancji wyznaczenia trasy optymalnej, algorytm zachłanny A* nie znajduje zastosowania do użycia w stworzonym algorytmie.

6.1.4. Porównanie algorytmu NBA i standardowej implementacji A*

W celu dalszej analizy możliwych usprawnień dla czasu działania algorytmu, został zaimplementowany i porównany także algorytm NBA* (New Bidirectional A*). Jest to odmiana algorytmu A* który w celu optymalizacji czasu działania jednocześnie rozpoczyna swoje wykonywanie z punktu końcowego do punktu początkowego oraz w przeciwną stronę. Złożoność obliczeniowa wykonania obydwu algorytmów pozostaje taka sama, jednak istnieje możliwość wykonywania dwóch algorytmów przy wykorzystaniu dwóch rdzeni procesora, dzięki czemu czas obliczeń ulega znacznej poprawie. W przeciwieństwie do algorytmu zachłannego, algorytm NBA gwarantuje każdorazowe wyszukanie optymalnej trasy w grafie. Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie czasów działania algorytmów. W celu otrzymania porównywalnych wyników, porównania zostały także przeprowadzone dla tego samego zestawu danych testowych.

Porównanie czasu wykonania algorytmu A* oraz NBA



Rys. 6.6. Zestawienie czasu wykonania algorytmu A* oraz NBA dla wybranego zestawu danych testowych.

Z uzyskanych wyników można odczytać że algorytm NBA daje możliwość uzyskania nieznacznie mniejszych czasów obliczeń. Same różnice nie są duże, ale znikomym nakładem pozwalają nieznacznie obniżyć wykorzystanie zasobów serwera w przypadku gdy aplikacja jest używana przez znaczną ilość ludzi. Z wykresu można także odczytać nieznaczny trend w kierunku zwiększenia różnic wykonania algorytmu w przypadku gdy trasy są dłuższe. Jest to spowodowane faktem że zasoby czasowe potrzebne na alokację oraz rozpoczęcie procedury przeszukiwania grafu z obydwu stron mogą być skompensowane przez rzeczywisty zysk uzyskany przez samą procedurę przeszukiwania. Czas obliczeń dla tras o długości 800-2000m jest w przypadku obydwu algorytmów prawie taki sam.

6.1.5. Przeprowadzenie testu warunków skrajnych dla aplikacji serwerowej w zależności od zastosowania algorytmu A* lub NBA

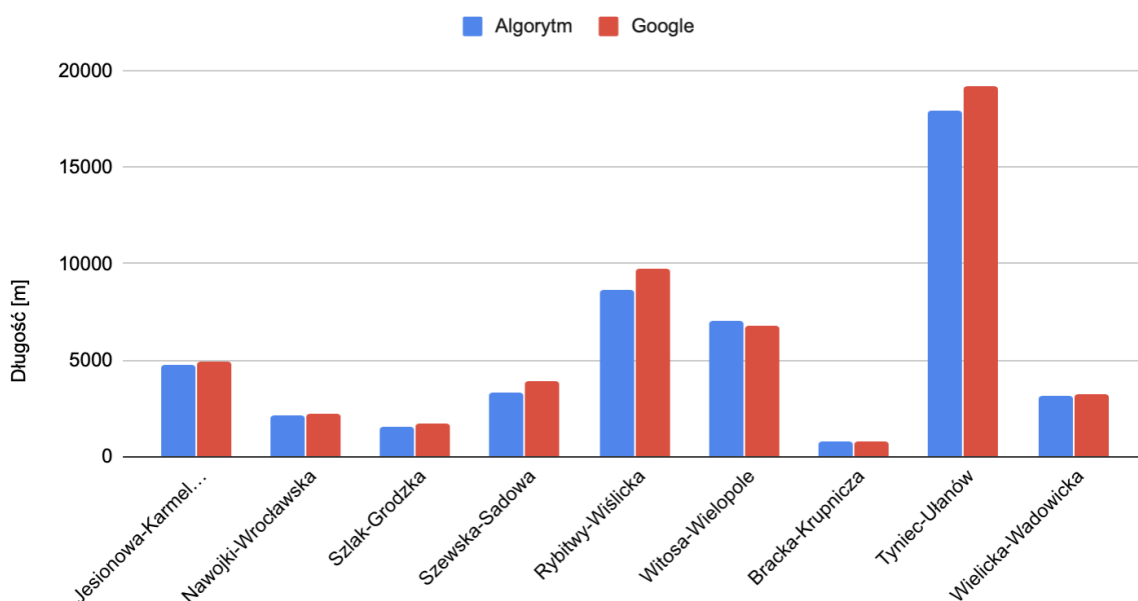
Korzystając z wiedzy odnośnie czasu wykonywania oraz jakości analizowanych algorytmów, zostały z nich wybrane dwa, które gwarantują wyszukanie optymalnej ścieżki w grafie, nie tylko bliskiej rozwiązaniu optymalnemu jak w przypadku A* zachłannego, oraz gwarantują czas wykonywania umożliwiający swobodne działanie aplikacji w środowisku produkcyjnym. W tym kroku został także odrzucony algorytm Dijkstra jako że jego wykonanie uniemożliwiałoby swobodne korzystanie z aplikacji przez użytkowników. Dla wybranych algorytmów, A* i NBA, zostały przeprowadzone przy użyciu narzędzia Apache Benchmark testy wydajności opierające się o wykonywanie określonej dużej liczby zapytań do

aplikacji serwerowej. Wyniki przeprowadzonych pomiarów, wraz z wykresem użycia zasobów CPU serwera zostały przedstawione w poniższym zestawieniu.

6.2. Porównanie wyników w stosunku do tras wyznaczonych przez Google Maps

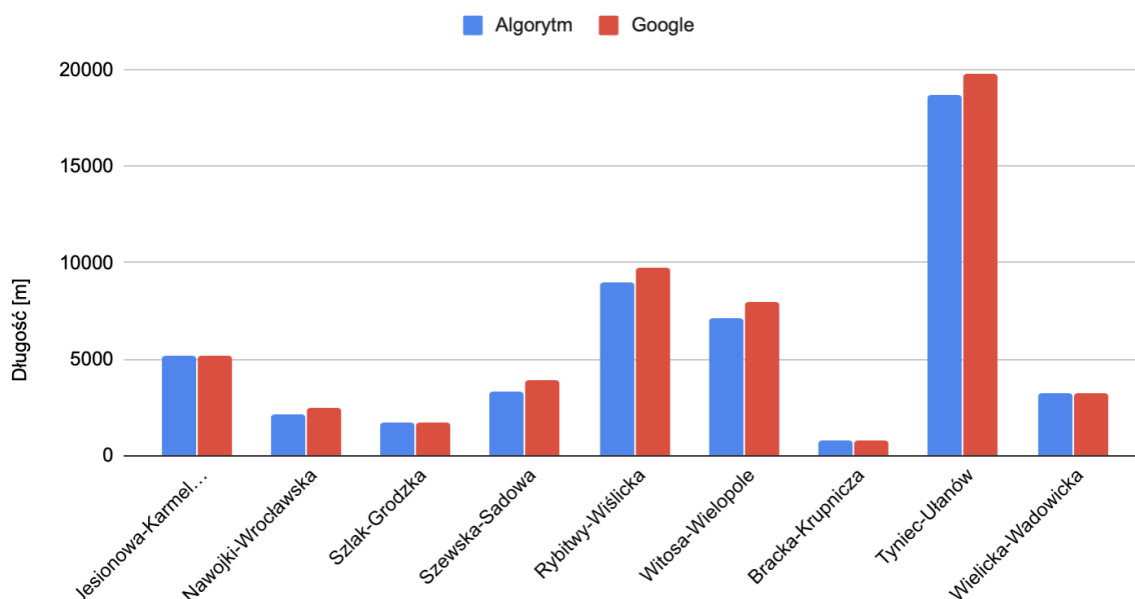
W celu przedstawienia rzeczywistego kontekstu dla przeprowadzanych pomiarów, w ostatnim punkcie analizy dokonano analizy tras wyznaczanych przez stworzoną aplikację w stosunku do tych wyznaczanych przez najbardziej popularną wyszukiwarkę tras zarówno samochodowych jak i rowerowych lub pieszych oferowaną przez Google Maps. Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie długości wyznaczonych tras w zależności od wybranej opcji trasy, najkrótszą lub najlepszą, z odpowiadającą temu trasą Google.

Porównanie najkrótszej trasy wyznaczonej przez Google oraz zaproponowany algorytm.



Rys. 6.7. Porównanie długości tras wyznaczonych przez aplikację oraz Google Map przy wyborze najkrótszej trasy.

Porównanie najlepszej trasy wyznaczonej przez Google oraz zaproponowany algorytm.



Rys. 6.8. Porównanie długości tras wyznaczonych przez aplikację oraz Google Map przy wyborze najlepszej trasy.

Z powyższych porównań można odczytać, że w znacznej większości przypadków, zaproponowany algorytm wyznaczył trasy krótsze niż wyszukiwarka Google. W przypadku nieznacznych różnic może to być spowodowane przez różne poprowadzenie punktów na mapie składających się na drogi, można jednak znaleźć 3 przypadki w których trasy zostały poprowadzone inaczej i skutkowało to ich skróceniem. Dodatkowym zyskiem podczas korzystania z zaproponowanego rozwiązania jest pewność że użytkownik zostanie poprowadzony przez drogie dla rowerów lub miejsca umożliwiające swobodne poruszanie się na rowerze. W przypadku map Google trasa wyznaczana jest także po ulicach bez zmniejszonych ograniczeń prędkości. Niestety dostęp do algorytmu wyznaczania tras przez aplikację Google jest zamknięty, nie jesteśmy w stanie bezpośrednio porównać działania obydwu algorytmów, możemy jednak na podstawie obserwacji przewidywać że różnica w działaniu na rzecz rozwiązania będącego przedmiotem tej pracy jest spowodowana głównie brakiem odpowiednich danych odnośnie dróg typu kontrapas poprowadzonych w przeciwnym kierunku w stosunku do jednokierunkowych ulic dla samochodów.

7. Wnioski i możliwe dalsze usprawnienia

Podczas tworzenia rozwiązania zaproponowanego jako część powyższej pracy, zostało napotkanych mnóstwo przeszkód oraz przypadków brzegowych w których algorytm nie funkcjonował poprawnie. Większość tych przypadków była spowodowana brakiem kontekstu geograficznego przy łączeniu punktów na mapie podczas poszukiwania przyległości wierzchołków w procesie tworzenia grafu używanego dalej przy wyszukiwaniu optymalnych tras. Przy założeniu wyszukiwania przyległości w odległości 30 metrów, algorytm nie był w stanie stwierdzić czy pomiędzy punktami nie znajduje się naturalna przeszkoda jak na przykład płot lub ciek wodny. Także poza prostym przewidywaniem nie jest w stanie stwierdzić, czy łączone wierzchołki znajdują się na tej samej wysokości lub nie ma pomiędzy nimi przepaści, tutaj za przykład można podać wykrywanie skrzyżowań pomiędzy trasą znajdującą się na moście oraz drogą przebiegającą pod nim. Dodatkowym problemem był także brak pewności co do poprawności wag przyznawanych każdej z dróg w procesie tworzenia grafu. Dane te były dobierane na podstawie eksperymentów i wielu iteracji testów przeprowadzonych podczas tworzenia rozwiązania.

Jedynym sposobem na pewność że trasy są poprawnie ze sobą połączone oraz mają poprawnie przypisane wagi jest stworzenie narzędzia do ręcznego wprowadzania tras oraz łączenia ich wierzchołkami które będzie jednocześnie prezentowało je w czasie rzeczywistym zaznaczone na mapie. W ten sposób, dodając do procesu prosty sposób edycji wprowadzonych danych dla przypadków brzegowych oraz wykluczając maszynowe tworzenie wierzchołków, można uzyskać pewność że użytkownik zostanie w każdym przypadku poprawnie nawigowany na trasie. W analizowanych zbiorze danych geo-przestrzennych znajduje się 1040 dróg, przeniesienie ich przez człowieka przy użyciu stworzonego dedykowanego rozwiązania nie powinno być czasochłonne.

Dodatkowym zyskiem z zastosowania opisanego wcześniej usprawnienia jest możliwość nadania użytkownikom prawa do samodzielnej edycji danych znajdujących się w grafie. Wymaganie to jest spowodowane bardzo rzadką aktualizacją danych przez miasto Kraków w portalu zikit.carto.com. W momencie pisania pracy, ostatnie aktualizacja zbioru dróg rowerowych miała miejsce w lipcu roku 2018 co niesie za sobą konsekwencje braku wielu tras istniejących już na mapie miast Kraków. Jednym z dalszych proponowanych usprawnień działania projektu jest także dodanie strony umożliwiającej wprowadzanie przez użytkowników nowych tras, połączonych z istniejącą infrastrukturą, które mogą być akceptowane i dołączane do zbioru tras w grafie przez zarządcę systemu z poziomu panelu administracyjnego.

Z punktu widzenia analizy zastosowanych algorytmów trasowania, rozwiązaniami bliskimi optymalnemu są zarówno algorytmy A* jak i NBA, reszta analizowanych algorytmów nie gwarantowała optymalnego rozwiązania, co jest w przypadku analizowanego systemu parametrem kluczowym, lub działała zdecydowanie zbyt wolno aby mieć realne zastosowanie. Obydwa wymienione algorytmy gwarantują czas przeszukiwania grafu w celu znalezienia najkrótszej ścieżki w czasie który nie obciąża zbytnio serwera i jest komfortowy dla użytkownika w kontekście czasu ładowania się strony internetowej zawierającej trasę. Różnice w zastosowaniu obydwu wymienionych algorytmów mają znaczenie tylko w zastosowaniu globalnym, gdy z zaproponowanej aplikacji serwerowej będzie korzystać znaczna ilość użytkowników. W takim wypadku zmniejszenie kosztów utrzymania infrastruktury nawet o kilka procent gwarantuje znaczne zyski. W przypadku analizy algorytmów dla dużej skali działania oprogramowania, lepszym rozwiązaniem wydaje się być algorytm A* w swojej standardowej odmianie. W kontekście czasu obliczeń algorytm NBA nie gwarantuje znacznej poprawy działania, rezerwuje za to zdecydowanie większe zasoby procesora maszyny na której jest egzekwowany co sprawia że ustępuje na tym polu algorytmowi A*. Dla skali rozwiązania zaproponowanego w powyższym opracowaniu, algorytmy są sobie równe.