

mgr inż. Sebastian Ernst

Metody sztucznej inteligencji dla planowania odpornych tras w czasie rzeczywistym*

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Spis treści

1. Wprowadzenie	1
2. Problemy współczesnych rozwiązań służących do planowania trasy	2
2.1. Charakterystyka zadania	2
2.2. Dziedzina planowania	3
2.3. Wymagania dotyczące rozwiązania	4
2.4. Teza pracy	4
3. Kompilacja wiedzy i odporne planowanie trasy	4
3.1. Planowanie optymalne a planowanie odporne	5
3.2. Planowanie odporne poprzez kompilację wiedzy	5
3.3. Reprezentacja wiedzy	7
3.4. Wykonanie planów odpornych	8
3.5. Ograniczenia prostego odpornego planowania tras	8
4. Granule jako metoda poprawy skalowalności	8
4.1. Wytaczanie granul	10
4.2. Nawigacja wewnątrz granuli	10
4.3. Struktury zawierające wiele granul	11
5. Podsumowanie	11
Literatura	12

1. Wprowadzenie

Problem wytaczania trasy przejazdu jest praktycznym zagadnieniem, znajdującym zastosowanie od czasów pierwszych podróży dokonywanych przez człowieka. Przed epoką komputerów, do ręcznego rozwiązywania tego problemu służyły mapy; rozwiązania informatyczne pozwoliły na automatyzację tego procesu. Pierwotne aplikacje wspierające planowanie trasy używane były przed rozpoczęciem podróży.

Pierwotnie, systemy wspomagające planowanie trasy miały postać aplikacji działających na komputerze, takich jak AutoRoute Express na początku lat dziewięćdziesiątych. Oczywiście, nie były one w stanie wspierać kierowcy podczas wykonania planu – realizowały one więc jedynie fazę *wytaczania planu*. Osobne aplikacje zostały dziś wyparte przez systemy działające za pośrednictwem sieci WWW, takie jak Google Maps¹, co eliminuje potrzebę aktualizacji map używanych do wytaczania trasy przez użytkownika.

Sam problem planowania trasy może zostać podzielony na dwie fazy. *Wytaczanie planu* ma miejsce przed rozpoczęciem podróży i polega na przygotowaniu wskazówek dla kierowcy. Podczas podróży mamy do czynienia z fazą *wykonywania planu*. Jeżeli z jakichś powodów instrukcje zawarte w planie nie mogą być wykonane, konieczne jest wy-

* Tytuł oryginalny: *Artificial Intelligence Methods in Real-Time Robust Route Planning*.

¹ <http://maps.google.com>

tyczenie nowego planu, biorącego pod uwagę nowe ograniczenia.

Osiągnięcia ostatnich lat, dzięki rozwojowi technologii mobilnych i udostępnieniu systemu pozycjonowania GPS, pozwoliły na bardziej czynne wspieranie nawigacji. Urządzenia i aplikacje służące do tzw. nawigacji satelitarnej są szeroko dostępne i stały się bardzo popularne. W odróżnieniu od prostych systemów planowania trasy, rozwiązania te realizują zarówno fazę *wytyczania planu*, jak i jego *wykonania*. Użyteczność systemów nawigacji satelitarnej jest niekwestionowana jeżeli kierowca nie napotyka przeszkód w wykonaniu planu; problemy pojawiają się, gdy pierwotny plan nie może zostać wykonany. Zarys tych problemów przedstawiono w kolejnej sekcji.

2. Problemy współczesnych rozwiązań służących do planowania trasy

Użyteczność urządzeń do nawigacji GPS spada drastycznie gdy kierowca napotyka na przeszkodę w wykonaniu planu lub popełnia błąd. Dzieje się tak, gdyż aplikacje stosowane do nawigacji projektowane są jako systemy podejmujące decyzje, a nie jako systemy *wspierające* podejmowanie decyzji przez kierowcę. Jest to uwarunkowane stosowaniem klasycznego podejścia do planowania trasy, polegającego na wytyczaniu ścieżki w grafie reprezentującym sieć dróg.

Problemy te są szczególnie widoczne w środowiskach miejskich, gdzie dokładność pozycjonowania GPS [1, 5] i siła wyrazu interfejsu [7] ujawniają swoje braki.

Rozważmy sytuację, gdy kierowca korzystający z klasycznego systemu nawigacji wykona manewr inny niż przewidywany przez wytyczoną trasę. Jedynym sprzężeniem zwrotnym od kierowcy do urządzenia jest pozycja pojazdu określana przez odbiornik GPS. Ponieważ jednak pozycja ta aktualizowana jest co 1-2 sekundy, pojazd może pokonać znaczny odcinek przed jej ponow-

nym określeniem. Dane GPS obarczone są też sporym błędem, aplikacje wyposaża się więc w algorytmy jego usuwania, polegające na *zakładaniu*, że pojazd wciąż porusza się wzdłuż pierwotnego rozwiązania. Algorytmy te wprowadzają dodatkowe opóźnienie.

Wyszukiwanie rozwiązania alternatywnego inicjalizowane jest dopiero gdy aplikacja „uzna” odstępianie od trasy pierwotnej. Samo wytyczanie może być procedurą długotrwałą, co w gęstej sieci miejskich ulic może doprowadzić do sytuacji, w której pojazd dociera do kolejnego punktu decyzyjnego, a kierowca w dalszym ciągu pozostawiony jest bez wskazówek. Mówimy wtedy o *nie spełnieniu ograniczeń czasowych dotyczących dostarczenia instrukcji do wykonawcy planu*.

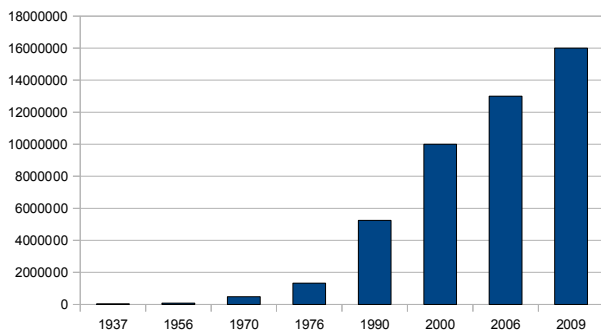
2.1. Charakterystyka zadania

Jak wspomniano w sekcji 1, klasyczne rozwiązania służące do planowania trasy napotyka na szereg problemów, związanych przede wszystkim z charakterystyką zadania wytyczania i wykonania planu. Poniższe punkty określają cechy zadania nawigacji, które stanowią podstawę projektowania systemów je wspomagających.

Nieprzewidywalność. Środowisko, w którym przeprowadzane jest planowanie, jest nieprzewidywalne. Czas przejazdu można przewidzieć w przypadku dobrze rozwiniętych sieci autostrad; wartości te rzadko znajdują odzwierciedlenie w rzeczywistości w przypadku dużych miast w godzinach szczytu. Rysunek 1 przedstawia wzrost liczby samochodów zarejestrowanych w Polsce w XX i na początku XXI wieku.

Wykonywanie planu przez jednostkę inteligentną. Instrukcje systemu nawigacji wykonuje najczęściej człowiek, będący w stanie obserwować otoczenie i wybierać na tej podstawie akcje lepsze niż te proponowane przez system.

Ograniczone sprzężenie zwrotne. Kierowca, podczas prowadzenia pojazdu, najczę-



Rysunek 1. Wzrost liczby samochodów zarejestrowanych w Polsce (<http://pl.wikipedia.org>).

ściej nie jest w stanie „poinformować” urzędnika o swoich obserwacjach czy decyzjach.

Brak zrozumienia intencji kierowcy. System nawigacji „dowiaduje” się o akcjach kierowcy tylko na podstawie odczytu pozycji z odbiornika GPS. Ponieważ jednak rozwiązanie alternatywne wytyczane jest dopiero po stwierdzeniu zaburzenia w wykonaniu pierwotnego planu, aplikacja nie jest w stanie odróżnić błędów kierowcy od zamierzonych działań.

Potrzeba natychmiastowego działania. Wykonanie planu prowadzone jest pod twardymi ograniczeniami czasu rzeczywistego – czas, który system nawigacji ma na dostarczenie zaktualizowanych instrukcji po zaburzeniu w wykonaniu planu wynosi od ułamków sekundy do ok. połowy minuty. Jeżeli urządzenie nie jest w stanie dostarczyć rozwiązania w tym czasie, staje się ono bezużyteczne.

2.2. Dziedzina planowania

Dziedziną, w której przeprowadzane jest planowanie jest graf mieszany ważony, tzn. zawierający krawędzie skierowane i nieskierowane. Graf taki najlepiej nadaje się do odzwierciedlenia siatki ulic, składającej się z ulic jedno- i dwukierunkowych. Wagi krawędzi mogą być dobrane do wybranego kryterium optymalności (zob. sekcja 3.1), a więc mogą przedstawiać m.in. długość poszczegól-

nych odcinków lub ich prognozowany czas przejazdu.

Z praktycznego punktu widzenia, dziedziną planowania będą przede wszystkim miasta, często o złożonej strukturze sieci ulic. *Dokładność pozycjonowania i możliwości wyrażenia wskazówek* dostępnych obecnie systemów nawigacji satelitarnej często są niewystarczające aby zapewnić zadowalający poziom wsparcia kierowcy.

Praca w szczególności zajmuje się problemem planowania w środowiskach wykazujących następujące cechy:

1. **Układ nieprzyjazny dla pojazdów.** Miasta budowane przed epoką intensywnego ruchu drogowego projektowane były przede wszystkim z myślą o transporcie pieszym, konnym i kolejowym. Wąskie ulice i gęsta zabudowa nie pozwala na stworzenie rozbudowanej sieci drogowej, o charakterystyce ruchu dającej się lepiej przewidzieć.
2. **Nieprzekraczalne przeszkody.** Rzeki, tory kolejowe i obszary zieleni stanowią przeszkody, które, aby stać się przejezdny, wymagają budowy specjalnych konstrukcji (takich jak mosty i tunele, których ilość z uwagi na wysoki koszt jest często minimalizowana), bądź też znalezienia trasy otaczającej.
3. **Projekt „obronny”.** Tendencja do otaczania zabytkowych miast strukturami obronnymi utrudnia dostosowanie ich do intensywnego ruchu samochodów.
4. **Niehomogeniczna struktura.** Nawigacja jest zadaniem łatwym w miastach o regularnej strukturze, jak Manhattan w Nowym Jorku. Miasta Europejskie, których rozwój rozciągnięty jest nierzadko na setki lat, podzielone są na obszary o bardzo zróżnicowanej gęstości infrastruktury drogowej.
5. **Niepewne warunki drogowe.** Przebudowane ulice tworzą sieć bardzo podatną na powstawanie „wąskich gardeł”. W efekcie, korki drogowe powstają w trudnych do przewidzenia miejscach, często na skutek

dość odległych robót (np. remont ważnego węzła komunikacyjnego na obrzeżach miasta) lub drobnych zmian w sterowaniu ruchem (np. likwidacja „zielonych strzałek” przy „Alejach” w Krakowie w 2009 roku).

6. **Zdolność wykonawcy planu do obserwacji środowiska i wyciągania wniosków.** Kierowca często posiada bogatą wiedzę, opartą na obserwacjach i doświadczeniach, która może stanowić istotną pomoc w wyborze trasy. Stopień złożoności i duże ograniczenia czasowe nie pozwalają jednak na przekazanie tej wiedzy urządzeniu nawigacyjnemu, a ograniczona siła wyrazu urządzenia narzuca kierowcy podążanie za wytyczonym planem i nie pozwala skorzystać z własnej inteligencji.

2.3. Wymagania dotyczące rozwiązania

System nawigacji satelitarnej pozwalający na elastyczną nawigację w częściowo nieprzewidywalnych środowiskach pod twardymi ograniczeniami czasu rzeczywistego narzucenymi przez ruch drogowy powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- **Dostarczanie pełnej informacji:** kierowca powinien widzieć „pełny obraz”, wraz z istotnymi punktami decyzyjnymi na różnych poziomach abstrakcji.
- **Nie narzucanie rozwiązania:** system nawigacji powinien być systemem *wspierającym* podejmowanie decyzji, a nie systemem *podejmującym* decyzje; kierowca powinien mieć wolność wyboru trasy i czytelny przegląd dostępnych alternatyw.
- **Brak interakcji z interfejsem:** kierowca nie ma możliwości informowania urządzenia o swoich decyzjach bezpośrednio; jego intencje powinny być rozpoznawane na podstawie jego działań.
- **Przygotowanie na zmianę planu:** system powinien spodziewać się odstąpienia przez kierowcę od pierwotnego planu i rozpoznawać jego decyzje.
- **Ograniczenia czasowe:** instrukcje *muszą* być wyznaczone i dostarczone do kie-

rowcy na czas, tj. przed dotarciem przez niego do punktu decyzyjnego.

2.4. Teza pracy

Teza pracy została sformułowana w następujący sposób:

Proponowany paradygmat, nazwany *Odpornym Planowaniem Tras* (ang. *Robust Route Planning*), stanowi użyteczne podejście *a priori* do praktycznego wyznaczania planów wielowariantowych, pozwalających na elastyczną nawigację i rzeczywistych, częściowo nieprzewidywalnych środowiskach. Techniki sztucznej inteligencji, takie jak algorytmy przeszukiwania grafu, kompilacja wiedzy oraz granularyzacja wiedzy, pozwalają na generowanie i reprezentację planów odpornych, pozwalających na płynne wykonanie pod twardymi ograniczeniami czasu rzeczywistego narzucenymi przez ruch drogowy.

3. Kompilacja wiedzy i odporne planowanie trasy

Planowanie trasy w obecnie stosowanych systemach przeprowadzane jest w oparciu o proste kryteria. Najczęstsze funkcje celu dostępne w systemach planowania trasy i nawigacji to:

- wyszukiwanie najkrótszej drogi,
- wyszukiwanie drogi o najkrótszym prognozowanym czasie przejazdu,²
- wyszukiwanie drogi o najniższym koszcie.

Wszystkie te kryteria dotyczą planowania *optymalnego*. Wytyczanie planów optymalnych jest podejściem racjonalnym tak długo, jak plany te mogą być wykonywane bez przeszkód. Wystąpienie niespodziewanych trudności w wykonaniu planu optymalnego (takich jak korek uliczny lub inna blokada) po-

² Czas przejazdu obliczany jest najczęściej na podstawie estymat średniej prędkości podróży po drogach różnych kategorii.



Rysunek 2. Przykład interfejsu użytkownika systemu nawigacji spełniającego wymagania postulowane w pracy.

woduje konieczność ponownego przeprowadzenia planowania w celu znalezienia trasy alternatywnej; często (np. na autostradzie) jest to niemożliwe, z uwagi na brak zjazdu.

3.1. Planowanie optymalne a planowanie odporne

Aby lepiej zrozumieć różnice pomiędzy planowaniem odpornym a optymalnym, posłużmy się prostym przykładem. Rysunek 3 przedstawia trzy przykłady trasy wytyczonej na mapie Krakowa. Przykład na rysunku 3(a) to trasa optymalna, gdzie funkcją celu był prognozowany czas przejazdu. Jak widać, trasa ta prowadzi przez most. Jeżeli przed mostem, w punkcie oznaczonym żółtą pinezką, kierowca dostrzeże korek, będzie musiał wrócić do punktu początkowego i kontynuować podróż w kierunku innego mostu. Takie rozwiązanie spowodowałoby wielokrotne wydłużenie rzeczywistego czasu podróży w stosunku do pierwotnej estymaty.

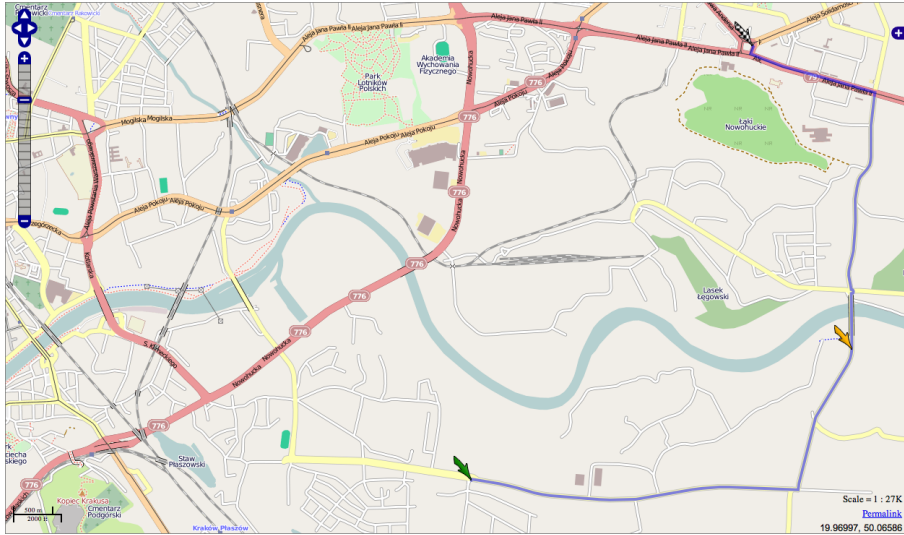
Jeżeli natomiast kierowca zdecydowałby się od razu na rozwiązanie suboptymalne, przedstawione na rysunku 3(b) i również na-

potkał na przeszkodę oznaczoną żółtą pinezką, mógłby skorzystać z rozwiązania alternatywnego przedstawionego na rysunku 3(c), co tylko nieznacznie zwiększyłoby rzeczywisty czas podróży. Takie podejście jest przykładem planowania *odpornego*.

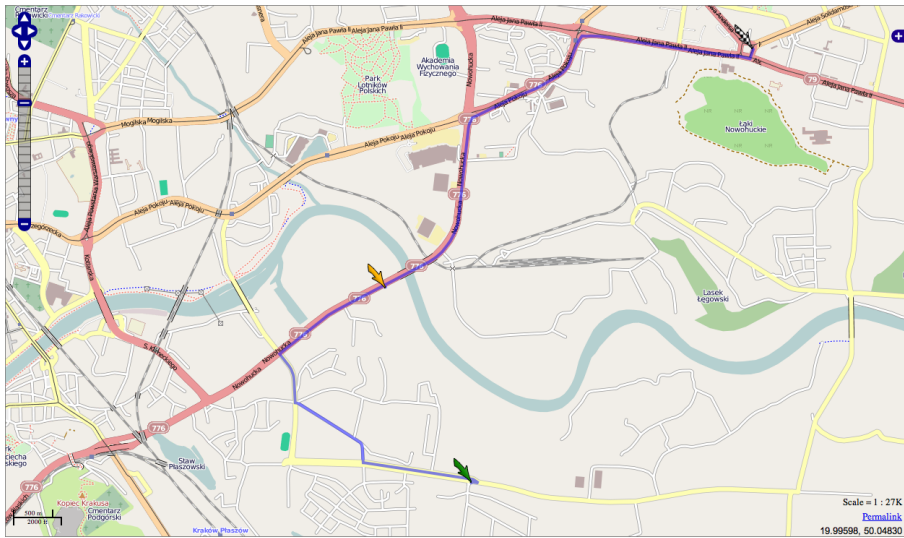
Istniejące systemy nawigacji pozwalają wprowadzić na wybór kryteriów planowania, ale zawsze przeprowadzają planowanie *odporne*. Systemy te stosowane są najczęściej przez kierowcę nie znającego określonego miasta. System nawigacji przedstawia mu tylko jedną opcję, przedstawioną na rysunku 3; nie daje mu więc możliwości wyboru, mimo tego, że trasa alternatywna przedstawiona na rysunku 3(b) jest tylko nieznacznie „gorsza” od trasy optymalnej.

3.2. Planowanie odporne poprzez kompilację wiedzy

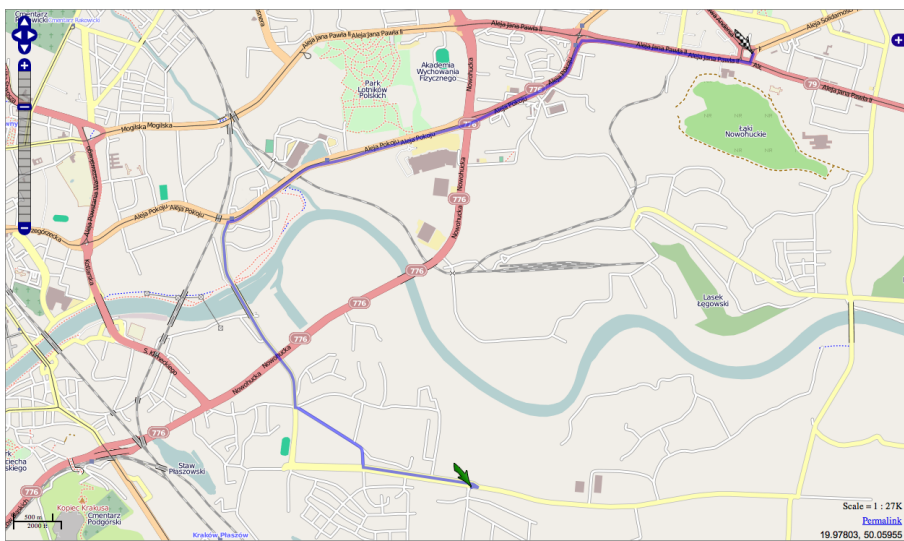
Plan odporny jest w rzeczywistości planem wielowariantowym, który pozwala na dotarcie do rozwiązania wieloma różnymi ścieżkami. Aby wyznaczyć plan odporny na poziomie grafu, wymagane jest znalezienie



(a) Trasa optymalna, ale nie odporna



(b) Odporna trasa suboptymalna



(c) Jedna z alternatyw do trasy suboptymalnej

Rysunek 3. Praktyczny przykład odpornego planowania tras.

wszystkich ścieżek prowadzących z węzła źródłowego do węzła docelowego i znalezienie punktów, w których się one przecinają.

Złożoność obliczeniowa takiego zadania sprawia, że staje się ono niewykonalne w przenośnym urządzeniu o ograniczonej mocy obliczeniowej nawet dla średniej wielkości grafów. Dlatego też zasadnym wydaje się podzielenie planowania na dwie fazy:

- etap *kompilacji wiedzy*, przeprowadzany raz dla danej mapy, niekoniecznie w urządzeniu docelowym,
- etap *wykonania planu*, polegający na pobieraniu odpowiednich fragmentów skompilowanej wiedzy i prezentowaniu ich użytkownikowi.

Odporność danego rozwiązania można ocenić przy pomocy różnych algorytmów. Jednym z najprostszych jest zliczenie liczby dostępnych rozwiązań po podjęciu danej decyzji. Bardziej złożone współczynniki odporności mogą być wyznaczone np. na podstawie twierdzeń teorii informacji dotyczących entropii.

3.3. Reprezentacja wiedzy

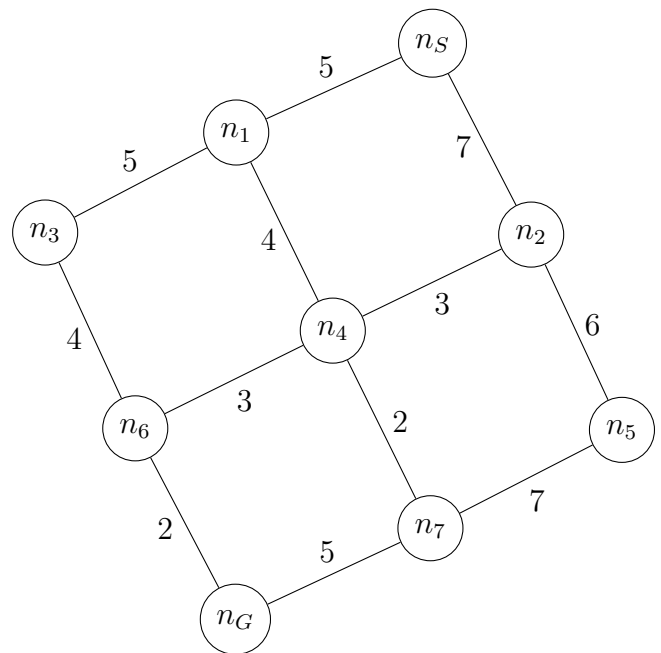
Skompilowana wiedza przechowywana jest w tabelach decyzyjnych. Aby uzyskać wszystkie możliwe plany, wymagane byłoby wyznaczenie planów dla każdego węzła w grafie jako węzła docelowego.

Tabela 1 przedstawia decyzje dla grafu przedstawionego na rysunku 4 i węzła docelowego n_G . Kolejne kolumny oznaczają: aktualny węzeł, decyzję, współczynnik odporności oraz minimalny (optymistyczny) i maksymalny koszt dotarcia do węzła docelowego w przypadku podjęcia danej decyzji.

Sama kompilacja wiedzy może być przeprowadzana przy pomocy różnych algorytmów – od prostych algorytmów przeszukiwania grafu jak np. algorytm Dijkstry [2, 3], aż po złożone algorytmy heurystyczne [4, 6]. Optymalność tego procesu jest drugorzędna, ponieważ kompilacja wiedzy przeprowadzana jest *off-line*.

Tablica 1. Tablica decyzyjna dla planu odpornego prowadzącego z węzła n_S do węzła n_G .

$n_{current}$	d	ρ	g_{min}	g_{max}
n_S	$n_S \rightarrow n_1$	6	14	38
n_S	$n_S \rightarrow n_2$	6	15	37
n_1	$n_1 \rightarrow n_3$	3	11	33
n_1	$n_1 \rightarrow n_4$	3	9	25
n_1	$n_1 \rightarrow n_S$	4	20	32
n_2	$n_2 \rightarrow n_4$	3	8	18
n_2	$n_2 \rightarrow n_5$	3	18	30
n_2	$n_2 \rightarrow n_S$	4	21	31
n_3	$n_3 \rightarrow n_6$	4	6	41
n_3	$n_3 \rightarrow n_1$	7	14	37
n_4	$n_4 \rightarrow n_6$	2	5	42
n_4	$n_4 \rightarrow n_7$	2	7	38
n_4	$n_4 \rightarrow n_1$	2	15	34
n_4	$n_4 \rightarrow n_2$	2	21	26
n_5	$n_5 \rightarrow n_7$	4	12	35
n_5	$n_5 \rightarrow n_2$	7	14	37
n_6	$n_6 \rightarrow n_G$	1	2	2
n_6	$n_6 \rightarrow n_3$	4	20	39
n_6	$n_6 \rightarrow n_4$	3	10	37
n_7	$n_7 \rightarrow n_G$	1	5	5
n_7	$n_7 \rightarrow n_4$	3	7	28
n_7	$n_7 \rightarrow n_5$	4	21	36



Rysunek 4. Przykładowy graf z oznaczonym węzłem początkowym n_S i docelowym n_G .

Kompilacja wiedzy wejściowej polega na wytyczeniu wszystkich możliwych decyzji podejmowanych przez wykonawcę planu (kierowcę). Decyzje te zapisywane są w tabelach decyzyjnych, takiej jak ta przedstawiona w tabeli 1.

Taka reprezentacja pozwala na efektywne przechowywanie w relacyjnej bazie danych lub systemie regułowym; pobranie instrukcji dla wykonawcy planu jest bardzo szybkie, co pozwala na uniknięcie problemu nie spełnienia ograniczeń czasowych opisanego w sekcji 2.

3.4. Wykonanie planów odpornych

Wykonanie planu przebiega w układzie, składającym się z dwóch elementów:

- *aplikacji wspierającej wykonanie planu*, odpowiedzialnej za wyszukiwanie i dostarczanie instrukcji wykonawcy planu (kierowcy),
- *inteligentnego wykonawcy planu*, wykorzystującego wskazówki z aplikacji oraz własne obserwacje do podejmowania decyzji dotyczących kolejnych manewrów i wprowadzania ich w życie.

Po stronie urządzenia, wykonanie planu polega na określaniu aktualnego stanu (lokalizacji) i pobierania odpowiednich decyzji przechowywanych np. w bazie danych, tak jak to opisano w poprzedniej sekcji. Procedura wykonania planu może być podzielona na następujące kroki:

1. Wykonawca planu (kierowca) określa węzeł docelowy n_G .
2. Aplikacja określa aktualny stan (lokalizację).
3. Aplikacja wykorzystuje określony stan $n_{current}$ w celu wyszukania możliwych decyzji prowadzących do celu n_G .
4. Aplikacja przedstawia opcje (w postaci $(n_{current} \rightarrow n_{next})$) wykonawcy planu, wraz z dodatkowymi informacjami wspierającymi podjęcie decyzji.
5. Wykonawca planu wybiera jedną z opcji w oparciu o przedstawione wartości i swoje

obserwacje, a następnie wykonuje instrukcję (t.j. rozpoczyna podróż w kierunku kolejnego stanu).

6. Aplikacja „zauważa” ruch i *czyni założenie*, że wykonawca wybrał opcję o stanie kolejnym n_{next} .
7. Aplikacja podstawia $n_{current} := n_{next}$.
8. Jeżeli $n_{current} \neq n_G$, aplikacja wyszukuje możliwe decyzje dla następnego węzła decyzyjnego, t.j. przechodzi do kroku 3.
9. Jeżeli $n_{current} = n_G$, aplikacja kieruje kierowcę w kierunku węzła docelowego n_G .

3.5. Ograniczenia prostego odpornego planowania tras

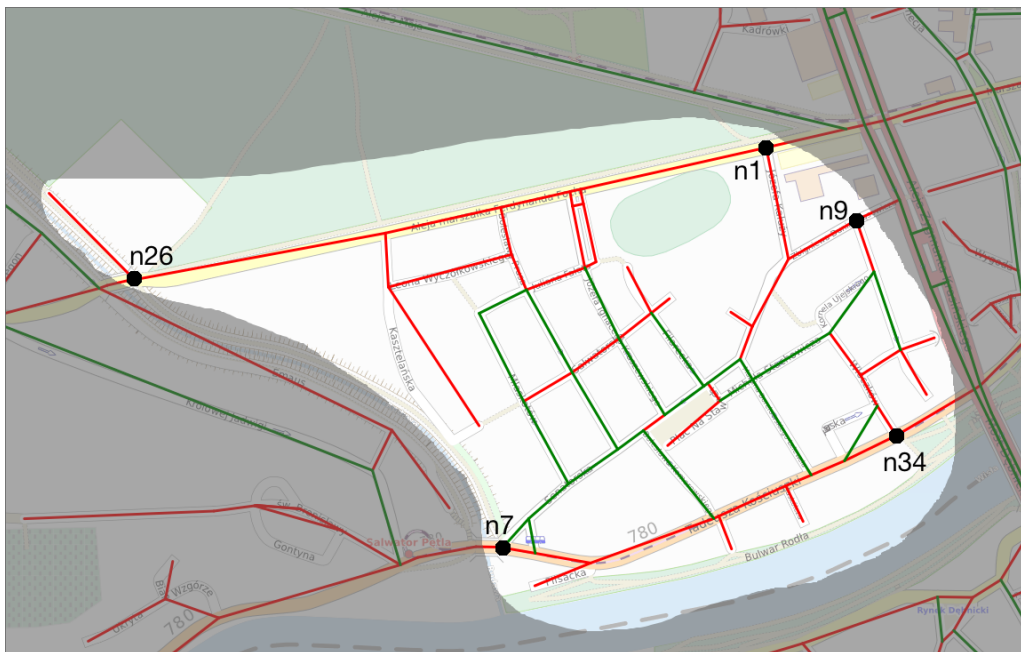
Kompilacja wiedzy rozwiązuje problem złożoności obliczeniowej planowania odpornego, a więc wyszukiwania wszystkich dopuszczalnych rozwiązań. Problemem może być natomiast przechowywanie tablic decyzyjnych, które tworzone są dla każdego węzła w grafie i rosną proporcjonalnie do liczby możliwych węzłów docelowych. Nietrudno przewidzieć, że może to prowadzić do eksplozji kombinatorycznej.

Konieczne jest więc wprowadzenie metody poprawy skalowalności tego rozwiązania. Propozycję takiej metody opisano w sekcji 4.

4. Granule jako metoda poprawy skalowalności

Proste planowanie odporne, opisane w poprzedniej sekcji, może prowadzić do eksplozji kombinatorycznej ilości pamięci wymaganej do przechowywania tablic decyzyjnych. Konieczne jest więc wprowadzenie jakiejś metody ograniczenia wielkości i złożoności danych wejściowych.

Najczęściej stosowane w istniejących systemach metody abstrakcji mapy polegają na stopniowym eliminowaniu dróg niższej kategorii i pokonywaniu największej możliwej części trasy przy pomocy głównych arterii.



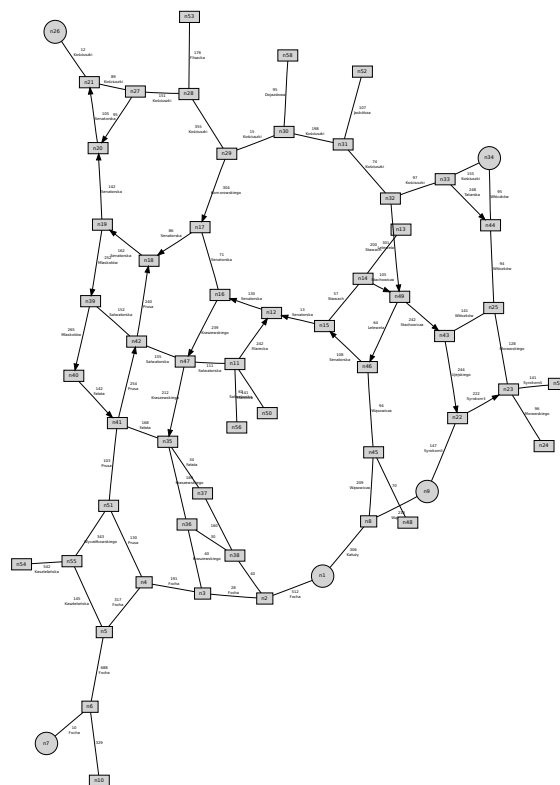
Rysunek 5. Przykład rzeczywistej granuli na mapie Krakowa.

Podejście takie jest jednak sprzeczne z założeniami planowania odpornego.

Proponowana koncepcja polega na wprowadzeniu tzw. granuli. Granula jest obszarem mapy, dla którego przeprowadzana jest kompilacja wiedzy. Koncepcja planowania odpornego, przedstawiona w sekcji 3, rozszerzona o koncepcje granuli, tworzy paradygmat *odpornego planowania granularnego*.

Cechą charakterystyczną granul jest ograniczona liczba wejść i wyjść, przy zachowaniu gęstej i skomplikowanej struktury wewnętrznej. Obszary miast często są podzielone w sposób naturalny na granule przez rzeki, tory kolejowe czy autostrady. Elementy łączące granule – często mosty, przejazdy kolejowe, wiadukty – stanowią potencjalne źródło powstawania „wąskich gardeł”.

Rysunek 5 przedstawia przykładową granulę wytyczoną na mapie Krakowa, z zaznaczonymi węzłami wejściowymi i wyjściowymi. Dla ilustracji, odpowiadający jej graf został przedstawiony na rysunku 6. W przypadku dłuższych planów, a więc takich, dla których istotna jest wydajność obliczeń, najczęstszym zadaniem jest przejazd przez granulę, a więc przejazd od jednego z węzłów



Rysunek 6. Graf odpowiadający granuli przedstawionej na rysunku 5.

wejściowych do jednego z węzłów wyjściowych.

4.1. Wytyczenie granul

Podczas realizacji pracy przebadano wiele metod automatycznego wytyczenia granul na podstawie grafu, takich jak analiza gęstości, metody klasteryzacji grafu i narzucanie twardej ograniczeń (rzeki, tory kolejowe). Przeprowadzone doświadczenia sugerują jednak, że w pełni automatyczne wytyczenie granul nie jest jeszcze możliwe, z następujących powodów:

1. Grafy modelujące sieci dróg nie zawierają danych kluczowych do wytyczenia granul.
2. Wytyczenie granul wymaga wiedzy eksperckiej o dziedzinie wyszukiwania.
3. Charakterystyka grafu nie zawsze sugeruje najbardziej korzystny podział na granule.
4. Metody oparte o odległość ignorują ważne cechy analizowanego obszaru.
5. W sytuacjach rzeczywistych, granule są często wybierane na podstawie subiektywnych preferencji.

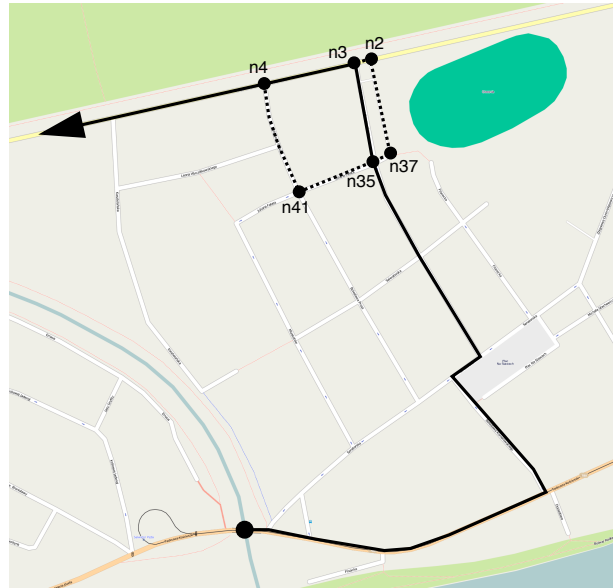
Bardziej korzystnym rozwiązaniem wydaje się ręczne wytyczenie granul przez operatora przy pomocy dedykowanego oprogramowania, udostępniającego narzędzia wspierające ten proces. Przykład wytyczenia granul przy pomocy narzędzia RobustPlanner przedstawiono na rysunku 7.

4.2. Nawigacja wewnątrz granul

Zadanie przejazdu przez granulę jest proste, gdyż odpowiednie reguły zostały już skompilowane i są dostępne na żądanie. Schemat procesu nawigacji przedstawiono w sekcji 3.4.

Rozważmy następujący przykład praktyczny, obrazujący przejazd przez granulę przedstawioną na rysunkach 5 i 6. Rysunek 8 przedstawia rozważany przypadek.

Trasa optymalna (zaznaczona ciągią linią) zawiera odcinek $n35 \rightarrow n3$, odpowiadający dojazdowi do ul. Focha ulicą Kraszewskiego. Doświadczeni krakowscy kierowcy jednak wiedzą, że często powstaje tam długa

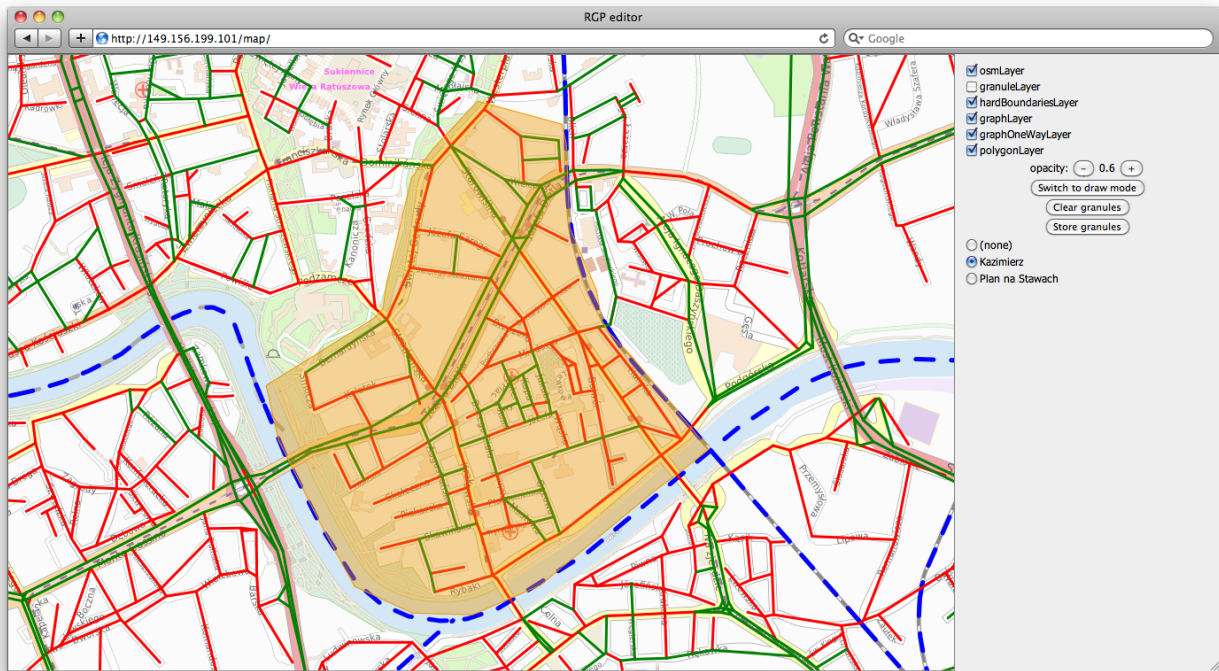


Rysunek 8. Mapa przedstawiająca przykład nawigacji w granuli przedstawionej na rysunku 5.

Tablica 2. Tabela decyzji przedstawianych kierowcy dojeżdżającemu do węzła $n35$.

n_G	n_{next}	δ
\vdots	\vdots	\vdots
$n7$	$n36$	1415
$n7$	$n41$	1416
$n7$	$n37$	1468
\vdots	\vdots	\vdots

kolejka pojazdów oczekujących na skręt w lewo z drogi podporządkowanej. Stosują więc objazd $n35 \rightarrow n37 \rightarrow n2 \rightarrow n3$ (polegający na przejeździe drugą stroną parkingu), gdzie kolejka jest krótsza z uwagi na lepszą widoczność (oraz fakt, że jest to rozwiązanie mniej „oczywiste”). Prowadzony przez system nawigacji kierowca, dojeżdżając do $n35$, może zobaczyć kolejkę pojazdów. Urządzenie przedstawi mu decyzje przedstawione w tabeli 2. Zobacz, że jeżeli skręci na tym skrzyżowaniu w lewo, długość trasy wzrośnie zaledwie o 1 metr. Może też wybrać wariant stosowany przez kierowców-ekspertów, którego koszt (1468) również nie jest drastycznie wyższy od kosztu rozwiązania optymalnego (1415). Obie alternatywne trasy przedstawiono na rysunku 8 linią przerywaną.



Rysunek 7. Wytyczanie granul przy pomocy narzędzia RobustPlanner.

4.3. Struktury zawierające wiele granul

Dlatego też strategia kompilacji wiedzy dla granuli polega na wytyczeniu wszystkich rozwiązań od każdego węzła, do wszystkich węzłów wyjściowych. Kompilacja przetwarza granule na granule uogólnione; granula uogólniona składa się z węzłów wejściowo/wyjściowych oraz krawędzi je łączących. Nawigacja składa się z dwóch poziomów:

- *poziom ogólny* polega na wytyczeniu trasy pomiędzy granulami oraz przejazdów przez granule, przy pomocy granuli uogólnionych,
- *poziom szczegółowy* polega na przeprowadzeniu użytkownika przez granulę.

Graf na poziomie ogólnym powinien mieć prostą strukturę, plan taki może więc zostać wytyczony na żądanie. Po dotarciu do węzła wejściowego granuli, nawigacja prowadzona jest na poziomie szczegółowym, z wykorzystaniem wcześniej skompilowanej wiedzy. Pierwotnie wybrany węzeł wyjściowy może ulec zmianie, a nowy węzeł

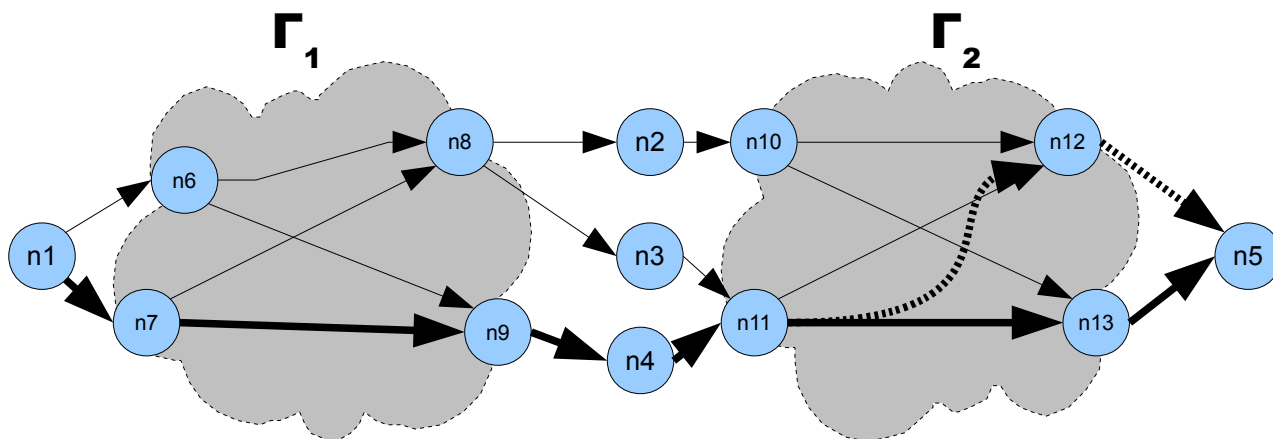
wyjściowy znajduje odzwierciedlenie w planie ogólnym. Schemat nawigacji pomiędzy granulami przedstawiono na rysunku 9.

5. Podsumowanie

Koncepcja odpornego planowania granularnego pozwala na wytyczanie użytecznych planów, pozwalających na elastyczną nawigację w realistycznych, częściowo nieprzewidywalnych środowiskach. Jednocześnie, aplikacja wykorzystująca paradygmat *odpornego planowania granularnego* pozwala na stworzenie systemu, który *wspiera* kierowcę przedstawiając mu dostępne opcje, nie narzucając żadnego konkretnego rozwiązania – tak jak ma to miejsce w przypadku klasycznych systemów nawigacji.

Uzyskane wyniki obejmują:

- **opracowanie praktycznego podejścia do wyznaczania planów**: planowanie odporne pozwala na kompilację danych wejściowych do gotowych do użycia instrukcji, a wprowadzenie granul minima-



Rysunek 9. Trasa optymalna w środowisku zawierającym wiele granул; linią przerywaną oznaczono ścieżkę alternatywną.

lizuje ryzyko eksplozji kombinatorycznej i poprawia skalowalność,

- **sformułowanie modelu elastycznej nawigacji w realistycznych środowiskach:** wykonawca planu ma stały dostęp do instrukcji wielowariantowych, podczas gdy urządzenie nawigacyjne przewiduje podjęcie przez niego działań innych niż podążanie za ścieżką optymalną,
- **innowacyjne zastosowanie technik sztucznej inteligencji (AI):** kompilacja dziedzin wyszukiwania do reguł przechowywanych w tablicach decyzyjnych zmniejsza nacisk na efektywność i złożoność metod przeszukiwania grafu,
- **spełnienie twardych ograniczeń czasu rzeczywistego dotyczących wyznaczania i dostarczania wskazówek:** opóźnienie dostarczenia instrukcji wykonawcy planu byłoby niedopuszczalne; opracowane metody pozwalają na rozwiązanie tego problemu przez wykonywanie dużej części przetwarzania *a priori*.

Tematyka przyszłych badań obejmuje przede wszystkim weryfikację praktyczną opracowanych metod, a także określenie sposobu przekazywania wskazówek kierowcy, optymalizację wykorzystywanych algorytmów oraz opracowanie współczynników oceny odporności części planu.

Literatura

- [1] R. Bajaj, S. L. Ranaweera, and D. P. Agrawal. GPS: location-tracking technology. *Computer*, 35(4):92–94, 2002.
- [2] Edsger W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959.
- [3] Edsger W. Dijkstra. Reflections on “a note on two problems in connexion with graphs”, 1959. Source: <http://www.cs.utexas.edu/EWD/>.
- [4] Nils J. Nilsson. *Principles of Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, January 1993.
- [5] Ola Øvstedal. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. *GPS Solutions*, 5(4):33–44, April 2002.
- [6] Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 3rd edition edition, 2009.
- [7] Martin Tomko and Stephan Winter. Considerations for efficient communication of route directions. *ISPRS Workshop on Spatial Data Communication and Visualization*, 2008.