Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Informatyka Przemysłowa

Data urodzenia: 21.03.1993 r.

Data rozpoczęcia studiów: 23.02.2016 r.

Życiorys

Urodziłem się 21 marca 1993 roku w Lublinie. W 2012 roku rozpocząłem studia inżynierskie I stopnia na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalność Informatyka Przemysłowa. Ukończyłem je 17 lutego 2016 roku. Następnie, tego samego roku rozpocząłem studia II stopnia na tym samym wydziale, na specjalności Informatyka Przemysłowa.

.....

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Mechatroniki

Praca magisterska

Ireneusz Szulc

Planowanie bezkolizyjnych tras dla zespołu robotów mobilnych

Promotor:
prof. nzw. dr hab. Barbara Siemiątkowska

Warszawa, 2018

PRACA DYPLOMOWA
magisterska

Specjalność: ***Informatyka Przemysłowa***

Instytut prowadzący specjalność: ***Instytut Automatyki i Robotyki***

Instytut prowadzący pracę: ***Instytut Automatyki i Robotyki***

Temat pracy: Planowanie bezkolizyjnych tras dla zespołu robotów mobilnych

Temat pracy (w jęz. ang.): Path planning for a group of mobile robots

Zakres pracy:

1. Projekt algorytmu wyznaczania trajektorii dla pojedynczego robota
2. Algorytm detekcji i zapobiegania kolizjom między robotami
3. Implementacja oprogramowania symulacyjnego
4. Przeprowadzenie testów symulacyjnych

Podstawowe wymagania:

1. Aplikacja powinna umożliwiać symulację ruchu robotów oraz definiowanie położenia przeszkód przez użytkownika.
2. Planowanie tras dotyczy robotów holonomicznych.

Literatura:

1. Mówiński K., Roszkowska E.: Sterowanie hybrydowe ruchem robotów mobilnych w systemach wielorobotycznych, Postępy Robotyki, 2016,
2. Siemiątkowska B.: Uniwersalna metoda modelowania zachowań robota mobilnego wykorzystująca architekturę uogólnionych sieci komórkowych, Warszawa 2009,
3. Silver D.: Cooperative Pathfinding, 2005

Słowa kluczowe: planowanie tras, systemy wielorobotowe

Praca dyplomowa jest realizowana we współpracy z przemysłem:

Nie

Imię i nazwisko dyplomanta:	*Imię i nazwisko promotora:*
Ireneusz Szulc	*prof. nzw. dr hab. Barbara Siemiątkowska*
	Imię i nazwisko konsultanta:
Temat wydano dnia:	*Termin ukończenia pracy:*

Zatwierdzenie tematu

Opiekun specjalności	Z-ca Dyrektora Instytutu

Streszczenie

Planowanie bezkolizyjnych tras dla zespołu robotów mobilnych

Zakres pracy:

- Projekt algorytmu wyznaczania trajektorii dla pojedynczego robota
- Algorytm detekcji i zapobiegania kolizjom między robotami
- Implementacja oprogramowania symulacyjnego
- Przeprowadzenie testów symulacyjnych

Podstawowe wymagania:

- Aplikacja powinna umożliwiać symulację ruchu robotów oraz definiowanie położenia przeszkód przez użytkownika.
- Planowanie tras dotyczy robotów holonomicznych.

Słowa kluczowe: planowanie tras, systemy wielorobotowe

Abstract

Path planning for a group of mobile robots

Key words: cooperative path-planning, multi-agent systems

załącznik do zarządzenia nr 28/2016 r.
Rektora PW

Politechnika Warszawska

„załącznik nr 3 do zarządzenia nr 24/2016 Rektora PW

.....
miejscowość i data

.....
imię i nazwisko studenta

.....
numer albumu

.....
kierunek studiów

OŚWIADCZENIE

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Oświadczam, że treść pracy dyplomowej w wersji drukowanej, treść pracy dyplomowej zawartej na nośniku elektronicznym (płycie kompaktowej) oraz treść pracy dyplomowej w module APD systemu USOS są identyczne.

.....
czytelny podpis studenta"

Spis treści

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Cel i zakres pracy

Przedmiotem niniejszej pracy jest przegląd metod wykorzystywanych do planowania bezkolizyjnych tras dla wielu robotów mobilnych. Stanowi to również wstęp teoretyczny do zaprojektowania algorytmu i implementacji oprogramowania pozwalającego na symulację działania skutecznego planowania tras dla systemu wielorobotowego.

Praca skupia się na przypadkach, w których mamy do czynienia ze środowiskiem z dużą liczbą przeszkód (np. zamknięty budynek z licznymi ciasnymi korytarzami), aby uwypuklić problem blokowania się agentów często prowadzący do zakleszczenia. Często okazuje się, że należy wtedy zastosować nieco inne podejścia niż te, które sprawdzają się w przypadku otwartych środowisk, a które zostały opisane np. w pracach [8], [10]. W otwartych środowiskach z małą liczbą przeszkód wystarczające może się okazać np. proste ponowne planowanie wykorzystujące algorytm LRA* (por. 3.2.1) lub D* (por. 3.2.2).

W niniejszej pracy starano się znaleźć metody rozwiązujące zagadnienie, w którym znane są:

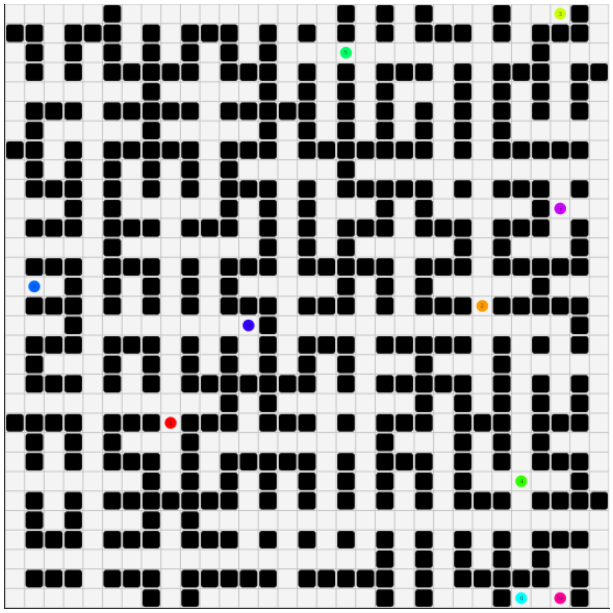
- pełna informacja o mapie otoczenia (położenie statycznych przeszkód),
- aktualne położenie i położenie celu każdego z robotów.

Szukany jest natomiast przebieg tras do punktów docelowych dla agentów. Zadaniem algorytmu będzie wyznaczenie możliwie najkrótszej bezkolizyjnej trasy dla wszystkich robotów. Należy jednak zaznaczyć, że priorytetem jest dotarcie każdego z robotów do celu bez kolizji z innymi robotami. Drugorzędne zaś jest, aby wyznaczone drogi były możliwie jak najkrótsze.

1.2 Założenia

Założenia i ograniczenia rozważanego problemu:

1. Każdy z robotów ma wyznaczony inny punkt docelowy, do którego zmierza.
2. Planowanie tras dotyczy mobilnych robotów holonomicznych.
3. Czas trwania zmiany kierunku robota jest pomijalnie mały.
4. Środowisko, w którym poruszają się roboty, jest dwuwymiarową przestrzenią zawierającą dużą liczbę przeszkód oraz wąskie korytarze (por. rys. 1.1).
5. Roboty "wiedzą" o sobie i mogą komunikować się ze sobą podczas planowania tras.
6. Każdy robot zajmuje w przestrzeni jedno pole. Na jednym polu może znajdować się maksymalnie jeden robot (por. rys. 1.1).
7. Planowanie tras powinno odbywać się w czasie rzeczywistym.



Rysunek 1.1: Przykładowe środowisko z dużą liczbą przeszkód (czarne kwadraty) i rozmieszczonymi robotami (kolorowe koła). Źródło: własna implementacja oprogramowania symulacyjnego

1.3 Zastosowanie koordynacji ruchu robotów

Koordynacja ruchu robotów jest jednym z fundamentalnych problemów w systemach wielorobotowych [1].

Kooperacyjne znajdowanie tras (ang. *Cooperative Pathfinding*) jest zagadnieniem planowania w układzie wieloagentowym, w którym to agenci mają za zadanie znaleźć bezkolizyjne drogi do swoich, osobnych celów. Planowanie to odbywa się w oparciu o pełną informację o środowisku oraz o trasach pozostałych agentów [11].

Algorytmy do wyznaczania bezkolizyjnych tras dla wielu agentów (robotów) mogą znaleźć zastosowanie w szpitalach (np. roboty TUG i HOMER do dostarczania sprzętu na wyposażeniu szpitala [18]) oraz magazynach (np. roboty transportowe w magazynach firmy Amazon - por. rys. 1.2).

Rysunek 1.2: Roboty Kiva pracujące w magazynie firmy Amazon. Źródło: [16]

1.4 Podobieństwo do gier RTS

Problem kooperacyjnego znajdowania tras pojawia się nie tylko w robotyce, ale jest również popularny m.in. w grach komputerowych (strategiach czasu rzeczywistego), gdzie konieczne jest wyznaczanie przez sztuczną inteligencję bezkolizyjnych dróg dla wielu jednostek, unikając wzajemnego blokowania się. Niestety brak wydajnych i skutecznych algorytmów planowania dróg można zauważyć w wielu grach typu RTS (ang. *Real-Time Strategy*), gdzie czasami obserwuje się zjawisko zakleszczenia jednostek w wąskich gardłach (np. w grach *Age of Empires II*, *Warcraft III* lub nawet we współczesnych produkcjach) [4] (por. rys. 1.3). Ponadto, zauważalny brak ogólnie dostępnych bibliotek open-source do rozwiązania problemu typu *Cooperative Pathfinding* świadczy o potrzebie rozwoju tych metod.

Często algorytmy wykorzystywane w grach typu RTS (ang. *Real-Time Strategy*) zajmują się planowaniem bezkolizyjnych dróg dla układu wielu agentów w czasie rzeczywistym (będącego

przedmiotem niniejszej pracy), dlatego nic nie stoi na przeszkodzie, aby stosować je zamiennie również do koordynacji ruchu zespołu robotów mobilnych.

Rysunek 1.3: Popularny problem zakleszczania się jednostek w wąskich gardłach występujący w grach typu RTS. Źródło: gra komputerowa Age of Empires II Forgotten Empires

Rozdział 2

Wstęp teoretyczny

2.1 Podstawowe pojęcia

Definicja 2.1.1. Robot holonomiczny
Robot holonomiczny to taki robot mobilny, który może zmienić swoją orientację, stojąc w miejscu.

Definicja 2.1.2. Przestrzeń konfiguracyjna
Przestrzeń konfiguracyjna to N-wymiarowa przestrzeń będąca zbiorem możliwych stanów danego układu fizycznego. Wymiar przestrzeni zależy od rodzaju i liczby wyróżnionych parametrów stanu. W odróżnieniu od przestrzeni roboczej, gdzie robot ma postać bryły, w przestrzeni konfiguracyjnej robot jest reprezentowany jako punkt.

Definicja 2.1.3. Zupełność algorytmu (ang. *Completeness***)**
W kontekście algorytmu przeszukiwania grafu algorytm zupełny to taki, który gwarantuje znalezienie rozwiązania, jeśli takie istnieje. Warto zaznaczyć, że nie gwarantuje to wcale, że znalezione rozwiązanie będzie rozwiązaniem optymalnym.

2.2 Kooperacyjne planowanie tras

Spośród metod wykorzystywanych do kooperacyjnego planowania tras dla wielu robotów można wyróżnić dwie zasadnicze grupy [7]:

- **Zcentralizowane** - drogi wyznaczane są dla wszystkich agentów na raz (jednocześnie). Metody tego typu są często trudne do zrealizowania (gdyż do rozwiązania jest złożony problem optymalizacyjny) oraz mają bardzo dużą złożoność obliczeniową ze względu

na ogromną przestrzeń przeszukiwania. Struktura organizacyjna jest scentralizowana - decyzje podejmowane są na podstawie centralnego systemu.

- **Rozproszone** (ang. *decoupled* lub *distributed*) - podejście to dekomponuje zadanie na niezależne lub zależne w niewielkim stopniu problemy dla każdego agenta. Dla każdego robota droga wyznaczana jest osobno, w określonej kolejności, następnie rozwiązywane są konflikty (kolizje dróg). Zastosowanie metod rozproszonych wiąże się najczęściej z koniecznością przydzielania priorytetów robotom, co stanowi istotny problem, gdyż od ich wyboru może zależeć zupełność algorytmu. Nie należy mylić tej metody z zagadnieniem typu *Non-Cooperative Pathfinding*, w którym agenci nie mają wiedzy na temat pozostałych planów i muszą przewidywać przyszłe ruchy pozostałych robotów [11]. W podejściu rozproszonym agenci mają pełną informację na temat stanu pozostałych robotów, lecz wyznaczanie dróg odbywa się w określonej kolejności.

W systemach czasu rzeczywistego istotne jest, aby rozwiązanie problemu planowania tras uzyskać w krótkim, deterministycznym czasie, dlatego w tego typu systemach chętniej używane są techniki rozproszone.

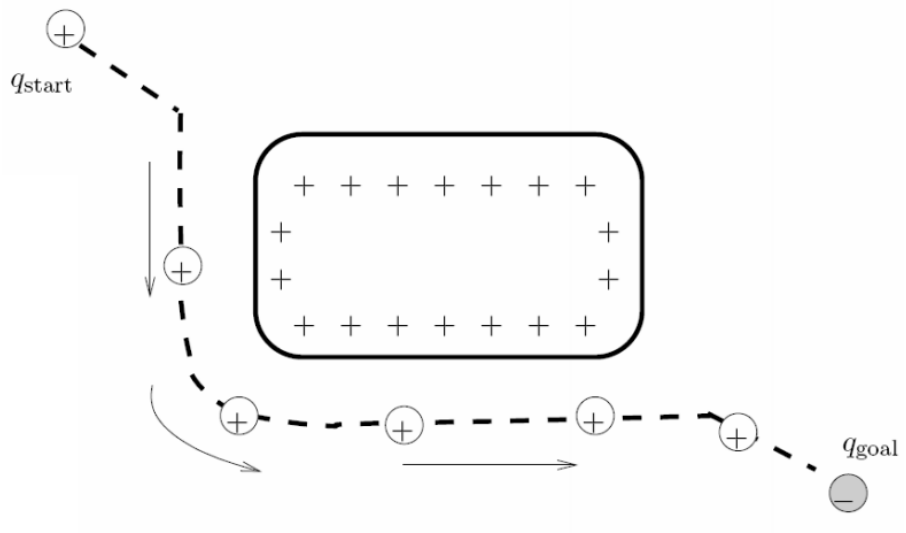
2.3 Metoda pól potencjałowych

Metoda pól potencjałowych (ang. *Artificial Potential Field* lub *Potential Field Technique*) polega na zastosowaniu zasad oddziaływania między ładunkami znanych z elektrostatyki. Roboty i przeszkody traktowane są jako ładunki jednoimienne, przez co "odpychają się" siłą odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości (dzięki temu unikają kolizji między sobą). Natomiast punkt docelowy robota jest odwzorowany jako ładunek o przeciwnym biegunie, przez co robot jest "przyciągany" do celu. Główną zasadę działania metody przedstawiono na rysunku 2.1.

Technika ta jest bardzo prosta i nie wymaga wykonywania złożonych obliczeń (w odróżnieniu do pozostałych metod zcentralizowanych). Niestety bardzo powszechny jest problem osiągania minimum lokalnego, w którym suma wektorów daje zerową siłę wypadkową. Robot zostaje "uwięziony" w takim minimum lokalnym, przez co nie jest w stanie dotrzeć do wyznaczonego celu. Do omijania tego problemu muszą być stosowane inne dodatkowe metody [14]. Metoda pól potencjałowych nie daje gwarancji ani optymalności, ani nawet zupełności.

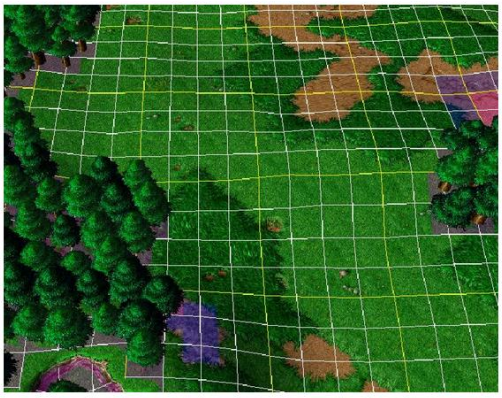
2.4 Rozproszone planowanie tras

Najczęściej stosowanymi podejściami są metody oparte o algorytm A* lub jego pochodne. W celu wykonywania wydajnych obliczeń w algorytmach przeszukujących grafy, nawet w przypadku



Rysunek 2.1: Zasada działania metody pól potencjałowych. Dodatni ładunek q_{start} reprezentuje robota. Przyciągany jest w stronę ujemnego ładunku celu q_{goal}, zaś odpychany jest od dodatnio naładowanej przeszkody. Źródło: [17]

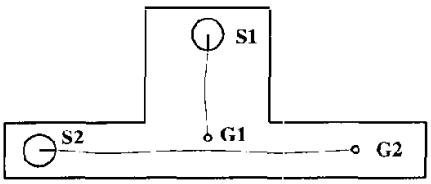
ciągłej przestrzeni mapy, stosuje się podział na dyskretną siatkę pól (por. rys. 2.2) [3].



Rysunek 2.2: Ciągła przestrzeń mapy zdyskretyzowana do siatki pól. Źródło: edytor map z gry Warcraft III.

Popularne podejścia unikające planowania w wysoko wymiarowej zbiorowej przestrzeni konfiguracyjnej to techniki rozproszone i uwzględniające priorytety [1]. Pomimo, że metody te są bardzo efektywne, mają dwie główne wady:

- Nie są zupełne - nie dają gwarancji znalezienia rozwiązania, nawet gdy takie istnieje.
- Wynikowe rozwiązania mogą być nieoptymalne.



Rysunek 2.3: Sytuacja, w której żadne rozwiązanie nie zostanie znalezione, stosując planowanie uwzględniające priorytety, jeśli robot 1 ma wyższy priorytet niż robot 2. Źródło: [1]

2.5 Planowanie uwzględniające priorytety

Często używaną w praktyce metodą jest planowanie z uwzględnianiem priorytetów. W tej technice agenci otrzymują unikalne priorytety. Algorytm wykonuje indywidualne planowanie sekwencyjnie dla każdego agenta w kolejności od najwyższego priorytetu. Trajektorie agentów o wyższych priorytetach są ograniczeniami (ruchomymi przeszkodami) dla pozostałych agentów [2].

Złożoność ogólnego algorytmu rośnie liniowo wraz z liczbą agentów, dzięki temu to podejście ma zastosowanie w problemach z dużą liczbą agentów. Algorytm ten jest zachłanny i niezupełny w takim znaczeniu, że agentów zadowala pierwsza znaleziona trajektoria niekolidująca z agentami wyższych priorytetów.

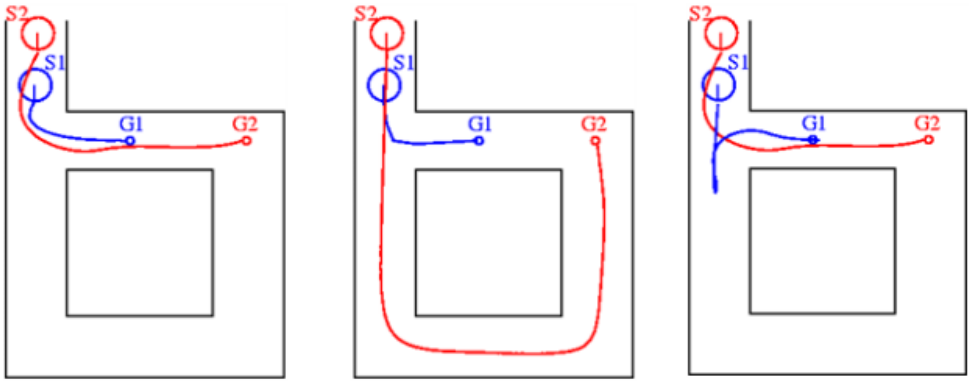
Istotną rolę doboru priorytetów robotów w procesie planowania tras ukazuje prosty przykład przedstawiony na rysunku 2.3. Jeśli robot 1 (zmierzający z punktu S1 do G1) otrzyma wyższy priorytet niż robot 2 (zmierzający z S2 do G2), spowoduje to zablokowanie przejazdu dla robota 2 i w efekcie prawidłowe, istniejące rozwiązanie nie zostanie znalezione.

Układ priorytetów może mieć także wpływ na długość uzyskanych tras. Potwierdzający to przykład został przedstawiony na rysunku 2.4. W zależności od wyboru priorytetów, wpływających na kolejność planowania tras, otrzymujemy różne rozwiązania.

2.6 Metoda Path Coordination

Jedną z metod rozproszonego planowania tras z uwzględnianiem priorytetów jest *Path Coordination*, której idea przedstawia się w następujących krokach [1]:

1. Wyznaczenie ścieżki dla każdego robota **niezależnie** (np. za pomocą algorytmu A*)
2. Przydział priorytetów
3. Próba rozwiązania możliwych konfliktów między ścieżkami. Roboty utrzymywane są na ich indywidualnych ścieżkach (wyznaczonych na początku), wprowadzane modyfikacje



Rysunek 2.4: a) Niezależne planowanie optymalnych tras dla 2 robotów; b) suboptymalne rozwiązanie, gdy robot 1 ma wyższy priorytet; c) rozwiązanie, gdy robot 2 ma wyższy priorytet. Źródło: [1]

pozwalają na zatrzymanie się, ruch naprzód, a nawet cofanie się, ale tylko **wzdłuż trajektorii** w celu uniknięcia kolizji z robotem o wyższym priorytecie.

Rozdział 3

Algorytmy oparte o A*

Kiedy pojedynczy agent staje przed zadaniem znalezienia drogi do wyznaczonego celu, prosty algorytm A* sprawdza się znakomicie. Jednak w przypadku, gdy wiele agentów porusza się w tym samym czasie, podejście to może się już nie sprawdzić, powodując wzajemne blokowanie się i zakleszczenie jednostek. Rozwiązaniem tego problemu jest kooperacyjne znajdowanie tras. Dzięki tej technice roboty będą mogły skutecznie przemieszczać się przez mapę, omijając trasy wyznaczone przez inne jednostki oraz schodząc innym jednostkom z drogi, jeśli to konieczne [11].

Zagadnienie znajdowania drogi jest również ważnym elementem sztucznej inteligencji zaimplementowanej w wielu grach komputerowych. Chociaż klasyczny algorytm A* potrafi doprowadzić pojedynczego agenta do celu, to jednak dla wielu agentów wymagane jest zastosowanie innego podejścia w celu unikania kolizji. Istniejące rozwiązania są jednak wciąż oparte o Algorytm A*, choć nieco zmodyfikowany. Chociaż A* może zostać zaadaptowany do ponownego planowania trasy na żądanie, w przypadku wykrycia kolizji tras, to jednak takie podejście nie jest zadowalające pod wieloma względami. Na trudnych mapach z wieloma wąskimi korytarzami i wieloma agentami może to prowadzić do zakleszczenia agentów w wąskich gardłach lub do cyklicznego zapętlenia akcji agentów [11].

Rozdział ten zmierza do zaprezentowania zasady działania oraz cech algorytmu WHCA* (por. 3.5), zaproponowanego przez Davida Silvera [11]. Zaczynamy jednak od przedstawienia samego algorytmu A* i wprowadzając kolejne modyfikacje (CA*, HCA*), przekształcimy go stopniowo w WHCA*. W rozdziale zaprezentowano także rozwiązania alternatywne takie, jak: D* (por. 3.2.2) i LRA* (por. 3.2.1).

3.1 Algorytm A*

3.1.1 Zasada działania

A* jest algorytmem heurystycznym służącym do przeszukiwania grafu w celu znalezienia najkrótszej ścieżki między węzłem początkowym a węzłem docelowym. Algorytm ten jest powszechnie stosowany w zagadnieniach sztucznej inteligencji oraz w grach komputerowych [19]. Opiera się na zapisywaniu węzłów w dwóch listach: zamkniętych (odwiedzonych) i otwartych (do odwiedzenia). Jest modyfikacją algorytmu Dijkstry poprzez wprowadzenie pojęcia funkcji heurystycznej $h(n)$. Wartość funkcji heurystycznej powinna określać przewidywaną drogę do węzła docelowego z bieżącego punktu. Pełny koszt $f(n)$ stanowi sumę dotychczasowego kosztu $g(n)$ oraz przewidywanego pozostałego kosztu.

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{3.1}$$

gdzie:

$g(n)$ - dotychczasowy koszt dotarcia do węzła n, dokładna odległość miedzy węzłem n a węzłem początkowym

$h(n)$ - heurystyka, przewidywana pozostała droga od węzła bieżącego do węzła docelowego

$f(n)$ - oszacowanie pełnego kosztu ścieżki od węzła startowego do węzła docelowego prowadzącej przez węzeł n

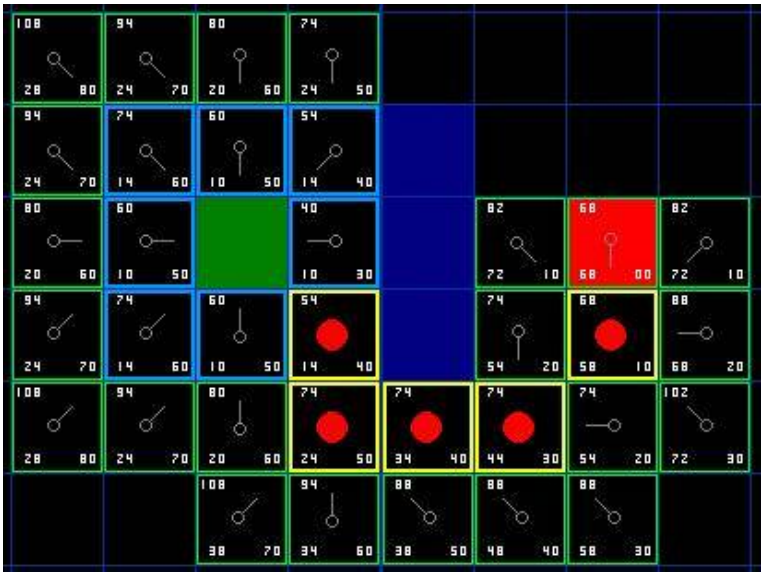
n - bieżący węzeł, wierzchołek przeszukiwanego grafu

W każdym kroku przeszukiwany jest węzeł o najmniejszej wartości funkcji $f(n)$. Dzięki takiemu podejściu najpierw sprawdzane są najbardziej "obiecujące" rozwiązania, co pozwala szybciej otrzymać wynik (w porównaniu do algorytmu Dijkstry). Algorytm kończy działanie w momencie, gdy napotka węzeł będący węzłem docelowym. Dla każdego odwiedzonego węzła zapamiętywane są wartości $g(n)$, $h(n)$ oraz węzeł będący rodzicem w celu późniejszego odnalezienia drogi powrotnej do węzła startowego po napotkaniu węzła docelowego (por. rys. 3.1).

Algorytm zwraca optymalny wynik (najkrótszą możliwą ścieżkę), ale w pewnych warunkach (por. 3.1.2).

3.1.2 Funkcja heurystyczna

Od wyboru sposobu obliczania heurystyki zależy czas wykonywania algorytmu oraz optymalność wyznaczonego rozwiązania.



Rysunek 3.1: Ilustracja wyznaczania działania przez A. Każdy odwiedzony węzeł wskazuje na swojego rodzica, co umożliwia późniejszą rekonstrukcję drogi. Źródło: [15]*

Funkcja heurystyczna $h(n)$ jest dopuszczalna, jeśli dla dowolnego węzła n spełniony jest warunek

$$h(n) \leqslant h^*(n) \tag{3.2}$$

gdzie:

$h^*(n)$ - rzeczywisty koszt ścieżki od węzła n do celu

Innymi słowy, heurystyka dopuszczalna to taka, która nigdy nie przeszacowuje pozostałej do przebycia drogi. Wtedy algorytm A* zwraca optymalną (najkrótszą) ścieżkę [11].

A* opiera się na heurystyce, która "kieruje" przeszukiwaniem. To od niej zależy, w kierunku których węzłów będzie podążało przeszukiwanie. Źle wybrana heurystyka może prowadzić do zbędnego odwiedzania dodatkowych węzłów.

Poniżej przedstawiono najczęściej wykorzystywane heurystyki będące oszacowaniem odległości między przeszukiwanym węzłem (x_n, y_n) a węzłem docelowym (x_g, y_g) na dwuwymiarowej mapie.

Heurystyka euklidesowa

Heurystyka wykorzystująca metrykę euklidesową wyraża dokładną odległość po linii prostej. Wymaga to jednak częstego obliczania pierwiastków (lub stosowania *look-up table*).

$$h(n) = \sqrt{(x_n - x_g)^2 + (y_n - y_g)^2} \tag{3.3}$$

Heurystyka Manhattan

W przypadku, gdy agent może poruszać się po mapie jedynie poziomo lub pionowo (nie na ukos) wystarczająca okazuje się metryka Manhattan (metryka miejska):

$$h(n) = |x_n - x_g| + |y_n - y_g| \tag{3.4}$$

Heurystyka metryki maksimum

Zastosowanie metryki maksimum (metryki Czebyszewa) może sprawdzić się np. dla niektórych figur szachowych:

$$h(n) = max(|x_n - x_g|, |y_n - y_g|) \tag{3.5}$$

Heurystyka zerowa

Przyjęcie heurystyki równej $h(n) = 0$ sprawia, że algorytm A* sprowadza się do algorytmu Dijkstry.

3.2 Metody ponownego planowania

3.2.1 Local Repair A*

W algorytmie Local Repair A* (LRA*) każdy z agentów znajduje drogę do celu, używając algorytmu A*, ignorując pozostałe roboty oprócz ich obecnych sąsiadów. Roboty zaczynają podążać wyznaczonymi ścieżkami do momentu, aż kolizja z innym robotem jest nieuchronna (w lokalnym otoczeniu). Wtedy następuje ponowne przeliczenie drogi pozostałej do przebycia, z uwzględnieniem nowo napotkanej przeszkody.

Możliwe (i całkiem powszechne [11]) jest uzyskanie cykli (tych samych sekwencji ruchów powtarzających się w nieskończoność), dlatego zazwyczaj wprowadzane są pewne modyfikacje, aby rozwiązać ten problem. Jedną z możliwości jest zwiększanie wpływu losowego szumu na wartość heurystyki. Kiedy agenci zachowują się bardziej losowo, prawdopodobne jest, że wydostaną się z problematycznego położenia i spróbują podążać innymi ścieżkami.

Algorytm ten ma jednak sporo poważnych wad, które szczególnie ujawniają się w trudnych środowiskach z dużą liczbą przeszkód. Wydostanie się z zatłoczonego wąskiego gardła może trwać bardzo długo. Prowadzi to także do ponownego przeliczania trasy w prawie każdym kroku. Wciąż możliwe jest również odwiedzanie tych samych lokalizacji w wyniku zapętleń.

3.2.2 Algorytm D*

D* (*Dynamic A* Search*) jest przyrostowym algorytmem przeszukiwania. Jest modyfikacją algorytmu A* pozwalającą na szybsze ponowne planowanie trasy w wyniku zmiany otoczenia (np. zajmowania wolnego pola przez innego robota). Wykorzystywany jest m.in. w nawigacji robota do określonego celu w nieznanym terenie. Początkowo robot planuje drogę na podstawie pewnych założeń (np. nieznany teren nie zawiera przeszkód). Podążając wyznaczoną ścieżką, robot odkrywa rzeczywisty stan mapy i jeśli to konieczne, wykonuje ponowne planowanie trasy na podstawie nowych informacji. Często wykorzystywaną implementacją (z uwagi na zoptymalizowaną złożoność obliczeniową) jest wariant algorytmu *D* Lite* [6].

3.2.3 D* Extra Lite

Wartym uwagi jest także algorytm *D* Extra Lite* charakteryzujący się jeszcze korzystniejszą wydajnością niż *D* Lite*, co potwierdziły przeprowadzone obszerne testy w różnego rodzaju środowiskach (m.in. na mapach z gier komputerowych oraz w zawiłych labiryntach) [9].

D Extra Lite* służy do przyrostowego planowania najkrótszej ścieżki w dwuwymiarowej przestrzeni bez dokładnej wiedzy o środowisku. Wykorzystanie wyników z poprzednich iteracji oraz wczesne odrzucanie pewnych węzłów z drzewa przeszukiwania znacznie skraca czas potrzebny do wykonania ponownego planowania. *D* Extra Lite* jest nowatorskim algorytmem ogólnego przeznaczenia. Naturalnym jego zastosowaniem jest nawigacja robotów mobilnych [9].

3.3 Cooperative A*

Cooperative A* jest algorytmem do rozwiązywania problemu kooperacyjnego znajdowania tras. Metoda może być również nazywana czasoprzestrzennym algorytmem A* (*time-space A* search*) Zadanie planowania jest rozdzielone na serię pojedynczych poszukiwań dla poszczególnych agentów. Pojedyncze poszukiwania są wykonywane w trójwymiarowej czasoprzestrzeni i biorą pod uwagę zaplanowane ścieżki przez pozostałych agentów. Akcja wykonania postoju (pozostania w tym samym miejscu) jest uwzględniona w zbiorze akcji możliwych do wykonania. Po przeliczeniu dróg dla każdego agenta, stany zajętości pól są zaznaczane w tablicy rezerwacji (ang. Reservation table). Pozycje w tej tablicy są uważane jako pola nieprzejezdne i w efekcie są omijane podczas przeszukiwania przez późniejszych agentów [11].

Należy zaznaczyć, że planowanie dla każdego agenta odbywa się sekwencyjnie według przydzielonych priorytetów. Algorytm ten jest podatny na zmianę kolejności agentów. Odpowiedni dobór priorytetów może wpłynąć na wydajność algorytmu oraz jakość uzyskanego wyniku.

3.3.1 Trzeci wymiar - czas

Do rozwiązania problemu kooperacyjnego znajdowania dróg algorytm przeszukiwania potrzebuje mieć pełną wiedzę na temat przeszkód oraz jednostek na mapie. Aby zapisać tą informację, potrzeba rozszerzyć mapę o trzeci wymiar - czas. Pierwotną mapę będziemy nazywać mapą przestrzenną, natomiast nową - czasoprzestrzenną mapą [11].

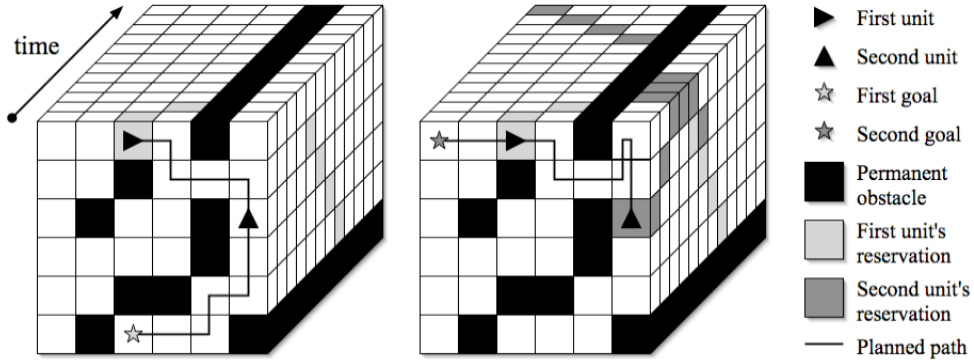
Zagadnienie sprowadza się do przeszukiwania grafu, w którym każdy węzeł ma przypisane 3 wielkości: położenie x, położenie y oraz czas. Podczas gdy zakres wielkości x i y jest znany i wynika z rozmiarów mapy oraz podziału jej wymiarów na dyskretne pola, to jednak określenie wymiaru czasu i jego granicy nie jest trywialnym zagadnieniem. Wymiar czasu możemy również zdyskretyzować i przyjąć, że krok czasu jest okresem, jaki zajmuje robotowi przejście z jednego pola na sąsiednie (poziomo lub pionowo). Natomiast górną granicą czasu powinna być maksymalna liczba ruchów potrzebna do dotarcia do celu przez ostatniego robota. Wybór za małej liczby może spowodować, że algorytm nie zdąży znaleźć drogi dla niektórych agentów, z kolei zbyt duża granica kroków czasu znacząco wydłuża obliczenia. Rozwiązanie tego problemu zostało opisane w późniejszym podrozdziale 3.5.

Wprowadzenie trzeciego wymiaru wprowadza także konieczność zmian w doborze odpowiedniej heurystyki odpowiedzialnej za oszacowanie drogi pozostałej do celu.

3.3.2 Tablica rezerwacji

Tablica rezerwacji (ang. *Reservation Table*) reprezentuje współdzieloną wiedzę o zaplanowanych ścieżkach przez wszystkich agentów. Jest to informacja o zajętości każdej z komórki na mapie w danym miejscu i określonym czasie [11]. Jak tylko agent zaplanuje trasę, każda komórka odpowiadająca ścieżce zaznaczana jest jako zajęta w tablicy rezerwacji.

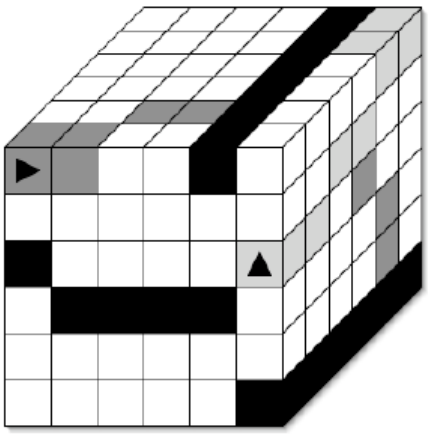
W prostej implementacji tablica rezerwacji jest trójwymiarową kostką (dwa wymiary przestrzenne i jeden wymiar czasu). Każda komórka kostki, która jest przecinana przez zaplanowaną przez agenta ścieżkę, jest zaznaczana jako nieprzejezdna przez określony czas trwania. W ten sposób zapobiega to planowania kolizyjnych tras przez pozostałych agentów. (por. rys. 3.2)



Rysunek 3.2: Dwie jednostki kooperacyjnie poszukujące tras. (A) Pierwsza jednostka znajduje ścieżkę i zaznacza ją w tablicy rezerwacji. (B) Druga jednostka znajduje ścieżkę, uwzględniając istniejące rezerwacje pól, również zaznaczając ją w tablicy rezerwacji. Źródło: [11]

Jeśli tylko niewielka część z całej tablicy rezerwacji będzie markowana jako zajęta, wydajniej jest zaimplementować ją jako tablicę typu *hash table*. Daje to zaletę oszczędności pamięci poprzez pamiętanie jedynie współrzędnych (x, y, t) zajętych pól.

W ogólności poszczególni agenci mogą mieć różną prędkość lub rozmiary, zatem tablica rezerwacji musi mieć możliwość zaznaczenia dowolnego zajętego obszaru. Zostało to przedstawione na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3: Tablica rezerwacji jest współdzielona między wszystkimi agentami. Jej rozmiar powinien być odpowiednio dopasowany do agentów o różnych prędkościach. Źródło: [11]

Niestety powyższy sposób wykorzystania tablicy rezerwacji w pewnych sytuacjach nie zapobiega zderzeniom czołowym jednostek zmierzających w przeciwnych kierunkach. Jeśli jedna jednostka zarezerwowała komórki (x, y, t) i $(x + 1, y, t + 1)$, nic nie stoi na przeszkodzie, aby kolejna jednostka mogła zarezerwować komórki $(x + 1, y, t)$ i $(x, y, t + 1)$. Ten problem może być rozwiązany poprzez zajmowanie (rezerwowanie) dwóch sąsiednich komórek w tym samym czasie t podczas ruchu robota, a nie tylko jednej komórki.

3.4 Hierarchical Cooperative A*

Metoda *Hierarchical Cooperative A** (HCA*) wprowadza pewną modyfikację do algorytmu Cooperative A*. Modyfikacja ta dotyczy heurystyki opartej na abstrakcjach przestrzeni stanu [11]. HCA* jest także jednym z przykładów rozproszonego podejścia do planowania tras.

W tym podejściu abstrakcja przestrzeni stanu oznacza zignorowanie wymiaru czasu, jak również tablicy rezerwacji. Innymi słowy, abstrakcja jest prostą dwuwymiarową mapą z usuniętymi agentami. Abstrakcyjne odległości mogą być rozumiane jako dokładne oszacowania odległości do celu, ignorując potencjalne interakcje z innymi agentami. Jest to oczywiście dopuszczalna heurystyka (por. 3.1.2). Niedokładność heurystyki wynika jedynie z trudności związanych z interakcją z innymi agentami (jak bardzo agent musi zboczyć z pierwotnie zaplanowanej ścieżki w celu ominięcia innych agentów).

Do wyznaczenia heurystyki dla abstrakcyjnej przestrzeni stanu opisywane podejście wykorzystuje algorytm przeszukiwania *Reverse Resumable A** (RRA*). Algorytm ten wykonuje zmodyfikowane przeszukiwanie A* w odwrotnym kierunku. Przeszukiwanie zaczyna się w węźle docelowym agenta i kieruje się do początkowego położenia. Jednak zamiast kończyć w tym punkcie, przeszukiwanie jest kontynuowane do natrafienia na węzeł N, w którym znajduje się agent.

Algorytm HCA* jest więc taki, jak algorytm CA*, ale z bardziej wyszukaną heurystyką, która używa RRA* do obliczania abstrakcyjnych odległości na żądanie.

3.5 Windowed Hierarchical Cooperative A*

Problematyczne zagadnienie związane z wyżej wspomnianymi algorytmami jest takie, że kończą one działanie w momencie, gdy agent osiąga swój cel. Jeśli agent znajduje się już w miejscu docelowym, np. w wąskim korytarzu, to może on blokować części mapy dla innych agentów. W takiej sytuacji agenci powinni kontynuować kooperację z pozostałymi jednostkami, nawet po osiągnięciu swoich celów. Może to zostać zrealizowane np. poprzez usunięcie się z wąskiego gardła w celu przepuszczenia pozostałych agentów, a następnie powrót do docelowego punktu [11].

Kolejny problem związany jest z wrażliwością na kolejność agentów (przydzielone priorytety). Chociaż czasem możliwy jest skuteczny, globalny przydział priorytetów [7], to jednak dobrym rozwiązaniem może być dynamiczne modyfikowanie kolejności agentów. Wtedy rozwiązania mogą zostać znalezione w tych przypadkach, w których zawiodło przydzielanie niezmiennych priorytetów [11].

Rozwiązaniem powyższych kwestii jest zamknięcie algorytmu przeszukiwania w oknie cza-

sowym. Kooperacyjne planowanie jest ograniczone do ustalonej głębokości. Każdy agent szuka częściowej ścieżki do celu i zaczyna nią podążać. W regularnych okresach (np. gdy agent jest w połowie drogi) okno jest przesuwane dalej i wyznaczana jest nowa ścieżka.

Aby zapewnić, że agenci podążają do prawidłowych punktów docelowych, ograniczana jest tylko głębokość przeszukiwania kooperacyjnego (związanego z wieloma agentami), podczas gdy przeszukiwanie abstrakcyjnych odległości (heurystyki opisanej w podrozdziale 3.4) odbywa się bez ograniczeń głębokości. Okno o rozmiarze w może być rozumiane jako pośrednia abstrakcja, która jest równoważna wykonaniu w kroków w rzeczywistym środowisku (z uwzględnieniem pozostałych agentów) a następnie wykonaniu pozostałych kroków zgodnie z abstrakcją (bez uwzględnienia innych agentów). Innymi słowy, pozostali agenci są jedynie rozważani dla w pierwszych kroków (poprzez tablicę rezerwacji) a dla pozostałych kroków są ignorowani [11].

Rozmiar okna jest wielkością ustalaną arbitralnie. Rozmiar okna powinien być przyjęty jako czas trwania najdłuższego przewidywanego wąskiego gardła (zatoru). Dobrą praktyką jest przyjęcie wartości równej liczbie agentów na mapie, gdyż to właśnie z ich powodów mogą wystąpić ewentualne zmiany w zaplanowanej trasie.

Porównanie HCA* i WHCA*

Algorytm HCA* wybiera ustaloną kolejność agentów i planuje trasy dla każdego agenta po kolei, unikając kolizji z poprzednio wyznaczonymi ścieżkami. Natomiast użycie przeszukiwania z przesuwanym oknem w WHCA* poprawia skuteczność algorytmu oraz przyspiesza proces wyznaczania rozwiązania [12].

Fakt wykonywania przeszukiwania w oknie oznacza, że planowanie algorytmem WHCA* wykonywane jest zawsze z ustaloną liczbą kroków w przyszłości i wybierany jest najbardziej obiecujący węzeł na granicy tego okna [13]. W metodach Hierarchical Cooperative A* oraz Cooperative A* wybór granicy wymiaru czasu (głębokości przeszukiwania w liczbie kroków) stanowi balans pomiędzy wydajnością a zupełnością algorytmu.

W obu podejściach HCA* i WHCA* zastosowano dodatkowy algorytm przeszukiwania wstecz (RRA*) wspomagający heurystykę. Służy on wyznaczeniu dokładnej odległości z węzła do celu, pomijając wpływ innych agentów. Jest to często heurystyka wysokiej jakości (prawie idealne oszacowanie), gorzej sprawdza się jedynie w środowiskach z dużą ilością wąskich gardeł i zatorów [13].

Chociaż takie przeszukiwanie wstecz prowadzi do początkowego wykonania większej ilości obliczeń (wykonanie pełnego przeszukania A* z punktu docelowego do punktu startowego, jak również do innych węzłów), to jednak koszt obliczeniowy w kolejnych krokach jest już zdecydowanie niższy [13].

3.6 Podsumowanie

Większość popularnych algorytmów wykorzystywanych do planowania tras dla wielu robotów mobilnych (agentów) opiera się o A*.

Kooperacyjne planowanie tras jest ogólną techniką koordynacji dróg wielu jednostek. Znajduje zastosowanie, gdzie wiele jednostek może komunikować się ze sobą, przekazując informację o ich ścieżkach. Poprzez planowanie wprzód w czasie, jak również i w przestrzeni, jednostki potrafią schodzić sobie z drogi nawzajem w celu uniknięcia kolizji. Metody kooperacyjnego planowania są bardziej skuteczne i znajdują trasy wyższej jakości niż te uzyskane przez A* z metodą *Local Repair*.

Wiele z udoskonaleń przestrzennego algorytmu A* może być również zaadaptowane do czasoprzestrzennego A*. Ponadto, wprowadzenie wymiaru czasu otwiera nowe możliwości do rozwoju algorytmów znajdowania dróg.

Najbardziej obiecującym pod względem skuteczności algorytmem wydaje się być metoda WHCA*.

Aby wydajnie prowadzić obliczenia, zakłada się, że każdy ruch robota trwa tyle samo. Wprowadza to upraszczające, błędne założenie, że ruch robota na pole w kierunku poziomym lub pionowym trwa tyle samo, co na ukos.

W wielu przypadkach metody do planowania bezkolizyjnych tras w systemach wieloagentowych mogą być wykorzystywane zamiennie zarówno do wyznaczania trajektorii robotów mobilnych, jak i w grach komputerowych, np. strategiach czasu rzeczywistego do planowania tras wielu jednostek.

Zaprezentowane algorytmy mogą znaleźć zastosowanie również w środowiskach z ciągłą przestrzenią oraz w dynamicznych środowiskach, w których to ścieżki muszą być przeliczane po wykryciu zmiany na mapie.

Rozdział 4

Opracowanie i implementacja algorytmów

Na potrzeby stworzenia oprogramowania symulacyjnego do planowania bezkolizyjnych tras dla wielu robotów mobilnych należało opracować i zaimplementować niezbędne algorytmy.

W tym rozdziale opisano algorytmy, które znalazły zastosowanie w stworzonej aplikacji służącej do symulacji ruchu robotów mobilnych. Należą do nich:

- Generator labiryntów (por. 4.1)
- Algorytm A* (por. 4.2)
- Algorytm LRA* (por. 4.3)
- Algorytm WHCA* (por. 4.4)
- Procedury obsługi dynamicznego przydzielania priorytetów oraz rozszerzania okna czasowego (por. 4.5)

4.1 Generator map

W rozdziale 6 opisano wyniki testów przeprowadzonych na losowo wygenerowanych środowiskach. Do ich automatycznego utworzenia wykorzystano własny generator map, który zapewnia im pewne pożądane własności opisane poniżej.

Zastosowanie zwykłego losowania położenia przeszkód na mapie mogłoby spowodować, że do niektórych obszarów na mapie nie udałoby się znaleźć drogi, nawet mimo braku istnienia pozostałych agentów. Takie środowisko nie miałoby sensownego zastosowania w praktyce, w kooperacyjnym znajdowaniu tras.

Zależy nam, aby uzyskać środowisko cechujące się dużą liczbą przeszkód i wąskimi korytarzami, aby uwypuklić problem występowania wąskich gardeł. Jednocześnie chcemy jednak, aby istniała możliwość przejścia między dwoma dowolnymi punktami na mapie. Do rozwiązania problemu wygenerowania takich labiryntów posłużymy się teorią grafów i pojęciem grafu spójnego.

Definicja 4.1.1. Graf spójny
Graf spójny spełnia warunek, że dla każdej pary wierzchołków istnieje łącząca je ścieżka.

Układ pól na mapie będziemy reprezentować jako graf. W naszym przypadku wszystkie przejezdne pola na mapie są wierzchołkami grafu. Natomiast połączenia między sąsiednimi przejezdnymi polami (między którymi istnieje możliwość bezpośredniego przejścia) są krawędziami w grafie.

Aby zapewnić, że powstały graf będzie spójny, na początku losujemy jedno pole będące ziarnem rozrostu labiryntu, a następnie do takiego podgrafu dołączamy kolejne wierzchołki, łącząc je drogą na mapie. Krok ten powtarzamy do momentu, aż wszystkie wierzchołki zostaną dołączone. W tym celu wykorzystamy dwie pomocnicze listy wierzchołków:

- lista wierzchołków *odwiedzonych* - zawiera wierzchołki (pola) należące już do labiryntu. Między wszystkimi wierzchołkami z listy *odwiedzonych* istnieje łącząca je droga, tworzą one graf spójny.
- lista wierzchołków *nieodwiedzonych* - zawiera nieodwiedzone wierzchołki (pola), które nie zostały jeszcze dołączone do labiryntu.

Kolejne kroki algorytmu przedstawiają się następująco:

1. Inicjalizacja pustych list wierzchołków: *odwiedzonych* i *nieodwiedzonych*.
2. Zapełnienie całej mapy przeszkodami.
3. Zaznaczenie co drugiego pola (wzdłuż każdego z wymiarów) jako wolne (por. rys. 4.1a) i dodanie ich do listy *nieodwiedzonych*.
4. Wylosowanie ziarna rozrostu labiryntu z listy *nieodwiedzonych*, przeniesienie go na listę *odwiedzonych*.
5. Łączenie kolejnych wierzchołków nieodwiedzonych z wierzchołkami odwiedzonymi. Dopóki lista *nieodwiedzonych* nie jest pusta:
   (a) Wylosowanie wierzchołka z listy *nieodwiedzonych*.

(b) Znalezienie najbliższego dla niego (w sensie metryki miejskiej) sąsiada z listy *odwiedzonych*.

(c) Połączenie wierzchołków drogą poprzez "wyburzanie" przeszkód (zaznaczania pola jako wolne) przy przesuwaniu się w kierunku wierzchołka docelowego, najpierw wzdłuż osi poziomej, następnie wzdłuż osi pionowej (por. rys. 4.1b).

Pojedyncze dołączanie kolejnych wierzchołków do rozrastającego się grafu labiryntu zapewnia, że wynikowy graf również będzie grafem spójnym.

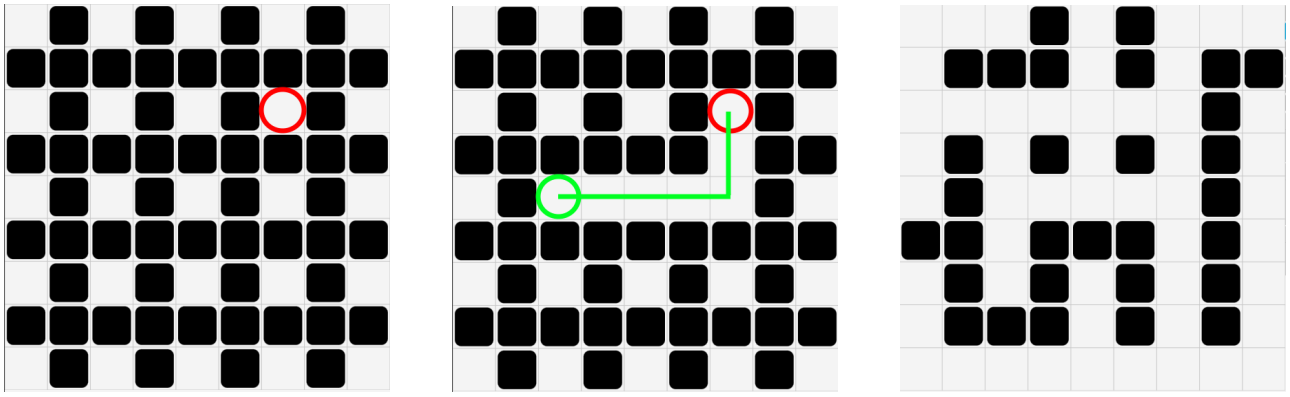
Poniżej przedstawiono pseudokod, obrazujący szczegóły działania zaproponowanej metody.

Algorytm 4.1.1 Generowanie labiryntu

Require: w - szerokość mapy, h - wysokość mapy

1: $mapa[][] \leftarrow$ nowa tablica $w \times h$ wypełniona wartościami $ZABLOKOWANE$
2: $nieodwiedzone \leftarrow \varnothing$ *// inicjalizacja pustych list*
3: $odwiedzone \leftarrow \varnothing$
4: **for** $x \leftarrow 0$; $x < w$; $x \leftarrow x + 2$ **do** *// co drugi indeks szerokości*
5: **for** $y \leftarrow 0$; $y < h$; $y \leftarrow y + 2$ **do** *// co drugi indeks wysokości*
6: $mapa[x][y] \leftarrow WOLNE$
7: dodaj $mapa[x][y]$ do $nieodwiedzone$
8: **end for**
9: **end for**
10: $ziarno \leftarrow$ losowe pole z $nieodwiedzone$
11: dodaj $ziarno$ do $odwiedzone$
12: usuń $ziarno$ z $nieodwiedzone$
13: **while** $nieodwiedzone \neq \varnothing$ **do** *// dopóki nieodwiedzone nie jest pusta*
14: $noweMiejsce \leftarrow$ losowe pole z $nieodwiedzone$
15: $sasiad \leftarrow$ znajdźNajbliższegoSąsiada($odwiedzone$, $noweMiejsce$)
16: wyburzDrogę($mapa$, $noweMiejsce$, $sasiad$)
17: dodaj $noweMiejsce$ do $odwiedzone$
18: usuń $noweMiejsce$ z $nieodwiedzone$
19: **end while**
20: **return** $mapa[][]$
21:
22: **function** wyburzDrogę($mapa$, $poleZ$, $poleDo$)
23: $x \leftarrow poleZ.x$
24: $y \leftarrow poleZ.y$
25: **while** $x < poleDo.x$ **do** *// Przesuwanie w prawo*
26: $mapa[x{+}{+}][y] \leftarrow WOLNE$
27: **end while**
28: **while** $x > poleDo.x$ **do** *// Przesuwanie w lewo*
29: $mapa[x{-}{-}][y] \leftarrow WOLNE$
30: **end while**
31: **while** $y < poleDo.y$ **do** *// Przesuwanie w dół*
32: $mapa[x][y{+}{+}] \leftarrow WOLNE$
33: **end while**
34: **while** $y > poleDo.y$ **do** *// Przesuwanie w górę*
35: $mapa[x][y{-}{-}] \leftarrow WOLNE$
36: **end while**
37: **end function**

Oznaczenie $x{+}{+}$ oraz $x{-}{-}$ oznacza odpowiednio postinkrementację i postdekrementację (dokonanie zwiększenia lub zmniejszenia o 1 **po** wykorzystaniu wartości zmiennej w wyrażeniu). Funkcja znajdźNajbliższegoSąsiada wyszukuje sąsiada dla pola *noweMiejsce* z listy *odwiedzone*. Wynik wyszukiwania jest najbliższy w sensie metryki miejskiej (metryki Manhattan).



(a) (b) (c)

Rysunek 4.1: Kolejne etapy generowania labiryntu. (a) Zaznaczenie co drugiego pola jako wolne i wybór ziarna rozrostu labiryntu. (b) Wylosowanie i łączenie kolejnego wierzchołka poprzez "wyburzanie" przeszkód na drodze (c) Wynikowa mapa pochodząca z generatora

Kolejne etapy generowania labiryntu zobrazowano na rysunku 4.1.

Na rysunku 4.2 przedstawiono przykładowy labirynt wygenerowany opisanym algorytmem.

Wygenerowane w ten sposób mapy mają jeszcze jedną właściwość - w takim środowisku robot nie ma nigdy możliwości wykonania ruchu ukośnego (innego niż w poziomie lub pionie). Pozwala to wprowadzić pewne ograniczenia do niektórych algorytmów planowania (por. 3.3), które przyspieszają wykonywanie obliczeń ze względu na możliwość założenia jednakowego czasu trwania wszystkich ruchów robotów. Nie będziemy jednak tego zakładać na tym etapie, gdyż chcemy, aby opracowana metoda planowania tras mogła także działać w środowiskach innego typu.

4.2 Wyznaczanie trajektorii dla pojedynczego robota

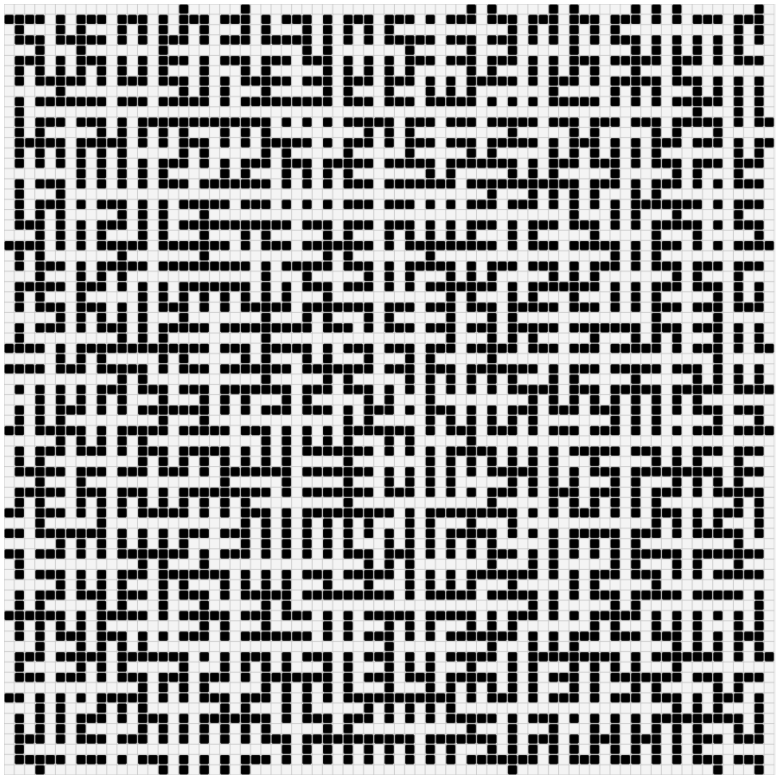
Wiele technik planowania tras, mimo iż może posłużyć do koordynacji ruchu wielu robotów, wykonuje indywidualne planowanie dla każdego robota z osobna. Przykładem takiego algorytmu jest *Local-Repair A**. Trajektorie wyznaczane są w oparciu o stan agenta, nie biorąc pod uwagę decyzji podjętych przez pozostałych agentów. Jako główny algorytm przeszukujący wykorzystywany jest najczęściej A*.

TODO przeredagować Zanim przejdziemy do koordynacji ruchu wielu robotów, konieczne jest zaimplementowanie metody wyznaczania trajektorii dla pojedynczego robota.

Ogólna zasada działania algorytmu A* została opisana w rozdziale 3.1

Przestrzenny A*

Heurystyka Manhattan



Rysunek 4.2: Przykładowy labirynt rozmiaru 75×75 *pochodzący z generatora map*

TODO przeredagować Wprowadzono modyfikacje Umożliwiono ruch ukośny agenta z punktu (x_1, y_1) do (x_2, y_2), ale tylko w przypadku, gdy na żadnym z czterech pól: (x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_2) nie znajduje się przeszkoda. Tak, aby w rzeczywistym środkowisku robot nie uderzał o wystający róg ściany.

TODO

Algorytm 4.2.1 Algorytm A*

```
1: function znajdzDrogę(mapa, start, cel)
2:     closed ← ∅                                                    // Lista zamkniętych
3:     open ← start                                                  // Lista otwartych
4:     start.g ← 0                                  // Zerowy koszt przejścia do węzła startowego
5:     if mapa[cel.x][cel.y] == ZABLOKOWANE then     // Punkt docelowy zablokowany
6:         return ∅                                                  // Brak rozwiązania
7:     end if
8:     while open ≠ ∅ do                              // dopóki lista otwartych nie jest pusta
9:         obecny ← znajdźMinF(open)                  // Szukamy pola o najniższej wartości f
10:        if obecny == cel then
11:            return zbudujŚcieżkę(cel)                          // Znaleziono ścieżkę
12:        end if
13:        dodaj obecny do closed                          // Przesunięcie z open do closed
14:        usuń obecny z open
15:        for sasiad ∈ sąsiedzi(obecny) do       // Dla każdego z wybranych przyległych pól
   (sasiad) do pola aktualnego
16:            if mapa[sasiad.x][sasiad.y] == ZABLOKOWANE then
17:                continue
18:            end if
19:            if not przejściePoprawne(obecny, sasiad) then
20:                continue
21:            end if
22:            nowyKoszt ← obecny.g+ kosztPrzejścia(obecny, sasiad)
23:            if nowyKoszt < sasiad.g then            // potrzeba ponownego przeliczenia
24:                if sasiad ∈ open then
25:                    usun sasiad z open
26:                end if
27:                if sasiad ∈ closed then
28:                    usun sasiad z closed
29:                end if
30:            end if
31:            if sasiad ∉ open ∧ sasiad ∉ closed then
32:                sasiad.g ← nowyKoszt              // zapisanie korzystniejszego połączenia
33:                sasiad.h ← heurystyka(sasiad, cel)
34:                sasiad.parent ← obecny            // pole obecny rodzicem dla pola sasiad
35:                dodaj sasiad do open
36:            end if
37:        end for
38:    end while
39:    return ∅                  // Przeanalizowano wszystkie węzły, brak istniejącej ścieżki
40: end function
```

Wykorzystane zostały pomocnicze funkcje:

- znajdźMinF(*lista*) - zwraca z listy pole o najniższej wartości f (sumy kosztu i heury-

styki)

- zbudujŚcieżkę(*cel*) - zwraca ścieżkę z punktu startowego do punktu *cel* zbudowaną na podstawie przechodzenia wstecz od punktu *cel* po kolejnych rodzicach węzłów
- sąsiedzi(*pole*) - zwraca zbiór pól bezpośrednio sąsiadujących (dla których istnieje możliwość przejścia) z *pole*
- przejściePoprawne(*poleZ*, *poleDo*) - zwraca prawdę wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje możliwość przejścia z *poleZ* do *poleDo*. Gdy wykonywany jest ruch ukośny, ale na przynajmniej jednym polu sąsiadującym z *poleZ* i *poleDo* znajduje się przeszkoda, to taki ruch jest niepoprawny.
- kosztPrzejścia(*poleZ*, *poleDo*) - zwraca koszt przejścia z *poleZ* do *poleDo*
- heurystyka(*poleZ*, *poleDo*) - zwraca przewidywaną pozostałą drogę od *poleZ* do *poleDo*

4.3 Detekcja i zapobieganie kolizjom

Do zapobiegania kolizjom wykorzystano metodę ponownego planowania

tymczasowy algorytm LRA* Detekcja i zapobieganie kolizjom między robotami *TODO* wyszło całkiem nieźle, raczej nie potrzeba przydziału priorytetów, można łączyć z D* Lite lub D* Extra Lite, lub RRA

4.4 Algorytm WHCA*

TODO rozwiązuje bottleneck ale tylko dla małej liczby agentów (2)

WHCA2 - własny, schemat blokowy, pseudokod

4.5 Dynamiczny przydział priorytetów

TODO metoda przydziału / zmiany priorytetów - zwiekszanie i rekalkulacja w przypadku braku znalezienia trasy, nie dotyczy np LRA

zwiększanie priorytetu w każdym kroku, jeśli nie znaleziono trasy, z próbą ponownego znalezienia w następnym kroku zwiększanie okna czasowego do max z priorytetów

przykłady rozwiązywanych problemów

Rozdział 5

Oprogramowanie symulacyjne

Na potrzeby pracy zostało stworzone oprogramowanie symulacyjne, które posłużyło do przeprowadzenia testów algorytmów oraz wizualizacji ich działania. Prezentacja działania algorytmów planowania tras możliwa jest dzięki wizualizacji ruchu robotów odbywajacego się w czasie rzeczywistym.

5.1 Funkcjonalności aplikacji

Aplikacja umożliwia dowolne definiowanie przez użytkownika środowiska, w którym poruszają się roboty. Obejmuje to:

- wybór rozmiaru mapy - dowolna wysokość oraz szerokość. Mapa nie musi być kwadratowa.
- możliwość wygenerowania mapy za pomocą generatora labiryntów (por. 4.1) lub manualnego umieszczania przeszkód na mapie za pomocą myszki,
- wybór liczby robotów i dokonanie ich automatycznego rozmieszczenia na mapie (w losowych polach z pominięciem pól zajętych). Użytkownik ma także możliwość manualnego dodawania i usuwania robotów.

położenia przeszkód Aplikacja umożliwia symulację ruchu robotów oraz definiowanie położenia przeszkód przez użytkownika.

Zakres pracy - Implementacja oprogramowania symulacyjnego

5.2 Interfejs użytkownika

TODO opis UI, zaznaczanie dróg, celów, płynne animacje, osobny wątek do UI kółka to roboty, wyświetlanie ścieżek, celów co robi każdy przycisk

5.3 Stack technologiczny

TODO Wykorzystane technologie i narzędzia - opis technologii: Java 8 - lambda, functional interfaces, streamy, Java FX - FXML, Spring (core): IoC, DI; Spring Boot, testy jednostkowe jUnit, git, IntelliJ Ultimate, Maven, Linux, logback, Guava - joiner

5.4 Testy

TODO TDD - Test driven development, testy jednostkowe do algorytmów pathfinding

5.5 Struktura aplikacji

TODO lista beanów / serwisów, struktura widok, prezenter, kontroler; osobny wątek w tle do obliczeń + synchronizacja, wątek UI - zapewnienie REal-time, prawie MVP

5.6 Screeny

TODO screeny

5.7 Zaimplementowane metody

TODO potential fields, A*, LRA*, WHCA*

5.8 featurey

ustawianie random seeda ponowne wykonanie symulacji - te same warunki przełaczanie między metodami na zakładkach ? wykonanie symulacji w pojedynczych krokach resizable window - responsive

5.9 Ograniczenia

TODO nałożone uproszczenia: ruch skośny trwa tyle samo, czas dyskretny, brak czasu na obrót
TODO publikacja na GitHub, licencja MIT, filmiki na YT

5.10 Metoda pól potencjałowych

TODO że nie wyszło , bo minima lokalne zalety: real time - potrzeba mało obliczeń, szybka metoda

Rozdział 6

Wyniki testów

6.1 Obszerne testy aplikacji

TODO obszerne testy, porównanie metod: LRA*, CA*, WHCA* przy tych samych warunkach początkowych, porównanie czasu wykonania, porównanie tego samego algorytmu w zależności od parametru (np. okna czasowego); badanie skuteczności, długości tras, czasu wykonania, do przeprowadzenia testów wykorzystano biblitekę jUnit, która co prawda służy do wykonywania testów jednostkowych sprawdzających poprawność pojedynczych komponentów aplikacji nie działa wycofywanie się obu robotów (zawsze jeden czeka)

6.2 Środowiska

labirynt, otwarte, puzzle 15

6.3 Porównanie wyników

porównanie WHCA* przy różnych oknach czasowych porównanie metod przydziału i zmiany priorytetów - jak zmienia się skuteczność po wprowadzeniu zmiany priorytetów porównanie LRA* z WHCA* porównanie CA* z WHCA* porównanie z potential fields porównanie WHCA2 i kilavuz WHCA ?

Rozdział 7

Podsumowanie

TODO Większość popularnych algorytmów wykorzystywanych do planowania tras dla wielu robotów mobilnych (agentów) opiera się o A*.

Kooperacyjne planowanie tras jest ogólną techniką koordynacji dróg wielu jednostek. Znajduje zastosowanie, gdzie wiele jednostek może komunikować się ze sobą, przekazując informację o ich ścieżkach. Poprzez planowanie wprzód w czasie, jak również i w przestrzeni, jednostki potrafią schodzić sobie z drogi nawzajem w celu uniknięcia kolizji. Metody kooperacyjnego planowania są bardziej skuteczne i znajdują trasy wyższej jakości niż te uzyskane przez A* z metodą *Local Repair*.

Wiele z udoskonaleń przestrzennego algorytmu A* może być również zaadaptowane do czasoprzestrzennego A*. Ponadto, wprowadzenie wymiaru czasu otwiera nowe możliwości do rozwoju algorytmów znajdowania dróg.

Najbardziej obiecującym pod względem skuteczności algorytmem wydaje się być metoda WHCA*.

Aby wydajnie prowadzić obliczenia, zakłada się, że każdy ruch robota trwa tyle samo. Wprowadza to upraszczające, błędne założenie, że ruch robota na pole w kierunku poziomym lub pionowym trwa tyle samo, co na ukos.

W wielu przypadkach metody do planowania bezkolizyjnych tras w systemach wieloagentowych mogą być wykorzystywane zamiennie zarówno do wyznaczania trajektorii robotów mobilnych, jak i w grach komputerowych, np. strategiach czasu rzeczywistego do planowania tras wielu jednostek.

Zaprezentowane algorytmy mogą znaleźć zastosowanie również w środowiskach z ciągłą przestrzenią oraz w dynamicznych środowiskach, w których to ścieżki muszą być przeliczane po wykryciu zmiany na mapie.

7.1 Dyskusja wyników

Bibliografia

[1] Bennewitz M.; Burgard W.; Thrun S. *Optimizing Schedules for Prioritized Path Planning of Multi-Robot Systems*. 2001.

[2] Cap M.; Novak P.; Vokrinek J.; Pechoucek M. *Asynchronous Decentralized Algorithm for Space-Time Cooperative Pathfinding*. Workshop Proceedings of the European Conference on Articial Intelligence (ECAI 2012), 2012.

[3] Duc L. M.; Sidhu A. S.; Chaudhari N. S. *Hierarchical Pathfinding and AI-Based Learning Approach in Strategy Game Design*. International Journal of Computer Games Technology, 2008.

[4] Geramifard A.; Chubak P. *Efficient Cooperative Path-Planning*. Computing Science Department, University of Alberta, 2005.

[5] Hart P. E.; Nilsson N. J.; Raphael B. *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4, 1968.

[6] Koenig S.; Likhachev M. *D* Lite*. Proceedings of the AAAI Conference of Artificial Intelligence, 2002.

[7] Latombe J. *Robot Motion Planning*. Boston, MA: Kluwer Academic, 1991.

[8] Mówiński K.; Roszkowska E. *Sterowanie hybrydowe ruchem robotów mobilnych w systemach wielorobotycznych*. Postępy Robotyki, 2016.

[9] Przybylski M.; Putz B. *D* Extra Lite: A Dynamic A* With Search-Tree Cutting and Frontier-Gap Repairing*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2017.

[10] Siemiątkowska B. *Uniwersalna metoda modelowania zachowań robota mobilnego wykorzystująca architekturę uogólnionych sieci komórkowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.

[11] Silver D. *Cooperative Pathfinding*. Proceedings of the First Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference, 2005.

[12] Standley T.; Korf R. *Complete Algorithms for Cooperative Pathfinding Problems*. Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2011.

[13] Toresson A. *Real-time Cooperative Pathfinding*. 2010.

[14] Zhu Q.; Yan Y.; Xing Z. *Robot Path Planning Based on Artificial Potential Field Approach with Simulated Annealing*. Intelligent Systems Design and Applications, 2006.

[15] A* pathfinding for beginners. `http://homepages.abdn.ac.uk/f.guerin/pages/teaching/CS1013/practicals/aStarTutorial.htm`. Dostęp: 2018-01-02.

[16] Amazon warehouse demand devours robots and workers. `https://www.roboticsbusinessreview.com/supply-chain/amazon_warehouse_demand_devours_robots_and_workers`. Dostęp: 2018-01-05.

[17] Choset H. Robotic motion planning: Potential functions. `https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/lecture/Chap4-Potential-Field_howie.pdf`. Dostęp: 2018-01-02.

[18] Roboty TUG i HOMER firmy Aethon. `http://www.aethon.com/tug/tughealthcare/`. Dostęp: 2018-01-02.

[19] Searching using A*. `http://web.mit.edu/eranki/www/tutorials/search/`. Dostęp: 2018-01-02.

Wykaz skrótów

CA*	Cooperative A*
HCA*	Hierarchical Cooperative A*
LRA*	Local Repair A*
MAS	Multi-Agent System
RRA*	Reverse Resumable A*
RTS	Real Time Strategy
WHCA*	Windowed Hierarchical Cooperative A*

Spis rysunków

Spis tabel

Spis załączników

Na załączonej do pracy płycie CD znajdują się następujące treści:

- Niniejsza praca w formacie PDF – plik *Praca/Praca_Magisterska_Ireneusz_Szulc.pdf*.
- Archiwum zawierające kody źródłowe programu symulacyjnego – plik *Kody_źródłowe/apliakcja-symulacja.zip*