



# **POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Instytut Systemów Elektronicznych

Maciej Gąbka

nr albumu: 198404

Praca dyplomowa magisterska

## **Sterowanie robotem - zawodnikiem rozgrywek RoboCup**

Praca wykonana pod kierunkiem  
prof. dr hab. Jarosława Arabasa

Warszawa 2011

## ***Tytuł:* Sterowanie robotem - zawodnikiem rozgrywek RoboCup**

Celem pracy było przygotowanie środowiska symulacyjnego odpowiadającego realiom ligi małych robotów w rozgrywkach RoboCup oraz opracowanie algorytmu nawigacji, służącego do wyznaczania bezkolizyjnej ścieżki w silnie dynamicznym środowisku. Algorytm został poddany eksperymentom, celem sprawdzenia jego użyteczności oraz porównania z wcześniej stosowanym rozwiązaniem. Zaprezentowane zostały modele robotów oraz wyjaśnione zasady ich tworzenia. Zamieszczono także przegląd algorytmów unikania kolizji. W dalszej części pracy skupiono się na opracowaniu algorytmu sterującego zawodnikami. Zaimplementowano algorytmy pozwalające robotowi na wykonywanie prostych zachowań niezbędnych do gry w piłkę nożną, takich jak: podawanie piłki, wychodzenie na pozycję do strzału, strzelanie na bramkę, jazda do zadanego celu. Koordynację działań zawodników osiągnięto wzorując się częściowo na architekturze STP szerzej opisanej w pracy. Algorytm sprawdzono podczas eksperymentów wzorowanych na zadaniach eliminacyjnych w rozgrywkach robotów.

***Title:***

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>5</b>
1.1	Zakres pracy . . . . .	5
1.2	Cel pracy . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Liga RoboCup</b>	<b>10</b>
2.1	Opis projektu RoboCup . . . . .	10
2.2	Szczegółowe omówienie ligi Small-size (F180) . . . . .	12
2.2.1	Zasady . . . . .	12
2.2.2	Schemat komunikacji . . . . .	13
2.3	Budowa robota w <i>Small-size League</i> . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Player/Stage/Gazebo</b>	<b>16</b>
3.1	Koncepcja . . . . .	16
3.2	Architektura symulatora . . . . .	17
3.2.1	Gazebo . . . . .	18
3.3	Modelowanie obiektów w Gazebo . . . . .	19
3.3.1	Zasady modelowania w Gazebo 0.10 . . . . .	19
3.3.2	Realizacja środowiska Ligi RoboCup . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Sterowanie modelem robota z <i>Small-size League</i></b>	<b>30</b>
4.1	Omówienie omnikierunkowej bazy jezdnej . . . . .	30
4.1.1	Opis położenia kół . . . . .	31
4.1.2	Opis kinematyki oraz dynamiki bazy jezdnej . . . . .	32
4.2	Obliczanie profilu prędkości liniowej robota . . . . .	33
4.3	Dryblowanie z piłką . . . . .	35

<b>5</b>	<b>Algorytmy unikania kolizji</b>	<b>37</b>
5.1	Krótki przegląd algorytmów unikania kolizji . . . . .	37
5.1.1	Algorytm Bug . . . . .	37
5.1.2	Algorytm VHF . . . . .	39
5.1.3	Technika dynamicznego okna . . . . .	41
5.1.4	Algorytmy pól potencjałowych . . . . .	41
5.1.5	Algorytm CVM ( <i>Curvature Velocity Method</i> ) . . . . .	44
5.2	Zasada działania CVM . . . . .	45
5.3	Algorytm RRT ( <i>Rapidly-Exploring Random Tree</i> ) . . . . .	51
5.3.1	Modyfikacje algorytmu, czyli przejście z RRT do ERRT . . .	53
5.4	Zalety algorytmu RRT w stosunku do CVM . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Testy zaimplementowanej wersji algorytmu RRT</b>	<b>56</b>
6.1	Opis implementacji algorytmu RRT . . . . .	56
6.1.1	Parametry zastosowanego algorytmu . . . . .	61
6.2	Aplikacja analizująca działanie algorytmu . . . . .	61
6.3	Opis środowisk testowych . . . . .	62
6.4	Wyniki eksperymentów w środowisku statycznym . . . . .	64
6.5	Wyniki eksperymentów w środowisku dynamicznym . . . . .	68
6.6	Komentarz do wyników . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Realizacja złożonych funkcji przez robota</b>	<b>73</b>
7.1	Opis algorytmu sterującego zawodnikiem . . . . .	74
7.1.1	Omówienie warstwy <b>Play</b> . . . . .	76
7.1.2	Omówienie warstwy <b>Tactics</b> . . . . .	77
7.1.3	Realizacja <b>Skills</b> . . . . .	78
7.1.4	Opis zrealizowanej wersji algorytmu . . . . .	79
7.2	Testy warstw <b>tactics</b> oraz <b>skills</b> . . . . .	82
7.3	Nawigacja w dynamicznym środowisku . . . . .	82
7.3.1	Wyniki testu nawigacji . . . . .	83
7.4	Strzelanie po podaniu . . . . .	87
7.4.1	Wyniki testu . . . . .	88

<b>8 Podsumowanie</b>	<b>90</b>
<b>A Zawartość płyty CD</b>	<b>91</b>
<b>B Instrukcja instalacji Gazebo</b>	<b>92</b>
<b>C Szczegóły eksperymentów</b>	<b>93</b>

# Rozdział 1

## Wstęp

Szybki postęp techniczny zapoczątkowany w XX wieku umożliwił rozwój nowych dziedzin nauki, między innymi robotyki. Obecnie maszyny mogą zastępować ludzi przy wykonywaniu wielu rozmaitych czynności. Innowacyjne rozwiązania stwarzają jednak potrzebę opracowania wymagającego środowiska testowego. Jedną z takich inicjatyw, mających na celu wspieranie rozwoju i popularyzację robotyki, są rozgrywki RoboCup. W obrębie przedsięwzięcia wyróżnionych jest kilka lig różniących się zasadami oraz typem robotów biorących udział w zawodach. Głównym celem przyświecającym organizatorom jest stworzenie do 2050 roku drużyny robotów zdolnej wygrać z ówczesnymi mistrzami świata. Liga RoboCup budzi zainteresowanie na całym świecie a prace z nią związane są prowadzone w wielu środowiskach akademickich. W Polsce nie została jeszcze stworzona drużyna, która wystartowałaby w tych rozgrywkach. Rozwiązanie problemu stawia przed uczestnikami wyzwania konstrukcyjne oraz algorytmiczne. Niniejsza praca skupiona jest głównie na aspektach algorytmicznych. Omówiony zostanie problem sterowania zawodnikiem, wyznaczania bezkolizyjnej ścieżki do celu oraz realizacji prostych zachowań niezbędnych podczas rozgrywek.

### 1.1 Zakres pracy

Niniejsza praca jest niejako kontynuacją działań podjętych podczas realizacji pracy inżynierskiej. Tematyka w niej poruszona dotyczy na wstępie samych rozgrywek RoboCup. Jak już napisano we wstępie przedsięwzięcie dotyczy głównie rozgrywek piłkarskich, w których udział biorą roboty. W ostatnich latach robotyka cieszy się

szerokim zainteresowaniem, dlatego też sam projekt został poszerzony o nowe obszary tematyczne. Obecnie podział jest następujący:

- *RoboCupSoccer*, czyli rozgrywki piłkarskie autonomicznych robotów,
- *RoboCupRescue*, obejmujący działania robotów w sytuacjach kryzysowych, czy niebezpiecznych dla ludzi,
- *RoboCup@Home*, skupiający się na robotyce mającej na celu pomaganie człowiekowi w codziennych czynnościach,
- *RoboCupJunior* popularyzujący robotykę wśród młodzieży.

Same rozgrywki piłkarskie *RoboCupSoccer* także nie są jednolite, zostały one podzielone w zależności od konstrukcji mechanicznej zawodników. Więcej informacji na ten temat zostanie zaprezentowanych w rozdziale 2. W ramach samej pracy skupiono się na lidze małych robotów (*Small-size League*), ponieważ już wcześniej prowadzone były prace w tym kierunku na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej.

W dalszej części pracy opisano nowe testowe środowisko symulacyjne oraz wprowadzone poprawki modyfikujące działanie symulatora. Ponieważ wcześniejsze eksperymenty prowadzono w środowisku *Player/Stage/Gazebo*, zdecydowano się na dalsze prace na tej platformie. Opracowane zostały nowe modele zawodników wzorowane na rzeczywistych, holonomicznych robotach biorących udział w rozgrywkach. Przygotowano sterownik (element symulatora) umożliwiający: kontrolę nad prędkością robota (wyposażono go dodatkowo w regulator PID), prowadzenie piłki, jak i oddawanie strzału. W stosunku do poprzednich prac zdecydowano się także na implementację oraz poddanie testom nowego algorytmu nawigacji. Rozwiązanie to zostało przetestowane w takich samych warunkach jak poprzednie. Dokonano także analizy i porównania otrzymanych wyników. Zaprezentowano również inne, stosowane w robotyce, metody unikania kolizji. Jeden z nich został zaimplementowany w celu rozwiązywania mniej złożonych zadań takich jak odjechanie od przeszkody w momencie wystąpienia kolizji.

W tekście przedstawiono jedno z podejść, powszechnie stosowanych w rozgrywkach do koordynacji i planowania działań zawodników *Skill Tactics Play* (STP) [11]. Zakłada ono planowanie zachowań drużyny na trzech poziomach. Każdy odnosi się do innej warstwy abstrakcji.

1. Najwyżej w hierarchii znajduje się poziom **Play**. Przez to pojęcie rozumiany jest plan gry dla całej drużyny uwzględniający koordynację poczynań pomiędzy zawodnikami. Plan zakłada również przydział zawodnika do określonej roli. W oryginalnym rozwiązaniu role przydzielane są dynamicznie w zależności od sytuacji na boisku. W obrębie danego planu zawodnik wykonuje swoją rolę (sekwencję kilku działań (*Tactic*)) aż do momentu zakończenia danego planu lub wyznaczenia kolejnego.
2. Przez *Tactic* rozumiany jest plan działań w obrębie jednej roli. Taktyka ma na celu wykonanie przez robota pojedynczej złożonej akcji. Przykładem może być strzał na bramkę. Robot dostaje polecenie oddania strzału na bramkę, zatem plan jego poczynań ma doprowadzić do sytuacji, w której osiągnie on pozycję umożliwiającą oddanie strzału na bramkę z określonym powodzeniem. Plan na szczeblu pojedynczego robota jest wykonywany do momentu zmiany strategii gry całej drużyny (ponownego przydziału robotów do ról). Przykładowe *Tactics*:

- strzał na bramkę,
- podanie piłki,
- odebranie podania,
- blokowanie innego robota,
- wyjście na pozycję,
- bronienie pozycji,
- dryblowanie z piłką.

Pojedyncza taktyka determinuje skończony automat stanów, w którym elementami są *Skills*. Wykonanie bieżącej taktyki sprowadza się do przechodzenia pomiędzy kolejnymi zachowaniami robota w obrębie danego automatu.



3. Najniżej w hierarchii znajduje się warstwa *Skills*, odnosi się ono do konkretnych umiejętności robota, takich jak:

- przechwytywanie piłki,
- oddawanie strzału,
- doprowadzenie piłki do celu,
- przemieszczenie robota do celu,
- podążanie za innym robotem.

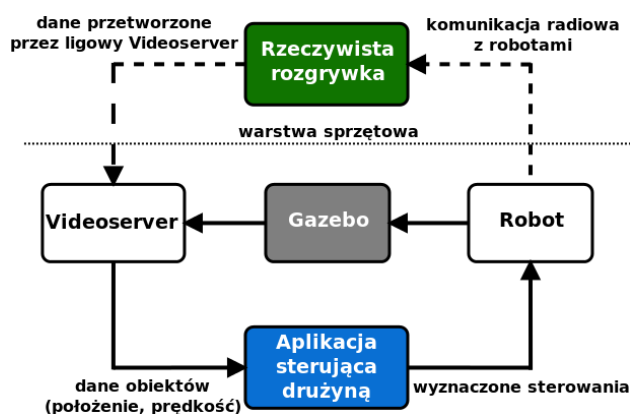
Na tym szczeblu nie występuje koordynacja w obrębie drużyny. W każdym kroku gry powinno być określone jakie zachowanie ma wykonywać robot. Z każdego *Skill*, w każdym momencie określone musi być przejście do nowego zadania bądź kontynuowanie tego samego zadania. Przykładowo jeśli zlecimy robotowi przemieszczenie się z piłką do celu a piłka odskoczy robotowi, to powinien do niej podjechać, przechwycić ją, a następnie ponownie prowadzić do zadanego celu (należy jednak cały czas pamiętać, że jeśli nastąpi dobra okazja do strzału na bramkę, robot powinien ją wykorzystać).

W ramach pracy w pełni zrealizowane zostały dwie warstwy z oryginalnej hierarchii opisanej powyżej (*Skills* oraz *Tactics*). Aplikację projektowano w taki sposób, aby pozostawić miejsce na pełną implementację warstwy *Play*, którą zrealizowano jedynie w stopniu niezbędnym do przeprowadzenia eksperymentów. Użyteczność algorytmu sprawdzono podczas przeprowadzonych eksperymentów, wzorowanych na rzeczywistych zadaniach eliminacyjnych stosowanych w rozgrywkach RoboCup w ostatnich latach.

## 1.2 Cel pracy

Za główny cel niniejszej pracy postawiono stworzenie oprogramowania umożliwiającego wykonywanie podstawowych elementów gry w piłkę nożną przez roboty. W tym celu posłużono się architekturą STP. Aby jednak zrealizować to zadanie konieczne było stworzenie środowiska symulacyjnego, umożliwiającego modelowanie rozgrywki *Small-size League*. Przy opracowywaniu modelu środowiska starano się w jak największym stopniu odzwierciedlić realia ligi *Small-size League*. Po drugie

środowisko symulacyjne miało być na tyle elastyczne, aby w przyszłości umożliwiało testowanie różnorodnych rozwiązań sterowania drużyną. Zachowano schemat przepływu informacji z pracy inżynierskiej, który zamieszczono na rysunku 1.1. Stosowany w rozgrywkach *Small-size League videosever* został ujęty w osobną warstwę aplikacji komunikującą się bezpośrednio z symulatorem. Osobną warstwę stanowi także część aplikacji odpowiedzialna za sterowanie robotem.



Rysunek 1.1: Komunikacja pomiędzy warstwami aplikacji

Główną motywacją takiej architektury było umożliwienie prostego przystosowania aplikacji do sterowania rzeczywistym robotem pobierającym dane z zewnętrznego serwera. Ponieważ w rozgrywkach biorą udział roboty holonomiczne, zdecydowano się na odejście od modelu robota o napędzie różnicowym stosowanego w pracy inżynierskiej. Opracowano zatem nowy model wzorowany na rzeczywistych zawodnikach. Kolejnym celem pracy, wynikającym bezpośrednio ze zmiany modelu robota, było zaimplementowanie i przetestowanie algorytmu nawigacji w dynamicznym środowisku. Zdecydowano się na algorytm RRT, postanowiono także porównać jego skuteczność z wcześniej stosowanym CVM.

## Rozdział 2

# Liga RoboCup

### 2.1 Opis projektu RoboCup

Jak już wspomnianiano we wstępie, głównym celem rozgrywek *RoboCupSoccer* jest stworzenie do 2050 roku drużyny w pełni autonomicznych robotów humanoidalnych zdolnych wygrać rozgrywkę z aktualnymi mistrzami świata. W niniejszej pracy problematyka rozgrywek robotów w piłkę nożną zostanie przedstawiona jedynie skrótowo. Skupiono się na omówieniu budowy robota wykorzystywanego w lidze, którą starano się odwzorować. Więcej informacji na temat projektu RoboCup można znaleźć w pracy inżynierskiej [15] lub na oficjalnej stronie projektu <http://www.robocup.org>. Kluczową rolę w realizacji postawionego zadania pełni konstrukcja zarówno mechaniczna jak i elektroniczna robota. Zawodnik powinien być wyposażony w odpowiedni zestaw czujników umożliwiających osiągnięcie pełnej autonomiczności. Osobnym problemem jest opracowanie funkcjonalnego oprogramowania umożliwiającego koordynację działań wielu robotów. Projekt RoboCup jest realizowany nieprzerwanie od września 1993 roku, a mistrzostwa odbywają się regularnie w różnych miejscach na świecie. Rozgrywki toczony są w kilku niezależnych od siebie ligach. Aktualnie wyróżnione zostały następujące ligi:

- *Soccer Simulation League*
- *Small-size League*
- *Middle-size League*
- *Standard Platform League*

- *Humanoid League*

*Soccer Simulation League* jest pewnego rodzaju grą, w której uczestniczące drużyny implementują program decydujący o zachowaniu zawodników. Jest ona najstarszą z lig, która towarzyszy przedsięwzięciu od samego początku jego istnienia. Zachowanie robotów jest symulowane za pomocą programu zwanego *RoboCup Soccer Simulator*.

Kolejną z lig jest *Small-Size League*. W rozgrywkach tej ligi drużyna składa się maksymalnie z pięciu niewielkich robotów, takich jak widoczne na fotografii 2.1. Roboty nie są jednak w pełni autonomiczne, ponieważ nie posiadają własnych sensorów wizyjnych. Algorytm sterujący czerpie informację o położeniu piłki oraz robotów z globalnego systemu wizyjnego *SSL-Vision* składającego się z szeregu kamer umieszczonych nad boiskiem. Każde z boisk, na którym toczony są rozgrywki jest wyposażone w ten system. Drużyna odbiera już przetworzone informacje o położeniu i prędkościach robotów oraz piłki. Lidze tej został poświęcony w całości paragraf 2.2.

*Middle-size League* to rozgrywki w pełni autonomicznych robotów. W przeciwieństwie do poprzedniej ligi, globalny system wizyjny jest całkowicie zakazany. Każdy robot jest wyposażony w osobny zestaw czujników wizyjnych. Zawodnicy niezależnie muszą reagować na zmieniającą się sytuację na planszy oraz wspólnie dążyć do wypracowania strategii determinowanej przez zachowania pozostałych graczy.

W projekcie wyróżnione są także ligi *Standard Platform League*, czyli rozgrywki piesków *Aibo*, konstruowanych przez firmę *Sony* oraz liga robotów humanoidalnych. W tej ostatniej biorą udział roboty przypominające swoją budową ludzi, czyli posiadające korpus, nogi, ręce oraz głowę.

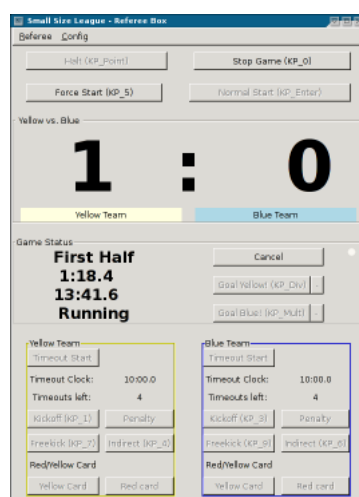


Rysunek 2.1: Roboty biorące udział w *Small-Size League*  
(źródło: [www.robocup.org](http://www.robocup.org))

## 2.2 Szczegółowe omówienie ligi Small-size (F180)

### 2.2.1 Zasady

Corocznie przed nowymi mistrzostwami wydawany jest nowy regulamin, który będzie na nich obowiązywać. Zmiany nie są zazwyczaj daleko idące, modyfikacje dotyczą głównie rozmiaru boiska. W poprzednich latach dopuszczono możliwość stosowania przez drużyny własnego globalnego systemu udostępniającego informację o położeniu i prędkości zawodników. Jednak od 2010 roku sprawę systemu wizyjnego usystematyzowano, stworzono system o nazwie *SSL-Vision*, który jest obowiązkowy w lidze. Całkowity rozmiar boiska, wliczając w to pola autowe, jest równy 7.4 [m] na 5.4 [m], natomiast sama plansza, na której toczona jest rozgrywka ma wymiary 6.05 [m] na 4.05 [m]. Powierzchnia jest równa i wyłożona zielonym dywanem lub wykładziną. Podczas meczu wykorzystywana jest standardowa piłka do golfa koloru pomarańczowego. Jej promień jest równy 43 [mm], a masa 46 [g]. Uczestniczące drużyny mogą składać się maksymalnie z pięciu robotów, jeden z nich może zostać oddelegowany do pełnienia funkcji bramkarza, jednak powinno to zostać zgłoszone przed rozpoczęciem meczu. W trakcie rozgrywki roboty mogą być wymieniane na nowe, tak samo jak w rzeczywistym meczu. Sytuacja taka musi także być zgłoszona wcześniej arbitrowi. Konstrukcja mechaniczna robota nie jest mocno ogra-



Rysunek 2.2: Program wykorzystywany przez sędziego w *Small Size League*  
(źródło: [www.robocup.org](http://www.robocup.org))

niczona, zalecenia dotyczą głównie wymiarów. Robot powinien zmieścić się w walcu o średnicy 18 [cm] oraz wysokości 15 [cm]. Dodatkowo może on być wyposażony w urządzenie do prowadzenia piłki - *dribbler*. Tutaj jednak istnieją pewne ograniczenia dotyczące samej budowy urządzenia oraz wykorzystywania go w czasie gry. Zawodnik nie może pokonać z piłką odległości większej niż 50 [cm]. Po przejechaniu takiego dystansu powinien zdecydować się na podanie jej innemu zawodnikowi lub oddanie strzału na bramkę. Może również zdecydować się na kopnięcie jej przed siebie i dalsze podążanie w jej kierunku. Niedostosowanie się do tych zasad powoduje sygnalizowanie przez arbitra przewinienia oraz wykonanie rzutu wolnego przez drużynę przeciwną. Konstrukcja urządzenia do dryblowania nie powinna także uniemożliwiać kontaktu z piłką zawodnikowi drużyny przeciwnej.

Rozgrywka jest całkowicie kontrolowana przez arbitra, który czuwa nad tym, aby regulamin był przestrzegany. Do jego zadań należy sygnalizowanie przewinień, zdobytych bramek oraz innych typowych sytuacji na boisku. Sędzia ma prawo zmienić swoją decyzję po konsultacjach z asystentem. Arbiter komunikuje się z zawodnikami za pomocą programu, którego interfejs użytkownika zamieszczono na rysunku 2.2 .

Wszystkie akcje sędziego wprowadzone do tego programu są udostępniane specjalnym protokołem zawodnikom, dzięki temu rozgrywka nie wymaga ludzkiej ingerencji.

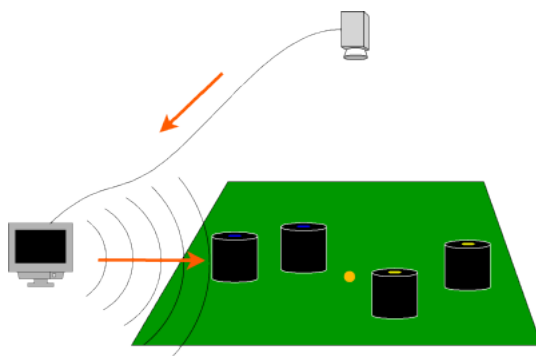
### 2.2.2 Schemat komunikacji

Kluczową sprawą podczas rzeczywistej rozgrywki jest dostęp do informacji o położeniu piłki i pozostałych robotów. Jak już wspomniano wcześniej organizacja udostępnia drużynom w tym celu system *SSL-Vision*. Uproszczony schemat systemu wizyjnego widoczny jest na rysunku 2.3. Składa się on z kamery ustawionej centralnie nad boiskiem oraz ze specjalnej aplikacji *SSL-Vision*<sup>1</sup>. Obecnie w skład systemu może wchodzić kilka kamer. Obraz zarejestrowany przez kamery jest przesyłany do komputera, gdzie jest przetwarzany przez *SSL-Vision* w czasie rzeczywistym. Program dostarcza informację o położeniu oraz o prędkościach robotów i piłki. Dane te następnie są wykorzystywane przez rywalizujące ze sobą drużyny na potrzeby ich algorytmów. Algorytm sterujący jako wynik swojego działania powinien zwracać kierunek i prędkość zawodników. Ta ostateczna informacja jest wysyłana droga

---

<sup>1</sup>Do pobrania z <http://code.google.com/p/ssl-vision>

radiową do robota.

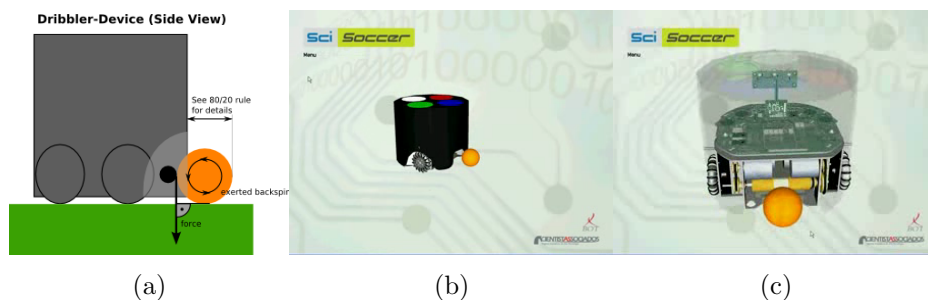


Rysunek 2.3: Schemat komunikacji w *Small Size League*  
(źródło: [www.robocup.org](http://www.robocup.org))

*SSL-Vision* może rozpoznawać nie tylko położenie poszczególnych robotów, ale także ich orientację na płaszczyźnie. Jednak do tego celu niezbędne jest zastosowanie specjalnych znaczników. Każdej z drużyn przed rozpoczęciem rozgrywki zostaje przypisana para kolorów, jakie zawiera znacznik. Dzięki zastosowaniu dwóch kolorów możliwe jest nie tylko rozróżnianie robotów z różnych drużyn, ale także określanie ich orientacji.

## 2.3 Budowa robota w *Small-size League*

Oficjalne zasady ligi nie zobowiązują uczestników do używania konkretnych modeli robotów. Określone są jedynie rygory dotyczące maksymalnych wymiarów robota, oraz sposoby prowadzenia piłki. Obserwując kolejne mistrzostwa, łatwo zauważyć, że wśród zgłaszanych drużyn dominuje jedna konstrukcja mechaniczna. Została ona zaprezentowana na rysunkach 2.4. Podczas gry w piłkę nożną często wynika potrzeba zmiany orientacji w miejscu. W prezentowanym rozwiązaniu zdecydowano się na omnikierunkową bazę jezdną. Składa się ona z trzech niezależnie napędzanych kół szwedzkich. Koło szwedzkie posiada taką zaletę, iż dodatkowo poza obrotem wokół własnej osi umożliwia obrót wokół punktu styczności koła z podłożem oraz wokół osi rolek umieszczonych na kole. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania uzyskano w pełni holonomiczną budowę robota. Robot biorący udział w rozgrywkach musi być zdolny do prowadzenia piłki. Zastosowana konstrukcja jest wyposażona w urządzenie do dryblowania widoczne na rysunkach 2.4a oraz 2.4c. Zbudowane jest ono z walca

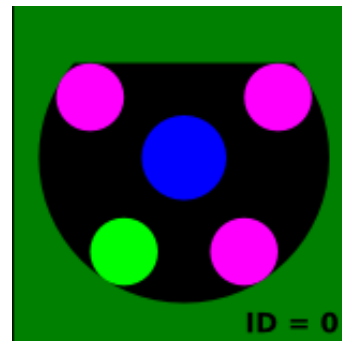


Rysunek 2.4: Popularny model robota wykorzystywany w lidze *F180*  
(źródło: [www.robocup.org](http://www.robocup.org))

nadającego piłkę wsteczną rotację, przez co nie odbija się ona od robota, a także nie traci on nad nią kontroli w momencie hamowania lub obracania się.

W regulaminie rozgrywek dopuszczono do stosowania jedynie urządzenia do dryblowania działające na piłkę siłą prostopadłą do podłoża rys. 2.4a (we wcześniejszych latach w użyciu były urządzenia, w których obracany walec był umieszczony pionowo).

Ostatnim ważnym elementem, w który musi być wyposażony robot, jest znacznik (rys. 2.5). Znajduje się on w takim miejscu, aby kamera umieszczona centralnie nad boiskiem mogła go zarejestrować (przykrywa robota od góry). Znaczniki umożliwiają systemowi wizyjnemu określenie, do której drużyny należy dany robot, a także poprawne rozpoznanie jego pozycji, orientacji oraz prędkości na boisku.



Rysunek 2.5: Znacznik umożliwiający systemowi wizyjnemu identyfikację robotów  
(źródło: [www.robocup.org](http://www.robocup.org))



## Rozdział 3

# Player/Stage/Gazebo

Symulator *Player/Stage/Gazebo* został już opisany w pracy inżynierskiej [15]. Jednak z uwagi na jego ważną rolę i zmiany wprowadzone w symulowanym środowisku podczas rozwijania aplikacji, zdecydowano się na krótkie przypomnienie koncepcji projektu.

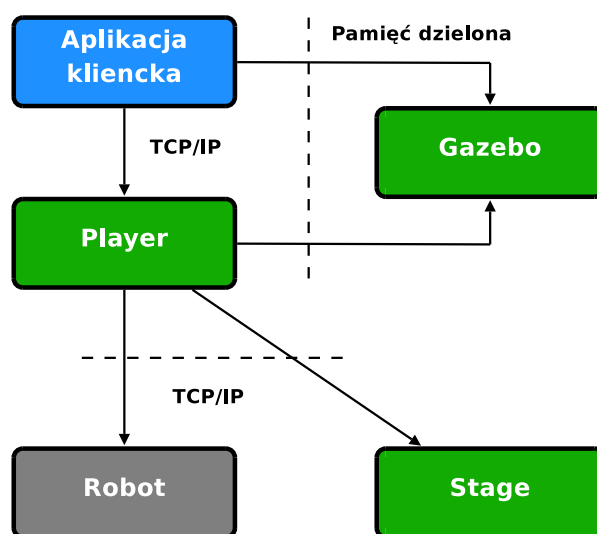
### 3.1 Koncepcja

Oprogramowanie składa się z trzech niezależnych aplikacji *Player*, *Stage* oraz *Gazebo*. *Gazebo* oraz *Stage* są środowiskami symulacyjnymi. Z tą różnicą, że *Stage* jest środowiskiem dwuwymiarowym, dedykowanym do symulowania dużych populacji robotów mobilnych. Natomiast *Gazebo* zapewnia pełną trójwymiarową symulację, uwzględniającą również oddziaływania fizyczne pomiędzy stosowanymi obiektami. W trakcie realizacji niniejszej pracy wydana została pierwsza stabilna wersja oprogramowania dostępna pod adresem <http://gazebo-sim.org>. Wcześniej wszelkie dane dotyczące wszystkich aplikacji wchodzących w skład projektu dostępne były na stronie <http://playerstage.sourceforge.net>. Z uwagi na trudności związane z adaptacją symulatora zdecydowano się na kontynuację prac na wersji pobranej ze starego repozytorium. Ostatnia aplikacja wchodząca w skład projektu, czyli *Player* jest serwerem sieciowym służącym do sterowania rzeczywistymi robotami. Dostarcza prosty interfejs, wspierający komunikację z wieloma typami powszechnie stosowanych czujników i aktuatorów. Oprogramowanie jest kompatybilne z systemami Linux, Solaris, \*BSD oraz Mac OSX. W niniejszej pracy zdecydowano się na wykorzystanie jedynie symulatora *Gazebo*.

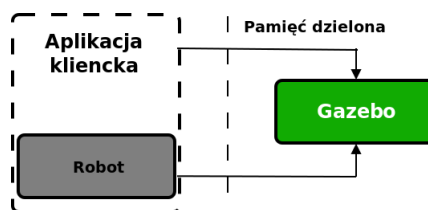
## 3.2 Architektura symulatora

Wymiana informacji pomiędzy elementami środowiska symulacyjnego *Player/Stage/Gazebo* została przedstawiona na rysunku 3.1. Po zapoznaniu się z nim można lepiej zrozumieć rolę programu *Player*. Pełni on funkcję pośrednika pomiędzy aplikacją klienta, stworzoną przez użytkownika, a rzeczywistym robotem lub symulatorami modelującymi jego zachowanie w tym przypadku *Stage* lub *Gazebo*. Komunikacja pomiędzy *Player-em*, robotem oraz aplikacją kliencką realizowana jest za pomocą protokołu TCP/IP. Dzięki takiej architekturze z punktu widzenia klienta nie istotne jest czy interfejsy udostępnione przez *Player-a* sterują rzeczywistym robotem czy symulowanym odpowiednikiem.

Z samym symulatorem, zarówno *Stage* jak i *Gazebo*, można komunikować się poprzez pamięć współdzieloną (rysunek 3.2), bez wykorzystywania aplikacji *Player*. Rozwiązanie to jest preferowane w sytuacji gdy korzystanie z *Playera* nie jest uzasadnione, lub kiedy użytkownik dokonał modyfikacji działania symulatora, których nie implementuje *Player*. Aplikacja *Gazebo* udostępnia w tym celu bibliotekę *libgazebo*, dostarczającą zestaw funkcji do komunikacji. Z tego właśnie rozwiązania zdecydowano się skorzystać w niniejszej pracy. Po pierwsze, dlatego iż zmniejsza to nakład niezbędnych prac, po drugie iż nie posiadano rzeczywistego modelu zawodnika. Wprowadzone poprawki podczas opracowania środowiska testowego oraz przygotowanie własnego sterownika robota także nasunęły to rozwiązanie.



Rysunek 3.1: Schemat komunikacji w środowisku *Player/Stage/Gazebo*



Rysunek 3.2: Zrealizowany schemat komunikacji w środowisku  
*Player/Stage/Gazebo*

Podsumowując, struktura pakietu oprogramowania *Player/Stage/Gazebo* umożliwia tworzenie aplikacji sterujących robotami w sposób, który zapewnia przenośność stworzonych programów i ich działanie zarówno na symulatorach robotów, jaki i na rzeczywistych obiektach.

### 3.2.1 Gazebo

Aplikacja *Gazebo* umożliwia symulację grup robotów mobilnych. Symulowane środowisko jest w pełni trójwymiarowe, uwzględniona jest dynamika brył oraz obliczane rzeczywiste oddziaływania między komponentami stworzonego świata. Okupione jest to oczywiście większym niż w przypadku *Stage* zużyciem mocy obliczeniowej, dlatego symulowane populacje robotów nie powinny być zbyt liczne.

Trzy najistotniejsze komponenty wykorzystywane przez program *Gazebo* to:

- ODE<sup>1</sup>, biblioteka odpowiadająca za symulację zależności fizycznych pomiędzy bryłami oraz detekcję kolizji,
- OGRE<sup>2</sup>, silnik graficzny umożliwiający tworzenie wspomaganej sprzętowo grafiki 3D,
- FLTK<sup>3</sup>, biblioteka dostarczająca przenośny interfejs użytkownika dla *Gazebo*.

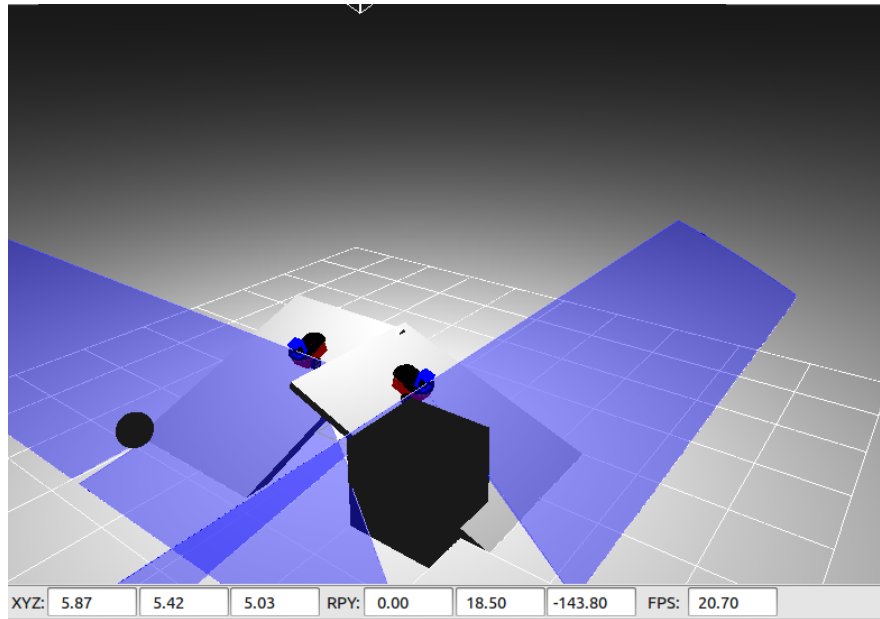
W *Gazebo* możliwe jest symulowanie standardowych sensorów stosowanych w robotyce (m.in. czujniki odległości, kamery, GPS). Symulator wyposażony jest w gotowe modele popularnych robotów (jak np. *Pioneer2DX*, *Pioneer 2AT* oraz *SeagwayRMP*). Dozwolone jest także tworzenie własnych modeli. Środowisko pozwala

---

<sup>1</sup>Open Dynamics Engine, <http://www.ode.org>

<sup>2</sup>Object-Oriented Graphics Rendering Engine, <http://www.ogre3d.org/>

<sup>3</sup>Fast Light Toolkit, <http://www.fltk.org/>

Rysunek 3.3: *Gazebo* – okno główne (wersja 0.10)

ponadto na tworzenie własnych modeli brył, z możliwością konfigurowania ich właściwości fizycznych (takich jak np. masa, współczynnik tarcia, sztywność). Dzięki temu symulator w dużym stopniu odzwierciedla rzeczywistość. Model można także wyposażyć w kontroler umożliwiających sterowanie (zadawanie prędkości, czy odczyt danych z sensorów). Środowisko dostarcza gotowych rozwiązań, ale można także opracować własne.

### 3.3 Modelowanie obiektów w Gazebo

Tworzenie symulowanego środowiska w *Gazebo* polega na opracowaniu opisu świata w pliku z rozszerzeniem *.world* za pomocą języka XML. W pliku powinny zostać zamieszczone parametry określające przebieg symulacji oraz informacje o występujących w danym świecie modelach.

#### 3.3.1 Zasady modelowania w Gazebo 0.10

Format pliku *.world* zawierającego opis symulowanego środowiska daje użytkownikowi możliwość konfiguracji wielu kluczowych elementów takich jak:

- konfigurację graficznego interfejsu użytkownika,

- zmianę sposobu renderowania sceny,
- wybór metody detekcji kolizji,
- zmianę wartości globalnych parametrów symulacji (m.in kroku pracy symulatora).

Elementy przykładowego pliku *.world* zostały zaprezentowane na listingach poniżej. Każdy opis świata powinien zaczynać się w sposób przedstawiony na 3.1.

Listing 3.1: Nagłówek pliku opisującego świat.

```
1 <?xml version="1.0"?>
2 <gazebo:world>
```

Bardzo istotnym elementem jest konfiguracja parametrów wykorzystywanych przez bibliotekę ODE, opisujących oddziaływania mechaniczne pomiędzy bryłami (por. listing 3.2). Schemat xml umożliwia konfigurację globalnych parametrów takich jak:

Listing 3.2: Parametry symulacji.

```
3 <physics:ode>
4 <stepTime>0.001</stepTime>
5 <gravity>0 0 -9.8</gravity>
6 <erp>0.8</erp>
7 <cfm>0.05</cfm>
8 <stepType>quick</stepType>
9 <stepIters>25</stepIters>
10 <stepW>1.4</stepW>
11 <contactSurfaceLayer>0.007</contactSurfaceLayer>
12 <contactMaxCorrectingVel>100</contactMaxCorrectingVel>
13 </physics:ode>
```

Znaczenie poszczególnych parametrów jest następujące:

1. **StepTime** jest wyrażony w sekundach i określa odstęp pomiędzy kolejnymi krokami symulatora.
2. **Gravity** jest wektorem określającym siłę grawitacji.
3. **Erp** (*error reduction parameter*), jest odpowiedzialny za wartość dodatkowej siły przykładanej do dwóch brył, pomiędzy którymi występuje złączenie (*joint*). Siła ta powoduje przemieszczenie brył do wymaganej przez typ złączenia poprawnej pozycji, w sytuacji kiedy na skutek błędów symulacji połączone bryły zmieniają położenie względem siebie (więcej informacji można znaleźć na

stronie 24). Parametr przyjmuje wartości z przedziału od 0 do 1. **Erp** ustawione na 0 powoduje, że żadna dodatkowa siła nie jest przykładana do brył, natomiast wartość 1 powoduje, że wszystkie błędne złączenia zostaną naprawione w kolejnym kroku symulatora.

4. **Cfm**(*constraint force mixing*) odpowiada za sztywność złączy (*joints*) pomiędzy bryłami. Gdy wartość jest równa 0 złączenie jest sztywne, czyli połączone bryły zachowują stałe położenie względem siebie. Przykładowo, w złączeniu typu gniazdo – kula, przy *cfm* równym zero kula nie może znaleźć się poza gniazdem. Ustawienie parametru na wartość dodatnią powoduje, że złączenie staje się “miękkie”, sprężyste. Oznacza to, że bryły mogą wnikać na pewną głębokość w siebie lub oddalać się. Odpowiednio dobierając *erp* i *cfm* można osiągnąć oscylacje.
5. **StepType** odpowiada za rodzaj używanej z biblioteki ODE funkcji do detekcji kolizji. Użytkownik może dokonać wyboru jednej z dwóch wartości:
  - *world*, używana jest wtedy funkcja **dWorldStep** operująca na macierzy zawierającej wszystkie ograniczenia (więzy) konfiguracyjne, wynikające z modelowanego świata; jej rozmiar zależy od ilości zastosowanych brył i złączy pomiędzy nimi; złożoność obliczeniowa tej metody wynosi  $m^3$ , natomiast pamięciowa jest rzędu  $m^2$ , gdzie  $m$  określa ilość wierszy (ograniczeń) analizowanej macierzy,
  - *quick*, wtedy do detekcji kolizji stosowana jest metoda iteracyjna, w literaturze nazywana *SOR* - *Successive over-relaxation* należąca do rodziny metod Gaussa–Seidela; jej złożoność obliczeniowa jest rzędu  $m * N$ , a pamięciowa  $m$ , gdzie  $m$  ma znaczenie jak wyżej, natomiast  $N$  jest liczbą iteracji; dla dużych systemów metoda jest dużo bardziej wydajna jednak mniej dokładna, mogą także występować problemy z jej stabilnością; najprostszą metodą na poprawę stabilności jest zwiększanie **cfm**.
6. **StepIters** określa ilość kroków, gdy do detekcji kolizji wybrano metodę iteracyjną.
7. **StepW** określa czas relaksacji metody Gaussa–Seidela.

8. `ContactSurfaceLayer` określa głębokość na jaką bryła może wnikać w podłoże, ustawienie parametru na małą wartość dodatnią zapobiega występowaniu sytuacji, gdy ograniczenia są nieustannie tworzone i zrywane (na przykład podczas ruchu koła po podłożu).
9. `ContactMaxCorrectingVel` jest maksymalną korektą prędkości jaka może wynikać z utworzonych tymczasowo kontaktów. Domyślnie parametr przyjmuje nieskończoną wartość, a jego zmniejszanie wartości może zapobiec tworzeniu się zagnieżdżonych kontaktów.

Domyślnie podczas symulacji modeli i złączeń wykorzystywane są globalne wartości parametrów. Istnieje także możliwość określania wartości `cfm` i `erp` dla poszczególnych obiektów.

W pliku opisującym modelowany świat możliwe jest także konfigurowanie parametrów graficznego interfejsu użytkownika. Póki co wspierany jest tylko typ *fttk*. Konfigurować można także rozmiar okna i jego pozycję początkową (por. listing 3.3).

Listing 3.3: Konfiguracja interfejsu użytkownika.

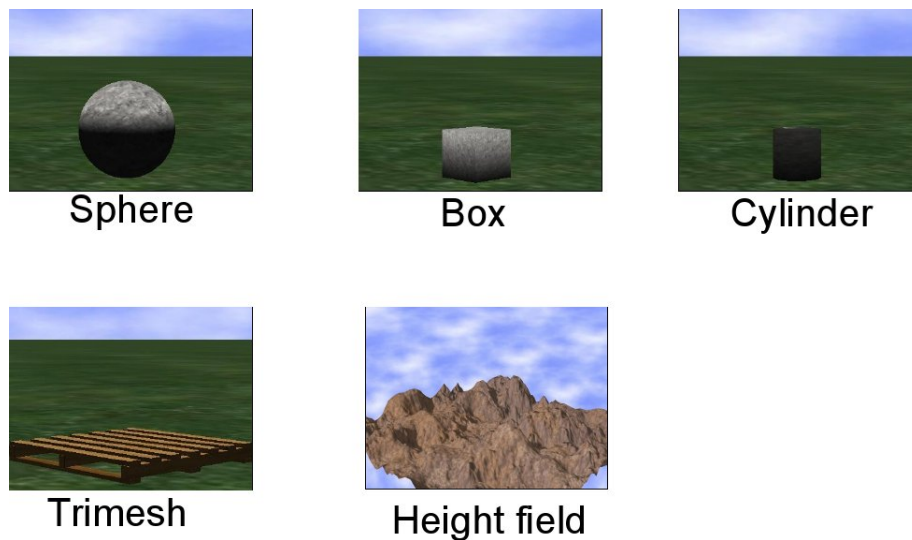
```
14 <rendering:gui>
15   <type>fttk</type>
16   <size>640 480</size>
17   <pos>0 0</pos>
18 </rendering:gui>
```

Interfejs umożliwia także określenie parametrów renderowanej sceny: techniki cieniowania, rodzaju tekstury pokrywającej niebo (dostępne inne opcje, jak np. rodzaje oświetlenia, dodawanie mgły itp.):

Listing 3.4: Zmiana parametrów renderowania sceny.

```
19 <rendering:ogre>
20   <shadowTechnique>stencilAdditive</shadowTechnique>
21   <sky>
22     <material>Gazebo/CloudySky</material>
23   </sky>
24 </rendering:ogre>
25 </gazebo:world>
```

Do tak stworzonego pliku z opisem świata należy następnie dodać modele. Dodany obiekt musi zawierać co najmniej jeden element *body*, który jest złożony z elementów *geoms*. Sekcja opisująca przykładowy model piłki mogłaby wyglądać następująco:



Rysunek 3.4: Dostępne typy *geoms* – Gazebo 0.10 (źródło: [21])

```
1 <model:physical name="ball">
2   <static>false</static>
```

Na wstępie deklarowany jest model, którego parametr *static* ustawiono na *false*, co oznacza, że będzie on brał udział w symulacji fizycznej i może oddziaływać z innymi obiektami. Następnie należy zadeklarować “ciało” tworzonego obiektu:

```
3   <body:sphere name = "ball_body">
```

Wewnątrz *body*, które jest odpowiedzialne za dynamikę obiektu, należy umieścić elementy opisujące kształt obiektu (pozwalające tym samym na detekcję kolizji) – w tym przypadku zdefiniowano kulę o wymiarach i masie odpowiadającej piłce do golfa:

```
4       <geom:sphere name = "ball_geom">
5           <xyz>0 0 0.01</xyz>
6           <rpy>0 0 0 </rpy>
7           <size>0.02</size>
8           <mass>0.045</mass>
```

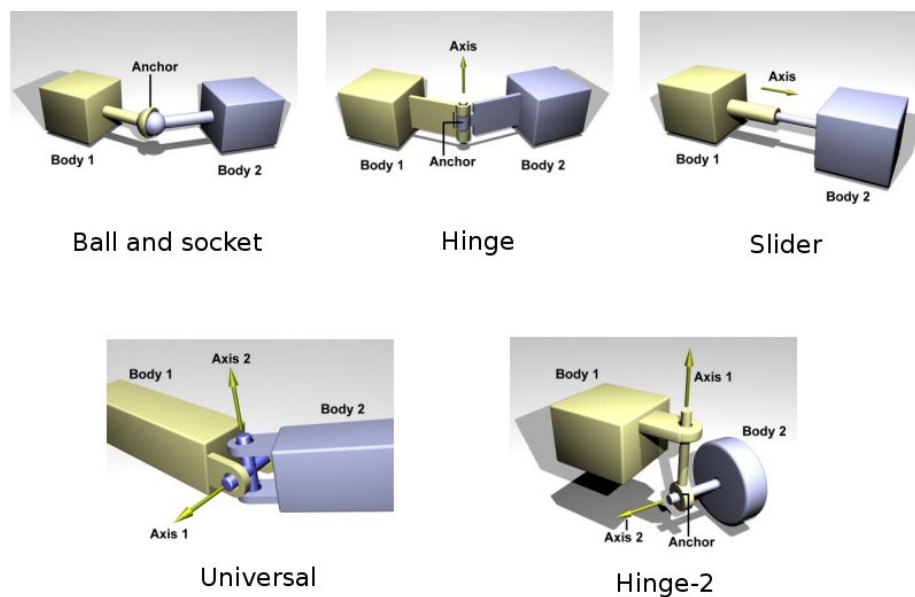


Sekcja *visual* bloku *geom* pozwala na przypisanie obiektowi wyglądu – może to być figura o dowolnym kształcie (stworzona np. w programie do grafiki 3D) i wybranej przez projektanta teksturze lub kolorze:

```
9           <visual>
10               <scale>0.02 0.02 0.02</scale>
11               <size>0.02</size>
12               <mesh>unit_sphere</mesh>
13               <material>Gazebo/Orange</material>
14           </visual>
15       </geom:sphere>
16   </body:sphere>
17 </model:physical>
```

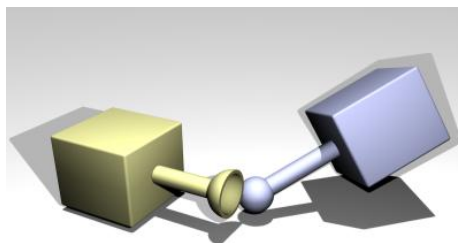
### Połączenia pomiędzy bryłami

Tworząc modele można korzystać z trzech podstawowych brył (kula, walec, prostopadłościan), a także z siatek *trimesh* oraz elementów *height field* (stworzonych do generowania terenu – por. rys. 3.4)). Z kilku brył można tworzyć złożone komponenty (*body*) modelujące np. koła i podwozie robota. Natomiast komponenty typu *body* można łączyć ze sobą za pomocą wiązań (*joints*). Stopnie swobody połączenia zależą od wybranego typu wiązania (dostępne typy przedstawiono na rys. 3.5). Obiekty połączone wiązaniem tworzą parę kinematyczną. *Gazebo* umożliwia nadawanie tak połączonym bryłom prędkości obrotowych względem siebie, co pozwala na modelowanie ruchomych elementów robotów.



Rysunek 3.5: Typy połączeń *joints* (Źródło: dokumentacja ODE)

Jak wspomniano wcześniej, w czasie realizowanej symulacji połączenia pomiędzy bryłami mogą ulec wypaczeniu na skutek sił działających na model lub na skutek błędów symulacji. Może to być tarcie, siła powodująca obrót bryły czy siły działające na model podczas kolizji. Sytuację taką przedstawiono na rysunku 3.6.



Rysunek 3.6: Zepsute połączenie (*joints*) (Źródło: dokumentacja ODE)

Błędy tego typu można redukować za pomocą parametru **erp** ustawianego globalnie lub indywidualnie dla każdego z połączeń.

## Sterowniki modeli

Sterowanie zaprojektowanym modelem jest możliwe po uprzednim wyposażeniu go w sterownik (*controller*). Sterowniki implementowane są przez użytkownika w C++

jako klasa dziedzicząca po zdefiniowanym w *libgazebo* interfejsie. Klasa odpowiada za przetwarzanie danych z sensorów robota oraz pozwala na nadawanie prędkości bryłom połączonym wiązaniami. Sterownik komunikuje się z programem za pośrednictwem interfejsów (bezpośrednio korzystając z *libgazebo* lub poprzez *Playera*). *Gazebo* oczywiście dostarcza gotowe sterowniki pozwalające na kontrolowanie np. robota z napędem różnicowym. W wersji 0.10 dodano także sterownik robota z holonomiczną bazą jezdnią wykorzystywany do sterowania modelem z pliku *wizbot.world*. Aby z nich skorzystać, wystarczy przypisać wybrany sterownik do modelu robota. Określić, które ze złączeń odpowiadają jego kołom i podać nazwę instancji interfejsu, za pomocą którego odbywać ma się komunikacja pomiędzy klientem a sterownikiem. W przypadku sterowania przemieszczeniem będzie to interfejs *position*, za pomocą którego możemy zadawać prędkości bryłom. *Gazebo* posiada też zaimplementowane interfejsy do sterowania innymi elementami np. do komunikacji z laserowymi czujnikami odległości, kamerą bądź chwytakiem manipulatora.

Listing 3.5: Przykład przypisanie sterownika do modelu

```

1 <model:physical name="pioneer_model">
2   <controller:pioneer2dx_position2d name="controller">
3     <leftJoint>left_hinge_joint</leftJoint>
4     <rightJoint>right_hinge_joint</rightJoint>
5     <interface:position name="position_iface"/>
6   </controller>
7 </model:physical>

```

### 3.3.2 Realizacja środowiska Ligi RoboCup

W celu realizacji niniejszej pracy dla symulatora *Gazebo* stworzono modele odpowiadające robotom biorącym udział w *Small-size League*. Boisko zostało stworzone z wykorzystaniem rzeczywistych wymiarów 5.4[m] × 7.4[m] obowiązujących w lidze w 2011 roku <sup>4</sup>. Wszystkie linie boiska są także zgodne z obowiązującymi w tych mistrzostwach. Margines na auty jest równy 675[mm]. Model piłki odpowiada piłce do golfa, która używana jest w oficjalnych rozgrywkach.

Wykonano modele zawodników wzorowane na konstrukcji rzeczywistych robotów wykorzystywanych w *Small-size League*. Otrzymane modele zaprezentowane są na rysunku 3.7. Główną częścią robota jest walec o promieniu 6[cm] i wysokości 4[cm], umieszczony na trzech kołach rozmieszczonych symetrycznie na jego podstawie. Koła symulują zachowanie stosowanych w robotyce kół szwedzkich. Zachowanie takie osiągnięto poprzez dodanie nowego parametru do sekcji opisującej bryłę w symulatorze, który określa kierunek siły tarcia dla danej bryły:

Listing 3.6: Parametr określający kierunek siły tarcia

```

1 <fDir1>1 0 0</fDir1>

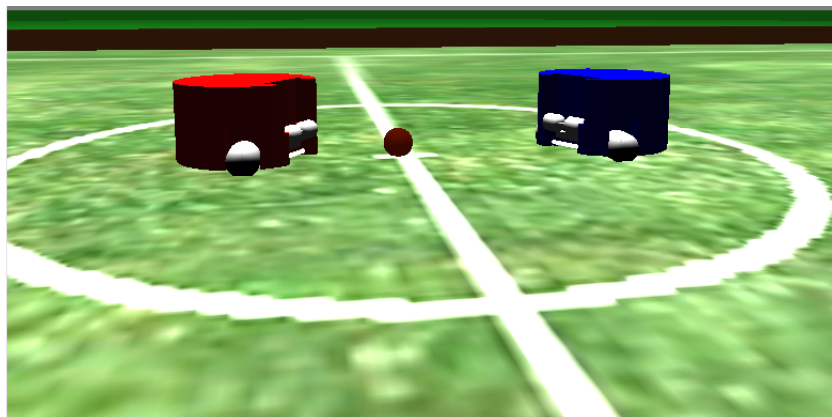
```

Powyższa wartość oznacza, że tarcie występuje jedynie w kierunku osi *OX* danej bryły. Należało także wprowadzić poprawkę w silniku fizycznym symulatora, tak aby ODE uwzględniało ten parametr. W sytuacji kiedy dla bryły określony jest kierunek tarcia, w strukturze opisującej punkt kontaktowy pomiędzy bryłami ustawiono także flagę *dContactMu2*<sup>5</sup>. Rozwiązanie takie umożliwiło ustawienie dużego tarcia koła w

<sup>4</sup>[http://small-size.informatik.uni-bremen.de/\\_media/rules:ssl-rules-2011.pdf](http://small-size.informatik.uni-bremen.de/_media/rules:ssl-rules-2011.pdf)

<sup>5</sup><http://www.ode.org/ode-latest-userguide.html>

kierunku ruchu obrotowego oraz małego w kierunku prostopadłym, czyli osiągnięto zachowanie typowe dla kół szwedzkich.



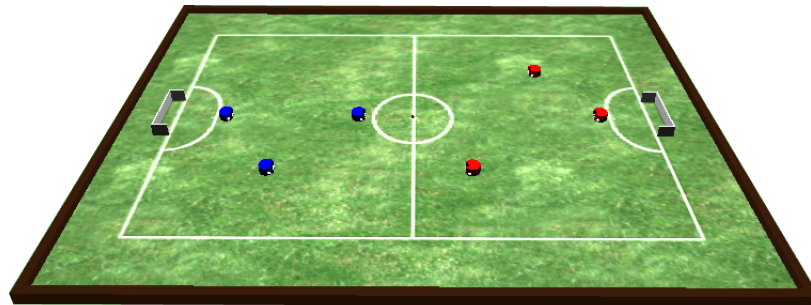
Rysunek 3.7: Opracowane modele robotów

Robot został dodatkowo wyposażony w *dribbler*<sup>6</sup> pomagający utrzymać kontrolę nad piłką. Mimo że *Gazebo* udostępnia sterownik dla napędu holonomicznego, sterowanie robotem wymagało napisania nowego kontrolera. Ponieważ nie uwzględniał on obsługi *dribblera* ani nie umożliwiał oddawania strzałów. Sterownik został zrealizowany zgodnie z zasadami opisanymi w rozdziale 4. Z punktu widzenia użytkownika sterowanie robotem odbywa się poprzez ustawianie odpowiedniej prędkości liniowej i kątowej. Sterownik przekształca je na odpowiednie prędkości obrotowe poszczególnych kół. Dodatkowo zaimplementowano programowy regulator PID, sterujący siłą przykładaną do kół robota. Dzięki temu uzyskano lepszą dokładność sterowania robotem. Parametry regulatora początkowo dobrano posługując się metodą Zieglera-Nicholsa. Przy wyłączonych członach całkującym i różniczkującym analizowano wykresy rozkładu prędkości obrotowych kół robota w czasie przy ustalonej zadanej prędkości liniowej. Stopniowo zwiększano współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego. Wyznaczono wartość wzmocnienia, przy której układ zbliżył się do granicy stabilności (wzmocnienie krytyczne  $K_k$ ) oraz wyznaczono okres drgań  $T_k$ . Wartości właściwych wzmocnień poszczególnych członów wyznaczono zgodnie z procedurą:  $K = 0.6K_k$ ,  $T_i = T_k$ ,  $T_d = 0.12T_k$ . Następnie eksperymentalnie dokonano ich korekty. W pliku opisującym model robota istnieje możliwość ręcznego modyfikowania nastaw regulatora. Kod źródłowy sterownika został zamieszczony na płycie

---

<sup>6</sup>urządzenie opisano w par. 2.3

CD razem z kodem źródłowym wykorzystywanej wersji symulatora.



Rysunek 3.8: Model boiska

W trakcie symulacji opracowanych modeli zauważono, że piłka raz wprowadzona w ruch nie hamuje. Sytuacja taka była spowodowana brakiem tarcia tocznego. Zaimplementowano zatem kolejną modyfikację w symulatorze, tak aby dla każdej bryły istniała możliwość konfigurowania tego parametru (*angularDamping*) w pliku opisującym model.

Ponieważ korzystano z niestabilnej wersji oprogramowania (inne nie było jeszcze dostępne), pobranego bezpośrednio z repozytorium deweloperów, należało poprawić jeszcze kilka innych błędów symulatora, między innymi niepoprawną pracę interfejsu *SimulationIface* umożliwiającego komunikację pomiędzy symulatorem a aplikacją kliencką.

## Rozdział 4

# Sterowanie modelem robota z *Small-size League*

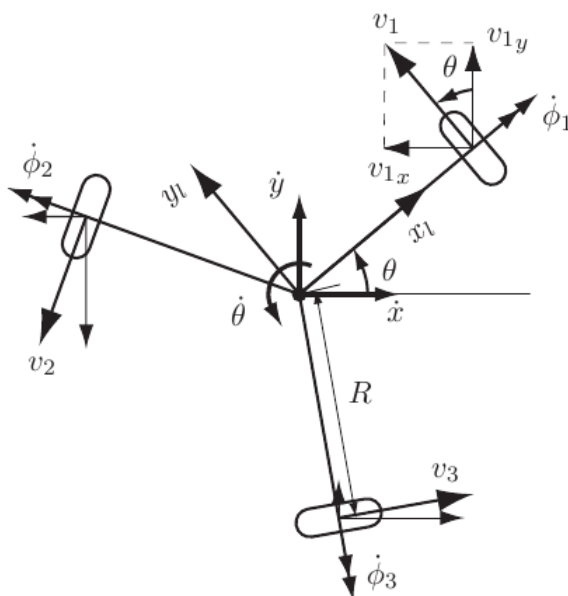
Budowę i napęd robota należy dobrać odpowiednio do postawionego zadania. W przypadku ligi *Small-size League*, najważniejszym elementem jest prostota i mobilność takiej jednostki. W pracy inżynierskiej [15] posługiwano się modelem o napędzie różnicowym (dwa niezależnie napędzane koła). Decyzję o odwzorowaniu takiego robota w symulatorze motywowano wtedy próbą odzwierciedlenia rzeczywistego robota HMT [22] stworzonego w ramach koła robotyki Bionik działającego na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. W niniejszej pracy zrezygnowano jednak z tego modelu, ponieważ nie był wystarczająco funkcjonalny. Zdecydowano się natomiast na zbudowanie modelu wzorowanego na rzeczywistym zawodniku *Small-size League*.

### 4.1 Omówienie omnikierunkowej bazy jezdnej

Analogicznie jak podczas rzeczywistej rozgrywki, decydującym elementem jest budowa anatomiczna i zdolności motoryczne zawodników. Tak samo podczas rozgrywek robotów istotną rolę odgrywa baza jezdna zawodników. W zawodach wykorzystywana jest baza omnikierunkowa, ponieważ jest ona najłatwiejsza w użyciu. Korzystając z takiej bazy w większości algorytmów robot może być traktowany jako punkt materialny.

### 4.1.1 Opis położenia kół

Baza omnikierunkowa składa się z umieszczonych symetrycznie co najmniej trzech kół szwedzkich (tak jak zaprezentowano to na rysunku 4.1). Każde z kół posiada osobny napęd. Budowę koła omnikierunkowego przedstawiono na ilustracji ??.



Rysunek 4.1: Rozkład kół w omnikierunkowej bazie jezdnej źródło [13]

szwedzkie posiada na swoim obwodzie zamontowane w odpowiedni sposób dodatkowe rolki. Umożliwiają one ruch koła w dowolnym kierunku, bez względu na to, jak koło jest zorientowane w przestrzeni. Dzięki temu taką bazę jezdnią można zaliczyć klasy holonomicznych.



Rysunek 4.2: Konstrukcja przykładowego koła szwedzkiego, źródło [12]



### 4.1.2 Opis kinematyki oraz dynamiki bazy jezdnej

Podczas sterowania robotem istotnym problemem jest sposób w jaki prędkości i przyspieszenia obrotowe poszczególnych kół przekładają się na prędkość/przyspieszenie kątowe i liniowe całego robota. Wszystkie poniższe obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że koła nie ulegają poślizgowi. Przy tym uproszczeniu cały moment obrotowy silników przekłada się na prędkość robota. Przyspieszenie liniowe i prędkość obrotowa środka masy takiego układu dane jest następującymi wzorami:

$$a = \frac{1}{M}(F_1 + F_2 + F_3) \quad (4.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{R}{I}(f_1 + f_2 + f_3) \quad (4.2)$$

gdzie  $f_i$  oznacza długość wektora siły przyłożonego do poszczególnego koła, a  $I$  jest momentem bezwładności. Przyspieszenie wzdłuż poszczególnych osi można obliczyć rozbijając siłę działającą na koło wzdłuż tychże osi, otrzymamy wtedy:

$$Ma_x = -f_1 \sin \theta_1 - f_2 \sin \theta_2 - f_3 \sin \theta_3 \quad (4.3)$$

$$Ma_y = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 + f_3 \cos \theta_3 \quad (4.4)$$

Dla jednolitego cylindra moment bezwładności obliczany jest ze wzoru  $I = \frac{1}{2}MR^2$ , natomiast dla obręczy  $I = MR^2$ , gdzie  $R$  jest odpowiednio promieniem cylindra/obréczy natomiast  $M$  masą. Dla obiektów o rozkładzie masy pomiędzy obręczą, a cylindrem wprowadzany jest dodatkowy parametr  $\alpha$ . Wzór przyjmuje wtedy postać:  $I = \alpha MR^2$ , gdzie  $0 < \alpha < 1$ . Używając zapisu macierzowego, równania można przedstawić w postaci:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cos \theta_3 \\ \frac{MR}{I} & \frac{MR}{I} & \frac{MR}{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

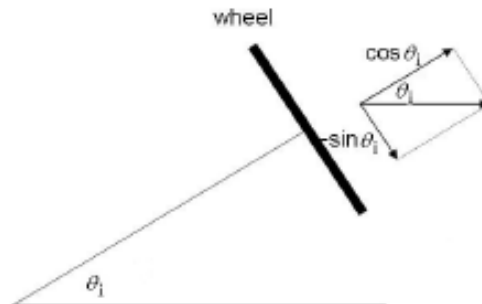
Podstawiając do powyższego wzoru  $I = \alpha MR^2$  oraz zastępując  $\dot{\omega}$  wyrażeniem  $R\dot{\omega}$  otrzymujemy:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ R\dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cos \theta_3 \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Macierz z powyższego równania o wymiarze  $3 \times 3$  zostanie oznaczona symbolem  $C_\alpha$ .

Jednak najbardziej interesujący jest sposób w jaki prędkość obrotowa kół przekłada się na prędkość liniową robota. Załóżmy, że robot porusza się wzdłuż osi OX, zatem wektor prędkości  $(v_x, v_y, R\omega)$  wygląda następująco  $(1, 0, 0)$ . Rozważmy jedno z kół, tak jak to przedstawiono na rysunku 4.3. Dokonując rozkładu wektora prędkości na dwie składowe, jedną zgodną z ruchem obrotowym dużego koła, a drugą zgodną z ruchem małych, poprzecznych kółek, otrzymujemy odpowiednio prędkości  $v_y = -\sin\theta$   $v_y = \cos\theta$ . Przy wyznaczaniu prędkości koła przyjęto założenie, że prędkość dodatnia powoduje obrót w kierunku wyznaczonym przez kciuk prawej dłoni, gdy pokrywa się ona z osią silnika. Otrzymujemy zatem następujące powiązanie pomiędzy prędkościami robota a prędkościami poszczególnych silników:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 1 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 1 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ R\omega \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

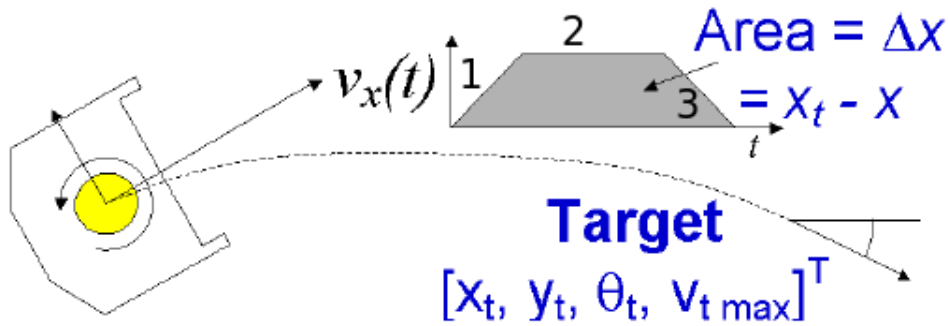


Rysunek 4.3: Prędkość liniowa dużego koła szwedzkiego i małych kółek, gdy robot porusza się wzdłuż osi OX, źródło[12]

## 4.2 Obliczanie profilu prędkości liniowej robota

Znając już powiązanie pomiędzy prędkością obrotową kół a prędkością liniową i obrotową robota, ostatnim elementem jest wyznaczenie prędkości prowadzących robota do zadanego punktu. Należy przy tym uwzględnić takie parametry robota jak

przyspieszenie i opóźnienie. W tym celu skorzystano z metody opisanej w [16] oraz [17]. Polega ona na dekompozycji dwuwymiarowego problemu sterowania robotem do dwóch problemów jednowymiarowych, tak jak to zaprezentowano na rysunku 4.4. Ruch robota w kierunku osi OX i w kierunku osi OY jest rozpatrywany osobno.



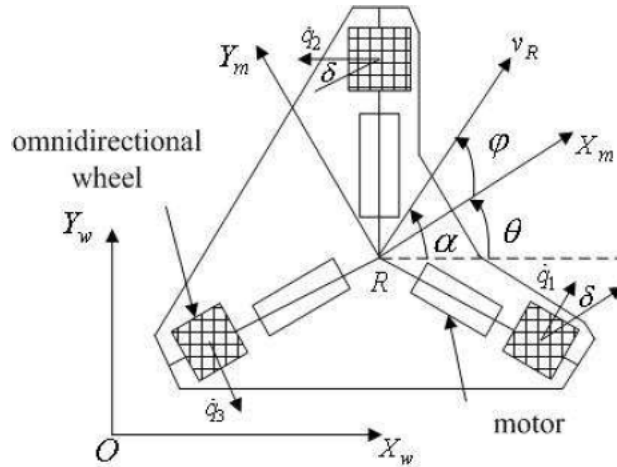
Rysunek 4.4: Dekompozycja sterowania robotem w 2D na dwa niezależne zadania w 1D, źródło[16]

Podejście to jest znane w robotyce pod nazwą trapezoidalnego profilu prędkości. Zakłada ono, że robot powinien starać się osiągnąć swoją maksymalną prędkość poruszając się ze stałym przyspieszeniem (sytuacja zaznaczona numerem 1 na rysunku). Następnie powinien poruszać się ze stałą prędkością, aż do momentu kiedy tuż przed punktem docelowym zaczyna hamować (sytuacje 2 i 3 na rysunku). W szczególnym przypadku profil prędkości może przybrać formę trójkąta. Prędkość obliczana jest według następujących reguł:

1. Jeśli bieżąca prędkość spowoduje oddalenie się robota od celu to wyhamuj do 0.
2. Jeśli robot poruszając się z bieżącą prędkością przejedzie cel to także należy zatrzymać go.
3. Gdy bieżąca prędkość przekracza maksymalną, wyhamuj do prędkości maksymalnej.
4. Oblicz trójkątny profil prędkości prowadzącej do celu.
5. Jeśli w obliczonym rozkładzie prędkość przekracza w jakimkolwiek momencie maksimum to należy obliczyć trapezoidalny profil.

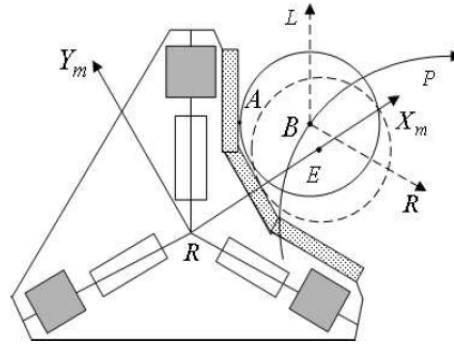
### 4.3 Dryblowanie z piłką

We wcześniejszym podrozdziale rozwiązano problem sterowania omnikierunkową bazą jezdnią. Osobnym zadaniem jest wyznaczanie prędkości robota w sytuacji kiedy posiada on piłkę. Robot dryblujący z piłką nie może poruszać się w pełni dowolny sposób, aby nie stracić nad nią kontroli. Problem ten został dokładnie zaprezentowany w [14]. W publikacji co prawda skupiono się na modelu robota z rozgrywek *Middle-size League*, jednak zaprezentowany algorytm znajduje zastosowanie także w lidze małych robotów. Na rysunku 4.5 przedstawiono bazę jezdnią z zaznaczonym globalnym układem współrzędnych  $[X_w; Y_w]$  oraz związanym ze sterowanym robotem  $[X_m; Y_m]$ . Za pomocą wektora  $v_r$  zaznaczono prędkość liniową z jaką porusza się robot. Natomiast na rysunku 4.6 przedstawiona została sytuacja gdy robot jest w po-



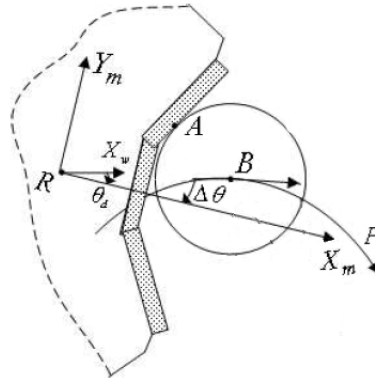
Rysunek 4.5: Omnikierunkowa baza jezdna stosowana w rozgrywkach średnich robotów, źródło [14]

siadaniu piłki. Krzywa  $P$  oznacza trajektorię, po której porusza się zawodnik. Aby nie stracić piłki, punkt  $E$  znajdujący się dokładnie na wprost robota w odległości  $L$  równej promieniowi piłki, powinien pokrywać się z jej środkiem. Zadaniem algorytmu sterującego dryblującym robotem, jest zatem wyznaczenie prędkości obrotowej, takiej aby środek piłki znajdował się w otoczeniu punktu  $E$ . W przypadku robotów z ligi *Small-size League*  $L = r_{ball} + r_{robot} + w_{dribbler}$ . Na rysunku 4.7 przedstawiono robota wykonującego obrót z piłką. W momencie kiedy robot wraz z piłką poruszają się po łuku  $c$ , piłka posiada pewne przyspieszenie dośrodkowe,  $a_b = cv_e$  powodujące jej odchylenie od punktu  $E$ . Na rysunku symbolem  $\Delta\Theta$  zaznaczono odchylenie ką-



Rysunek 4.6: Pozycja piłki w układzie współrzędnych związanym z robotem, źródło [14]

towe wynikające właśnie z działania siły dośrodkowej, które należy minimalizować, aby robot nie stracił kontroli nad piłką. Odchylenie to można zamodelować jako:  $\Delta\Theta = k_{\Theta}cv_d^2$ , gdzie  $k_{\Theta}$  jest dobranym empirycznie parametrem. W przypadku ide-



Rysunek 4.7: Odchylenie piłki od idealnego położenia podczas manewrowania, źródło [14]

alnym rotacja robota wykonującego manewr powinna być równa:  $\Theta_d = \Theta_P + \Delta\Theta$ , gdzie  $\Theta_P$  jest nachyleniem stycznej do trajektorii, po której porusza się robot w punkcie będącym rzutem prostokątnym  $E$  na ścieżkę. Do regulacji rotacji robota posiadającego piłkę w publikacji [14] wykorzystano regulator PD. Prędkość obrotowa obliczana jest zatem następująco:  $\omega = k_p(\Theta_d - \Theta) + k_d(\dot{\Theta}_d - \dot{\Theta})$ . Parametry  $k_p$  oraz  $k_d$  są dobierane empirycznie.

## Rozdział 5

# Algorytmy unikania kolizji

W rozdziale zostanie szerzej zaprezentowany jeden z algorytmów unikania kolizji jakim jest RRT(Rapidly-Exploring Random Tree). Poruszona zostanie także kwestia powodów, dla których wybrano tę, a nie inną metodę. Uzasadnione zostanie odejście od algorytmu opracowanego w ramach pracy inżynierskiej (CVM *Curvature Velocity Method*). Ponadto opisane zostaną inne metody planowania ścieżki oraz omówione zostaną ich właściwości. Na tej podstawie zostanie uzasadniony wybór algorytmu RRT.

### 5.1 Krótki przegląd algorytmów unikania kolizji

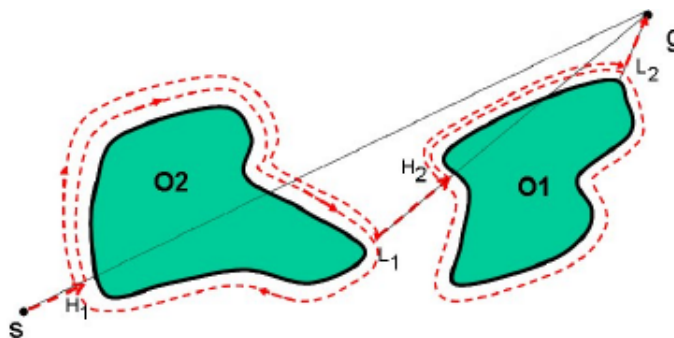
Jednym z podstawowych problemów podczas poruszania się każdej jednostki mobilnej jest wyznaczenie bezkolizyjnej ścieżki prowadzącej do celu. Współczesna robotyka zna wiele algorytmów rozwiązujących z mniejszym bądź większym sukcesem to zadanie. Użycie wielu z nich jest jednak w pełni uzasadnione tylko w szczególnych okolicznościach. Poniżej zostaną zaprezentowane najbardziej znane algorytmy unikania kolizji (omówione także w pracy inżynierskiej [15]).

#### 5.1.1 Algorytm Bug

Najprostszym algorytmem unikania kolizji jest algorytm *Bug* naśladujący zachowanie pluskwy. Gdy robot, podążając do punktu docelowego, napotyka przeszkodę, okrąży ją całkowicie i zapamiętuje położenie, w którym znajdował się najbliższej celu. Następnie ponownie podczas powtórnego okrążania przeszkody robot dąży do

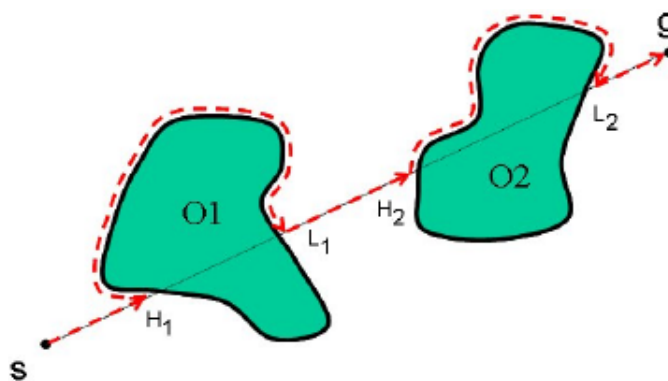
uprzednio zapamiętanego punktu po czym odrywa się od przeszkody i zaczyna podążać w stronę celu. Ścieżka wyznaczona za pomocą algorytmu została zaprezentowana na rysunku 5.1. Robot wykorzystujący ten algorytm powinien być wyposażony w dwa rodzaje czujników:

- czujnik celu – wskazujący kierunek do celu oraz umożliwiający pomiar odległości do celu,
- czujnik lokalnej widoczności – umożliwiający podążanie wzdłuż konturu przeszkody.



Rysunek 5.1: Bezkolizyjna ścieżka wyznaczona przez algorytm Bug

Ścieżka wyznaczona przez ten algorytm jest daleka od optymalnej. Robot niezależnie od wybranego kierunku omijania przeszkody musi ją okrążyć całkowicie. W pewnych sytuacjach całkowite okrążenie przeszkody jest niemożliwe. Na przykład jeśli robot natrąfi na ścianę. W takim przypadku algorytm zawodzi całkowicie. Efektywność algorytmu można poprawić sprawdzając podczas okrążania przeszkody czy punkt w którym aktualnie znajduje się robot jest poszukiwanym punktem położonym najbliżej celu. Przykładowa ścieżka wyznaczona za pomocą zmodyfikowanej wersji algorytmu jest widoczna na rysunku 5.2. Robot otacza przeszkodę w wybranym wcześniej kierunku i odłącza się od niej w momencie przecięcia prostej łączącej punkt startowy z punktem docelowym. Uzyskana w ten sposób ścieżka nadal zależy od wybranego a priori kierunku jazdy. Obie zaprezentowane wersje algorytmu Bug nie uwzględniają ograniczeń wynikających z kinematyki robota, a w szczególności faktu, że rozpatrywany robot może być nieholonomiczny.

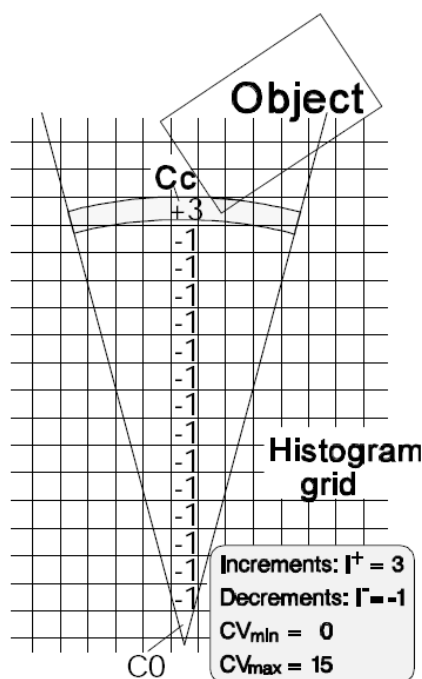


Rysunek 5.2: Zasada działania algorytmu Bug w wersji rozszerzonej

### 5.1.2 Algorytm VHF

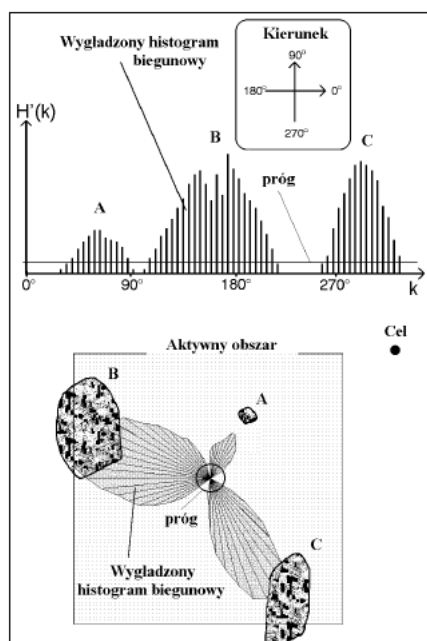
Pełna anglojęzyczna nazwa metody brzmi *Vector Field Histogram*. Na język polski można ją przetłumaczyć jako algorytm histogramu pola wektorowego. Należy ona do grupy metod, które w czasie rzeczywistym pozwalają na jednoczesne wykrywanie i omijanie przeszkód oraz kierowanie robota na cel. Algorytm ten został szczegółowo opisany w pracy inżynierskiej [15], więcej informacji można też znaleźć w publikacjach autorów ([8] oraz [9]). W skrócie, jego zasada działania opiera się na konstrukcji dwuwymiarowego opisu świata w postaci siatki. Każdemu elementowi siatki przypisany jest poziom ufności oddający prawdopodobieństwo z jakim w danym położeniu może pojawić się przeszkoda (rysunek 5.3).





Rysunek 5.3: Zasada tworzenia dwuwymiarowego histogramu  
(na podstawie [9])

Tak skonstruowana mapa redukowana jest do jednowymiarowego histogramu biegunowego (rysunek 5.4), który dodatkowo wygładzany jest przez filtr dolnoprzepustowy. W ten sposób otrzymuje się informację o poziomie ufności wystąpienia przeszkody poruszając się w danym kierunku (świadomie rezygnuje się z informacji o odległości od przeszkody). Na podstawie tego histogramu wyznaczane są sterowania dla robota. Histogram jest analizowany w poszukiwaniu minimów lokalnych, wszystkie doliny, których poziom ufności znajduje się poniżej ustalonego umownie progu są rozważane przy wyznaczaniu kierunku jazdy robota. Jeśli minimów jest kilka wybierane jest to, którego kierunek prowadzi najbliższej do celu. Algorytm do poprawnego działania potrzebuje informacji o rozłożeniu przeszkód w otoczeniu robota. W oryginalnej implementacji była ona pozyskiwana z sensorów ultradźwiękowych. Można je również zastąpić z powodzeniem czujnikami laserowymi. Obraz video z kamery umieszczonej nad eksplorowanym światem także dostarcza tej informacji (jak w rozgrywkach *Small-size League*).



Rysunek 5.4: Histogram biegunowy dla przykładowego rozmieszczenia przeszkód  
(na podstawie [20])

### 5.1.3 Technika dynamicznego okna

Popularną, stosowaną w robotyce metodą unikania kolizji jest także technika dynamicznego okna. Algorytm ten analizuje jedynie możliwe do osiągnięcia w danej sytuacji prędkości. Więcej informacji na temat algorytmu można znaleźć w publikacji [10]. Ujmując w jednym zdaniu algorytm polega na przeszukiwaniu zbioru dopuszczalnych prędkości liniowych i kątowych, tak aby maksymalizować funkcję celu. Sposób konstrukcji funkcji celu gwarantuje, że wybrane prędkości będą prowadzić robota w zamierzonym kierunku oraz, że nie natrafi na przeszkodę.

### 5.1.4 Algorytmy pól potencjałowych

#### Algorytm w wersji podstawowej

Kolejne podejście do problemu nawigacji robota mobilnego zaczerpnięto z fizyki. Problem znalezienia bezkolizyjnej ścieżki został sprowadzony do problemu konstrukcji funkcji opisującej rozkład energii w danym środowisku. W takim układzie dotarcie do celu jest równoważne ze znalezieniem minimum funkcji opisującej rozkład sztucz-

nego pola potencjałowego. Robot podąża w kierunku ujemnego gradientu tej funkcji, mamy zatem  $c(t) = -\nabla U(c(t))$ . W klasycznym podejściu sztuczne pole potencjałowe tworzy się w ten sposób, że przeszkody są źródłem ujemnego pola (odpychającego), natomiast cel emituje pole dodatnie. Ujęte jest to w następujących wzorach:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (5.1)$$

$$U_{att}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\xi d^2 & \text{dla } d \leq d_{goal}^* \\ \xi d_{goal}^* d - \frac{1}{2}(d_{goal}^*)^2 & \text{dla } d \geq d_{goal}^* \end{cases} \quad (5.2)$$

gdzie  $d = d(q, q_{goal})$  jest odległością danego położenia od celu,  $\xi$  jest stałą określającą poziom przyciągania do celu, natomiast  $d_{goal}^*$  określa próg, po którym funkcja z kwadratowej przechodzi w trójkątną. Oddziaływanie przeszkód opisane jest następującym wzorem:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*}\right)^2 & \text{dla } D(q) \leq Q^* \\ 0 & \text{dla } D(q) > Q^* \end{cases} \quad (5.3)$$

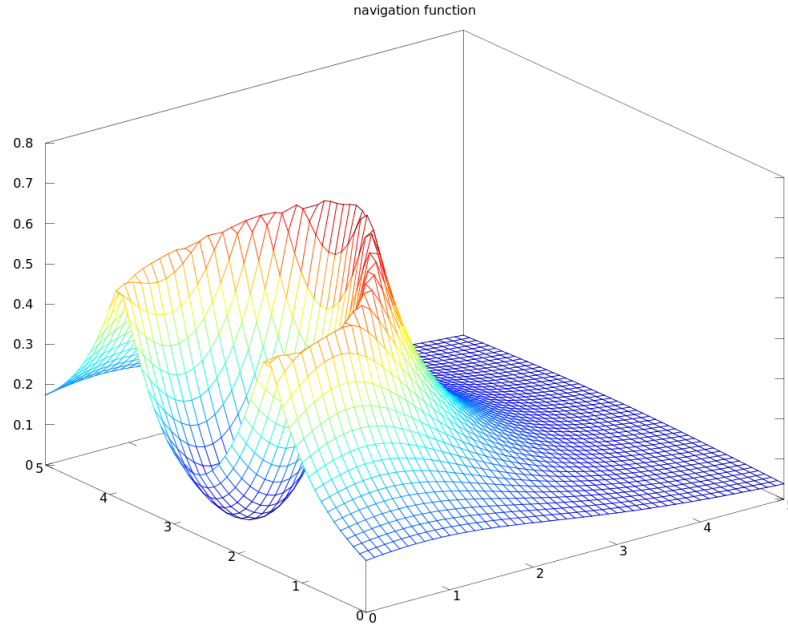
gdzie  $Q^*$  jest zasięgiem pola odpychającego przeszkody, natomiast  $\eta$  odpowiada za siłę tego pola. Kierunek, w którym podążać ma robot wyznaczany jest ze wzoru:

$$-\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) \quad (5.4)$$

Powyższe podejście w stosunkowo prosty sposób umożliwia wyznaczenie kierunku bezkolizyjnej ścieżki do celu. Posiada ono jednak pewną dość istotną wadę. Mianowicie w pewnych, szczególnych sytuacjach robot może utknąć w minimum lokalnym. Sposób w jaki konstruowana jest funkcja celu w żaden sposób nie wyklucza występowania minimów lokalnych. W przypadku, gdy sterowany robot utknie w takim minimum, konieczna jest reakcja ze strony wyższej warstwy nawigującej maszyną. Przykładowo można wykorzystać algorytm błędzenia losowego.

### Funkcja nawigacji

Istnieje jednak pewna szczególna funkcja, która posiada tylko globalne minimum, została ona zdefiniowana w publikacjach [18] oraz [19]. Przykładowy wykres funkcji nawigacji zamieszczony jest na rysunku 5.5. Zasięg oddziaływania minimum globalnego zależy od kilku istotnych parametrów, które zawarte są we wzorze opisującym rozkład sztucznego potencjału. Dla bieżącego położenia robota  $q$  funkcja nawigacji



Rysunek 5.5: Funkcja nawigacji dla  $\kappa = 10$

zdefiniowana jest następująco:

$$\phi = \frac{(d(q, q_{goal}))^2}{(\lambda\beta(q) + d(q, q_{goal})^{2\kappa})^{\frac{1}{\kappa}}} \quad (5.5)$$

gdzie  $\beta(q)$  jest iloczynem funkcji odpychających zdefiniowanych dla wszystkich przeszkód:

$$\beta \triangleq \prod_{i=0}^N \beta_i(q) \quad (5.6)$$

Natomiast dla każdej przeszkody ( $i > 0$ ) funkcja określona jest następująco:

$$\beta_i(q) = (d(q, q_i))^2 - r_i^2 \text{ dla } i = 1 \dots N, \text{ gdzie } N \text{ jest liczbą przeszkód} \quad (5.7)$$

Powyższą funkcję definiuje się dla każdej z przeszkód o promieniu  $r_i$ , której środek znajduje się w punkcie  $q_i$ . Jak łatwo zauważyć, funkcja ta przyjmuje ujemne wartości wewnątrz okręgu opisującego przeszkodę, natomiast dodatnie na zewnątrz okręgu. Dodatkowo definiuje się funkcję  $\beta_0(q) = -(d(q, q_0))^2 + r_0^2$ , w której parametry  $r_0$  oraz  $q_0$  oznaczają odpowiednio promień świata w którym porusza się robot oraz środek tego świata. Wzór 5.5 posiada dwa istotne parametry. Pierwszy z nich,  $\lambda$  ogranicza przeciwdziałanie do przedziału  $[0, 1]$ , gdzie wartość 0 jest tożsama z osiągnięciem

celu, natomiast 1 jest osiągnięta na brzegu każdej z przeszkód. Drugi parametr  $\kappa$  odpowiednio dobrany powoduje, że blisko celu wykres funkcji  $\phi$  przybiera kształt misy. Zwiększanie parametru  $\kappa$  powoduje przesuwanie globalnego minimum w kierunku położenia punktu docelowego. Zwiększone jest zatem oddziaływanie przyciągającego pola emitowanego przez punkt docelowy.

Wykres funkcji nawigacji przedstawiony na rysunku 5.5 został sporządzony dla następujących parametrów (wszystkie jednostki wyrażone są w metrach):

1. eksplorowany świat ograniczony jest okręgiem o środku w punkcie  $q_0(2.7; 3.7)$  i promieniu  $r_0 = 7.4$ ,
2.  $\lambda = 0.2$ ,
3.  $\kappa = 10$ ,
4. przeszkody umiejscowione są w punktach  $(2; 2)$ ,  $(3; 3)$ ,  $(4; 4)$ ,  $(3.5; 3.5)$  i mają stały promień, odpowiadający modelowi robota zastosowanemu podczas doświadczeń  $r_i = 0.14$ ,
5. punkt docelowy ma współrzędne  $q_g(2.7; 0.675)$ ,
6. funkcja nawigacji została wykreślona z krokiem 0.1.

### 5.1.5 Algorytm CVM (*Curvature Velocity Method*)

W pracy inżynierskiej [15] jako docelowy algorytm unikania kolizji wybrany został właśnie CVM. Metoda krzywizn i prędkości (ang. *Curvature Velocity Method*) została zaproponowana przez R. Simmonsa w [6], należy do grupy metod bazujących na przeszukiwaniu przestrzeni prędkości, a jej działanie jest zbliżone do techniki dynamicznego okna zaprezentowanej w 5.1.3.

Spośród wszystkich par  $(v, \omega)$  wybierana jest taka, która osiąga największą wartość funkcji celu. Podejście takie umożliwia uwzględnienie przede wszystkim ograniczeń kinematycznych, ale także i dynamicznych. Wyznaczone przez algorytm sterowanie na następny krok definiuje łuk  $c = \frac{\omega}{v}$ , po którym będzie poruszał się robot do chwili wyznaczenia kolejnego sterowania.

Funkcja celu została tak skonstruowana, aby preferować prędkości, które prowadzą do celu, ale jednocześnie nie powodują kolizji. Ponadto dołożone zostało kryterium na maksymalizację prędkości liniowej robota. Funkcja celu jest zatem sumą

ważoną trzech składowych:

$$F(v, \omega) = \alpha_1 \mathcal{V}(v, \omega) + \alpha_2 \mathcal{D}(v, \omega) + \alpha_3 \mathcal{G}(v, \omega) \quad (5.8)$$

gdzie:

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  współczynniki wagowe,
- funkcja  $\mathcal{V}(v, \omega)$  określa stosunek między ocenianą prędkością liniową a maksymalną,
- funkcja  $\mathcal{D}(v, \omega)$  określa odległość od najbliższej przeszkody na którą napotka robot poruszający się po trajektorii wyznaczonej przez  $(v, \omega)$ ,
- funkcja  $\mathcal{G}(v, \omega)$  odpowiada za kierowanie się robota na cel.

Zachowaniem robota można sterować poprzez zmianę wartości współczynników wagowych. W skrajnych przypadkach, gdy któryś ze współczynników zostanie wyzerowany, traci on całkowicie wpływ na trajektorię po której porusza się robot. Szczegółowy opis poszczególnych składowych, jak i samego działania metody został zaprezentowany w paragrafie 5.2.

## 5.2 Zasada działania CVM

Omawianie mechanizmu wyboru najlepszego sterowania z wykorzystaniem algorytmu *CVM* należy rozpocząć od przypomnienia funkcji celu (5.8)

$$F(v, \omega) = \alpha_1 \mathcal{V}(v, \omega) + \alpha_2 \mathcal{D}(v, \omega) + \alpha_3 \mathcal{G}(v, \omega)$$

W powyższym równaniu składowe odpowiadające za kierowanie na cel oraz za maksymalizację prędkości liniowej zostały zdefiniowane następująco:

$$\mathcal{V}(v, \omega) = \frac{v}{V_{max}} \quad (5.9)$$

$$\mathcal{G}(v, \omega) = 1 - \frac{|\theta_{cel} - T_{alg}\omega|}{\pi} \quad (5.10)$$

gdzie:

- $V_{max}$  – maksymalna prędkość liniowa z jaką może poruszać się robot

- $T_{alg}$  – czas na jaki wystawiane jest obliczone sterowanie
- $\theta_{cel}$  – orientacja do celu w układzie współrzędnych robota

Natomiast zdefiniowanie składowej odpowiedzialnej za omijanie przeszkód wymaga określenia pewnych dodatkowych funkcji wykorzystywanych w algorytmie. Należy dokonać przekształcenia opisu przeszkód we współrzędnych kartezjańskich do przestrzeni prędkości. Dokonywane jest to za pomocą odległości do punktu  $p$ , w którym wystąpi kolizja z przeszkodą  $o$ , jeśli robot będzie poruszał się po trajektorii  $c = \frac{\omega}{v}$ . Wartość ta jest oznaczana jako  $d_c((0, 0), p)$ , gdzie  $p$  jest punktem zderzenia z przeszkodą. Następnie należy zdefiniować funkcję odległości robota od przeszkody:

$$d_v(v, \omega, p) = \begin{cases} d_c((0, 0), p_i) & \text{dla } v \neq 0 \\ \infty & \text{dla } v = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

Dla danego zbioru przeszkód  $O$  zawsze wybierana jest odległość do najbliższej przeszkody leżącej na trajektorii. Zatem funkcję dla danego zbioru przeszkód  $O$  można zapisać następująco:

$$D_v(v, \omega, O) = \inf_{o \in O} d_v(v, \omega, o) \quad (5.12)$$

W rzeczywistości jednak informacja o położeniu przeszkód jest ograniczona do pewnego obszaru, który może wynikać z zasięgu czujników w jakie wyposażony jest robot, bądź ze sztucznego ograniczenia zasięgu działania algorytmu w przypadku, gdy możliwy jest dostęp do globalnej informacji o położeniu przeszkód. Zasięg algorytmu będzie w dalszej części pracy oznaczany jako  $L$ . Funkcja (??) jest zatem ograniczona od góry w sposób następujący:

$$D_{ogr}(v, \omega, P) = \min(L, D(v, \omega, P)) \quad (5.13)$$

Po uprzednim zdefiniowaniu niezbędnych funkcji można podać postać funkcyjną składowej funkcji celu odpowiadającej za unikanie kolizji:

$$\mathcal{D}(v, \omega) = \frac{D_{ogr}}{L} \quad (5.14)$$

Aby sposób obliczania odległości do przeszkody był możliwie jak najprostszy, każda przeszkoda jest reprezentowana w algorytmie jako okrąg o promieniu  $r$  (wynikającym z jej rozmiarów) i współrzędnych środka  $(x_0, y_0)$ . Można zatem dość łatwo wyznaczyć odległość, jaką przebędzie robot poruszający się po łuku wyznaczonym

przez parę  $(v, \omega)$  do momentu przecięcia z okręgiem. Zostało to zobrazowane na rysunku 5.6.

Dla robota o początkowej orientacji zgodnej z osią  $OY$ , poruszającego się po trajektorii o krzywiznie  $c$  przecinającej okrąg opisujący przeszkodę w punkcie  $P(x, y)$  prawdziwe są następujące wzory:

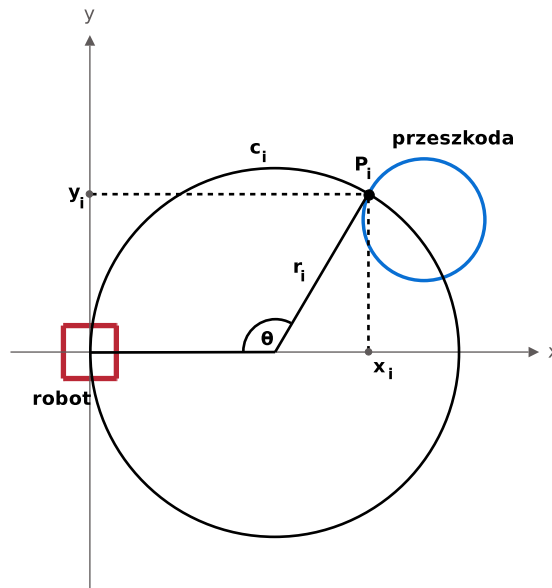
$$\theta = \begin{cases} \text{atan2}(y, x - \frac{1}{c}) & \text{dla } c < 0 \\ \pi - \text{atan2}(y, x - \frac{1}{c}) & \text{dla } c > 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

$$d_c((0, 0), P) = \begin{cases} y & \text{dla } c = 0 \\ |\frac{1}{c}|\theta & \text{dla } c \neq 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

Zastosowana we wzorze (5.15) funkcja  $\text{atan2}$  zwraca wartości z przedziału  $[-\pi; \pi]$ , zatem uwzględnia w której ćwiartce leży kąt:

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan \frac{|y|}{|x|} \text{sgn}(y) & \text{dla } x > 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{sgn}(y) & \text{dla } x = 0 \\ \pi - \arctan \frac{|y|}{|x|} \text{sgn}(y) & \text{dla } x < 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

Jednakże obliczanie odległości od przeszkody dla każdego sterowania  $(v, \omega)$  w sposób omówiony powyżej jest czasochłonne. Stąd konieczne jest kolejne uproszczenie. Łatwo zauważyć, że z punktu  $(0, 0)$  w którym znajduje się robot można



Rysunek 5.6: Obliczanie odległości od przeszkody



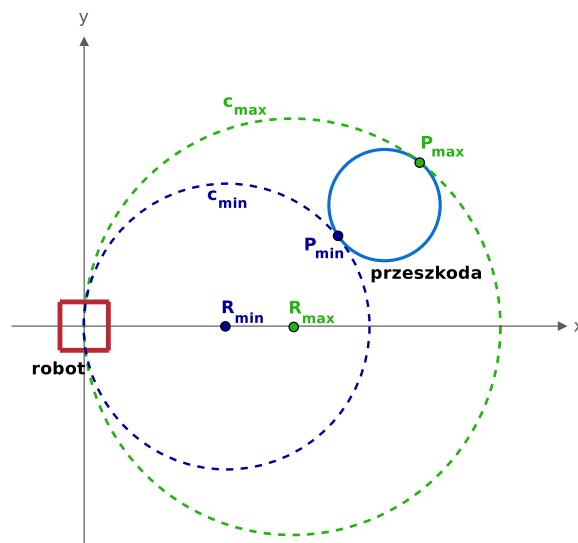
poprowadzić dwa łuki styczne do okręgu opisującego przeszkodę  $p$ . Zatem na zewnętrznych krzywych stycznych odległość  $d_c((0,0),p)$  jest nieskończona. Natomiast dla krzywizn zawierających się pomiędzy łukami stycznymi można dokonać przybliżenia wartością stałą. Omawiana sytuacja została zobrazowana na rysunku 5.7. Aby wyznaczyć okręgi styczne do okręgu opisującego przeszkodę należy znaleźć takie  $r$  dla którego poniższy układ równań ma dokładnie jedno rozwiązanie:

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_0^2 \\ (x - r)^2 + y^2 = r^2 \end{cases} \quad (5.18)$$

Gdzie  $(x_0, y_0)$  jest środkiem okręgu opisującego przeszkodę, natomiast  $r_0$  jego promieniem. W wyniku takiego postępowania można otrzymać punkty styczności  $P_{max}$  oraz  $P_{min}$  oraz odpowiadające im krzywizny  $c_{min}$  oraz  $c_{max}$ . Ostatecznie można już dokonać przybliżenia odległości po łuku od rozpatrywanej przeszkody  $p$  w następujący sposób:

$$d_v(v, \omega, p) = \begin{cases} \min(d_c((0,0), P_{max}), d_c((0,0), P_{min})) & c_{min} \leq c \leq c_{max} \\ \infty & \text{w p.p.} \end{cases} \quad (5.19)$$

Zaprezentowane rozumowanie prowadzi do sytuacji, w której zbiorowi przeszkód  $O$  odpowiada zbiór przedziałów krzywizn o stałej odległości od przeszkody. W dalszej części pracy przedział będzie rozumiany jako trójka liczb postaci  $([c_1, c_2], d_{1,2})$ , gdzie  $c_1, c_2$  to krzywizny okręgów wyznaczających ten przedział, natomiast  $d_{1,2}$  jest odległością zdefiniowaną równaniem (5.19).



Rysunek 5.7: Zasada wyznaczania przedziału  $(c_{min}, c_{max})$

Ze zbioru przedziałów należy następnie utworzyć listę przedziałów  $\mathbb{S}$ , tak, aby zawierała przedziały  $s$  rozłączne o odległości do najbliższej przeszkody (zgodnie z równaniem (??)). W oryginalnej pracy na temat *CVM* [6] zaproponowany został algorytm (5.1) realizujący to zadanie.

---

**Algorytm 5.1** tworzy listę rozłącznych przedziałów  $\mathbb{S}$ 


---

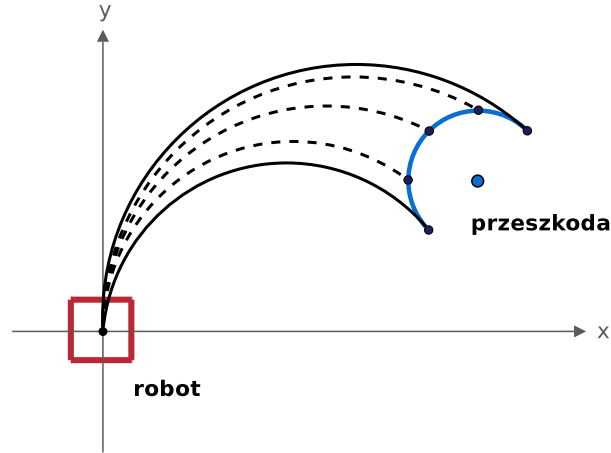
```

 $\mathbb{S} := ((-\infty; \infty), L)$ 
wybierz kolejny nie dodany przedział  $([c_{min}; c_{max}], d)$ 
for all  $s \in \mathbb{S}$  do
    if zbiory są rozłączne then
        nic nie rób
    else if  $s$  zawiera się w  $([c_{min}; c_{max}], d)$  then
        ustaw odległość  $s.d = \min(s.d, d)$ 
    else if  $s$  zawiera  $([c_{min}; c_{max}], d)$  then
        if  $d < s.d$  then
            podziel  $s$  na trzy przedziały:
             $([s.c_{min}; c_{min}], s.d), ([c_{min}; c_{max}], d), ([c_{max}; s.c_{max}], s.d)$ 
        else
            nic nie rób
    else if  $s$  częściowo zawiera  $([c_{min}; c_{max}], d)$  then
        if  $d < s.d$  then
            podziel  $s$  na dwa przedziały
            if  $c_{max} > s.c_{max}$  then
                podziel na przedziały  $([s.c_{min}; c_{min}], s.d)$   $([c_{min}; s.c_{max}], d)$ 
            else
                podziel przedziały  $([s.c_{min}; c_{max}], d)$   $([c_{max}; s.c_{max}], s.d)$ 
        else
            nic nie rób

```

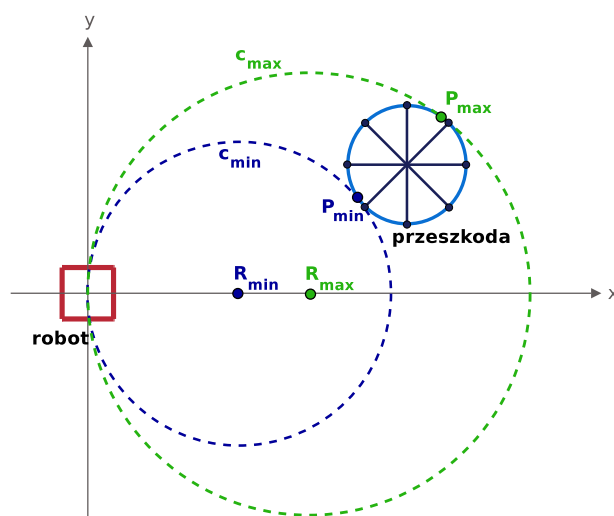
---

W zależności od rozmieszczenia przeszkód w środowisku przedziały wyznaczone przez krzywizny  $c_{min}$  oraz  $c_{max}$  charakteryzują się różną szerokością. Często przybliżenie zbioru długości krzywych należących do  $[c_{min}, c_{max}]$  jedną stałą wartością jest niewystarczające. Zazwyczaj przedział ten zawiera zbiór łuków których odległość od przeszkody jest istotnie mniejsza niż ta wynikająca ze wzoru (5.19). Sytuacja taka została zilustrowana na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8: Ukazanie sensu zastosowania segmentacji

Jednym z możliwych rozwiązań powyższego problemu jest podzielenie przedziału  $[c_{min}, c_{max}]$  na kilka pod przedziałów i do każdego z nich zastosowanie równania (5.19) w celu wyznaczenia odległości od przeszkody. W pracy przyjęto rozwiązanie analogiczne jak opisane w [7]. Pierwszym etapem jest wyznaczenie punktu leżącego na okręgu reprezentującym przeszkodę położonego najbliżej robota zgodnie z metryką euklidesową. Następnie okrąg jest dzielony symetrycznie na  $k$  segmentów. Postępowanie takie zostało przedstawione na rysunku 5.9. Dla każdych dwóch sąsiadujących ze sobą punktów leżących pomiędzy punktami styczności  $P_{min}$  oraz  $P_{max}$  wyznaczane są krzywizny  $c_1$  oraz  $c_2$  i tworzony jest przedział. Jako odległość przyjmowana jest krótsza z odległości zgodnie ze wzorem (5.19). Tak otrzymane przedziały są dodawane do listy za pomocą algorytmu 5.1.



Rysunek 5.9: Efekt podziału okręgu na części

### 5.3 Algorytm RRT

#### *(Rapidly-Exploring Random Tree)*

Kolejnym zupełnie odmiennym podejściem w planowaniu bezkolizyjnej ścieżki jest losowe przeszukiwanie dopuszczalnej przestrzeni położeń robota. Szczegółowe informacje na jego temat można znaleźć w [2] oraz w [3]. Algorytm RRT jest wydajnym algorytmem, który w czasie rzeczywistym może wyznaczyć drogę do celu, jednak nie jest ona optymalna pod względem dynamiki, kinematyki ani długości. Podstawową strukturą danych na której operuje algorytm jest drzewo. Jako korzeń przyjmowany jest stan reprezentujący położenie robota w momencie uruchomienia algorytmu. Budowa drzewa polega na dodawaniu kolejnych węzłów do drzewa w kierunku punktu obranego w danym kroku jako docelowy. Tymczasowy stan docelowy generowany jest w następujący sposób:

---

**Algorytm 5.2** Funkcja obliczająca stan docelowy

---

```
function chooseTarget(goal:state) state;  
p = uniformRandom in [0.0...1.0]  
if 0.0 < p < goalProb then  
    return goal;  
else if goalProb < p < 1.0 then  
    return RandomState()
```

---

Na listingu 5.2 użyta została funkcja **RandomState**, zwracająca losowy punkt ze zbioru wszystkich możliwych położenia robota. W najprostszej realizacji, może ona zwracać współrzędne punktu dobierane z rozkładem jednostajnym z określonego wcześniej obszaru. W każdej iteracji algorytmu tymczasowy stan docelowy obliczany jest na nowo. Aktualne drzewo, na którym operuje algorytm przeszukiwane jest w celu znalezienia węzła **nearest** położonego najbliżej tego celu. Węzeł **nearest** rozszerzany jest w kierunku tegoż celu za pomocą funkcji **extend**. Operacja ta w najprostszym ujęciu polega na stworzeniu nowego węzła przesuniętego względem **nearest** o odcinek **rrtStep** w kierunku tymczasowego celu. Istotne jest, aby sprawdzić czy nowo wygenerowany stan znajduje się w dopuszczalnej przestrzeni stanów  $\mathcal{S}$ . W najprostszym wariantcie można zastosować heurystykę, sprawdzającą jedynie czy położenie to nie koliduje z żadną z przeszkód znajdujących się w danej sytuacji oraz czy robot jest w stanie do niego dotrzeć. Bardziej zaawansowane heurystyki powinny sprawdzać czy na przykład podczas przemieszczania się do nowej pozycji nie nastąpi kolizja z dynamiczną przeszkodą. W ogólnym ujęciu algorytm RRT wygląda zatem następująco:

---

**Algorytm 5.3** Ogólna zasada algorytmu RRT

---

```
zbuduj model eksplorowanego świata  $\mapsto$  env:environment;  
zainicjuj stan początkowy  $\mapsto$  initState:state;  
zainicjuj stan końcowy  $\mapsto$  goalState:state;  
  
while goalState.distance(nextState) > minimalDistance do  
    wybierz tymczasowy cel: target = chooseTarget(goalState)  
    nearestState = nearest(tree, target)  
    extendedState = extend(env, nearest, target)  
    if extendedState != NULL then  
        addNode(tree, extended)  
return tree;
```

---

W opisie algorytmu 5.3 użyte zostały nie omówione jeszcze funkcje, `distance` zwracająca odległość w sensie euklidesowym między dwoma punktami zawartymi w węzłach drzewa, `addNode` dodająca węzeł do bieżącego drzewa. Parametr `rtrStep` jest natomiast wyrażony w metrach. Tak zaimplementowana wersja algorytmu może być zastosowana jako skuteczne narzędzie do bezkolizyjnej nawigacji robotem, jednak jego wydajność można poprawić poprzez modyfikacje opisane w kolejnym podrozdziale.

### 5.3.1 Modyfikacje algorytmu, czyli przejście z RRT do ERRT

Omawiany algorytm można zmodyfikować pod kątem szybkości działania. Po pierwsze, elementy drzewa można przechowywać w strukturach ułatwiających przeszukiwanie drzewa. W literaturze stosowane są w tym celu **KD-drzewa**. Kolejną modyfikacją jest zapamiętywanie losowo wybranych węzłów ze ścieżki znalezionej w poprzednim uruchomieniu algorytmu. W takim wariantcie tymczasowy punkt docelowy wybierany jest następująco:

**Algorytm 5.4** Zmodyfikowana funkcja obliczająca stan docelowy

---

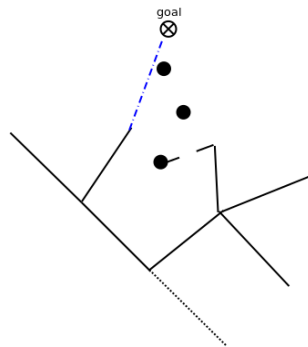
```

function chooseTargetExt(goal:state) state;
p = uniformRandom in[0.0...1.0]
i = uniformRandom in[0...number_of_waypoints - 1]
if 0.0 < p < goalProb then
    return goal;
else if goalProb < p < goalProb + wayPointProb then
    return WayPoints[i]
else if goalProb + wayPointProb < p < 1.0 then
    return RandomState()

```

---

W publikacji [2] prawdopodobieństwo podążania do właściwego celu ostatecznie ustalane zostało na poziomie 0.1, natomiast `wayPointProb` wynosiło 0.7. Kolejną



Rysunek 5.10: RRT z zapamiętanymi węzłami z poprzedniego uruchomienia. Linia kropkowaną zaznaczono gałąź dodaną w kierunku losowego punktu, linią przerywaną w kierunku jednego z elementów z poprzedniej ścieżki, a linią niebieską w kierunku celu.

modyfikacją jest zmiana sposobu obliczania odległości, standardowo w algorytmie wykorzystywana jest odległość pomiędzy liściem drzewa a punktem docelowym. Aby uniknąć nadmiernego rozrastania drzewa, odległość może uwzględniać dodatkowo odległość liścia od korzenia pomnożoną przez określony współczynnik wagowy.

## 5.4 Zalety algorytmu RRT w stosunku do CVM

Podczas kontynuacji prac nad rozgrywkami RoboCup zdecydowano się na zmianę algorytmu wyznaczającego bezkolizyjną ścieżkę. Zmiana została wymuszona decyzją o zmianie modelu sterowanego robota. Bazę jezdnią o napędzie różnicowym zastąpiono holonomiczną. Algorytm CVM jest algorytmem dedykowanym do robotów o napędzie różnicowym, doskonale można ująć w nim ograniczenia na dopuszczalne prędkości. Jednak sterowanie za jego pomocą robotem holonomicznym nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości robota. Dodatkowo, jak zostało udowodnione w pracy inżynierskiej [15], CVM nie sprawdza się w silnie dynamicznym środowisku. Podczas testów z przeszkodami dynamicznymi osiągał skuteczność na poziomie 80%. Kolizje występowały głównie w sytuacjach, kiedy przeszkoda uderzała w robota z boku lub z tyłu. Wynikało to z faktu, że trajektoria ruchu takiej przeszkody znajdowała się poniżej osi  $OY$  w układzie współrzędnych związanym ze sterowanym robotem. Przeszkody takiego typu nie były uwzględniane przez algorytm. RRT pozwala na uwzględnianie przeszkód rozsianych po całej planszy. Dodatkowo umożliwia poruszanie się po bardziej złożonych trajektoriach. Kolejną zaletą RRT jest prostota w ograniczaniu przestrzeni, z której losowane są tymczasowe punkty docelowe. Dzięki temu w prosty sposób można ograniczyć poruszanie się robota tylko do wnętrza boiska. W przypadku CVM istniała konieczność modelowania bandy boiska jako zbioru okręgów, mnożyło to ilość obiektów z jakimi należało wykrywać kolizje. Kolejnym problemem CVM jest nawigacja do celu znajdującego się za robotem. W pracy inżynierskiej wprowadzono modyfikację, zmieniającą parametr odpowiedzialny za kierowanie robota na cel, uzależniając go od orientacji robota względem celu. Intencją było wymuszenie obrotu robota w kierunku celu, w sytuacji, gdy kąt o jaki powinien obrócić się robot, aby być skierowanym na cel ma dużą wartość. Modyfikacja ta poprawiła skuteczność algorytmu CVM, jednak nawet dla najlepszego zestawu współczynników wagowych wynosiła ona zaledwie 80%. W przypadku bazy holonomicznej obracanie się w kierunku punktu docelowego nie jest konieczne, stąd takie sterowanie nie jest optymalne.



## Rozdział 6

# Testy zaimplementowanej wersji algorytmu RRT

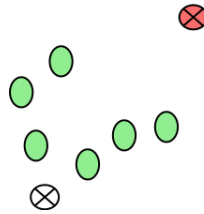
### 6.1 Opis implementacji algorytmu RRT

W trakcie testów wersji podstawowej RRT opisanej w 5.3 zdecydowano się na dodatkowe modyfikacje algorytmu. Część z nich przytoczono już w paragrafie 5.3.1, dodano też własne modyfikacje, które miały na celu poprawienie wydajności algorytmu i skrócenie czasu obliczeń. Zdecydowano się na implementację algorytmu w wersji z zapamiętywaniem części węzłów ze ścieżki wyznaczonej w poprzednim uruchomieniu, pod warunkiem, że punkt docelowy nie uległ zmianie i traktowanie ich jako tak zwanych **way points**. Jednak z uwagi na specyfikę eksplorowanego środowiska (brak wąskich korytarzy oraz wypukłe przeszkody) postanowiono wyeliminować z zapamiętanej ścieżki węzły, których odległość między sąsiadami jest mniejsza niż 5[cm]. Zrezygnowano z przechowywania węzłów w postaci KD-drzewa. Ponadto, jeśli w trakcie działania algorytmu nie jest możliwe rozszerzenie drzewa w kierunku jednego z **way points**, jest on usuwany z listy do momentu dodania nowego węzła do drzewa. Podobny mechanizm zastosowano z właściwym punktem docelowym.

Dodatkowo wprowadzono ograniczenie na maksymalną liczbę węzłów algorytmu. Sytuacja na planszy podczas rozgrywki szybko ulega zmianie, stąd czasochłonne wyznaczanie kompletnej ścieżki do celu pozbawione jest sensu. Gdy podczas obliczeń przekroczona zostanie maksymalna liczba węzłów drzewa, a ścieżka nie zostanie znaleziona, algorytm jest przerywany. Przy ponownym uruchomieniu sytuacja może

wyglądać inaczej i algorytm szybciej wyznaczy ścieżkę. Jeśli uruchomienie algorytmu nie zakończyło się wyznaczeniem kompletnej ścieżki, jako punkt docelowy dla robota wybierany jest węzeł znajdujący się najbliżej celu.

Zauważono także, że przy małym prawdopodobieństwie budowy ścieżki do celu, drzewo może ulegać nadmiernemu rozbudowaniu przy samym korzeniu. Ma to miejsce w sytuacji, gdy tymczasowe punkty losowane są z otoczenia korzenia. Kolejne wylosowane węzły mogą powodować poszerzenie gałęzi, a tak rozbudowane gałęzie mogą znajdować się w podobnej odległości od celu. W efekcie algorytm przez dłuższy czas może próbować wyznaczać kilka ścieżek prowadzących do celu, co nie jest pożądane. Sytuację taką dla dwóch gałęzi przedstawiono na rysunku 6.1. W zaim-



Rysunek 6.1: Drzewo wyznaczające ścieżkę do celu.

plementowanej wersji ograniczono liczbę węzłów potomnych korzenia do 4.

Podobnie jak w pracy inżynierskiej [15] zdecydowano się na prostą predykcję położenia dynamicznych przeszkód. Zakłada się w niej, że wektor prędkości obiektu nie ulega zmianie. Zatem podczas obliczeń RRT analizuje dodatkowe przeszkody, których środek przemieszczony jest o  $\Delta T * v$ , gdzie  $\Delta T$  jest czasem co jaki uruchamiany jest algorytm, a  $v$  wektorem prędkości. Ze względu na zbliżony kształt, algorytm traktuje bazę jezdnią robota jako okrąg o środku znajdującym się w danym położeniu robota (przeszkody) i promieniu  $r = 2 * (r_{base} + l_{dribbler})$ , gdzie  $r_{base}$  jest promieniem bazy jezdnej robota, a  $l_{dribbler}$  długością *dribbler-a*. Podczas planowania ścieżki promienie przeszkód powiększane są dodatkowo o margines bezpieczeństwa. Ma on za zadanie wyeliminowanie ewentualnych kolizji wynikających z poślizgu robota podczas hamowania, czy opóźnienia przy zmianie kierunku jazdy. Główną zaletą RRT jest jego szybkość, stąd przewidywanie położenia przeszkody na 1 krok w przód okazało się wystarczające dla zastosowanych środowisk testowych. W przypadku CVM konieczne było dodawanie “wirtualnych” przeszkód symulujących położenie robotów za 15, 30 oraz 45 kroków symulatora. Na stronie 59 zamieszczono pełen przebieg pojedynczej iteracji zaimplementowanej wersji algorytmu.

---

**Algorytm 6.1** Wersja RRT z wprowadzonymi modyfikacjami

---

```

ogranicz maksymalną przestrzeń do rozmiarów boiska
if punkt docelowy jest poza dopuszczalnymi współrzędnymi then
    zwróć błąd
if w poprzednim uruchomieniu znaleziono ścieżkę do celu then
    zainicjuj listę waypoints
dodaj statyczne oraz dynamiczne przeszkody;
if robot uległ kolizji (nie są brane pod uwagę przewidywane położenia przeszkód)
then
    zwróć błąd;
if robot dojechał do celu then
    zwróć sukces;
if punkt docelowy jest w obrębie przeszkody then
    zwróć błąd;
if punkt docelowy jest bezpośrednio osiągalny then
    zwróć go jako wynik działania algorytmu;
while goalState.distance(nextState) > minimalDistance
and treeSize < maxNodeNumber do
    wybierz tymczasowy cel: tmp_target = chooseTarget(goalState)
    nearestState = nearest(tree, target)
    extendedState = extend(env, nearest, target)
    if extendedState != NULL then
        odblokuj ustawianie tmp_target jako goalState
        addNode(tree, extended)
    else if tmp_target należy do zbioru waypoints then
        usuń punkt ze zbioru waypoints
    else if tmp_target jest właściwym punktem docelowym then
        zablokuj ustawianie tmp_target jako goalState
if nearestState.distance(goalState) > minimalDistance then
    return węzeł znajdujący się najbliżej celu
else
    zapamiętaj ścieżkę do celu
    return węzeł bezpośrednio osiągalny znajdujący się najbliżej celu;

```

---

W opisie algorytmu zastosowano funkcje `chooseTarget` oraz `extend`, których działanie również zostało lekko zmodyfikowane w stosunku do oryginalnej wersji algorytmu. Ich funkcjonalność została przedstawiona poniżej:

---

**Algorytm 6.2** funkcja `chooseTarget` wyznaczająca tymczasowy punkt docelowy

---

```
function chooseTarget(goal:state) state;
p = uniformRandom in[0.0...1.0]
if wyznaczono ścieżkę w poprzednim uruchomieniu algorytmu then
    if  $0.0 < p < goalProb$  then
        if wybór właściwego punktu docelowego jest zablokowany then
            return randomPoint;
        return właściwy punkt docelowy
    else if  $p < goalProb + wayPointProb$  then
        i = uniformRandom in[0...number_of_waypoints - 1]
        return WayPoints[i]
    else
        return RandomState()
else
    if  $0.0 < p < goalProb$  and wybór właściwego punktu docelowego nie jest
    zablokowany then
        return goal;
    else
        return RandomState()
```

---

---

**Algorytm 6.3** funkcja `extend(nearest,tmp_target)` rozszerzająca drzewo w kierunku zadanego punktu

---

podczas detekcji kolizji przeszkody powiększane są o margines bezpieczeństwa oraz uwzględniane są dodatkowe przeszkody wynikające z ruchu robotów

**if** punkt docelowy leży w obrębie przeszkody **then**

**return** NULL

wyznacz nowy węzeł (`newNode`) odległy od `nearest` w kierunku `tmp_target`

**if** wyznaczony punkt leży w obrębie przeszkody **then**

**return** NULL

**return** newNode

---

### 6.1.1 Parametry zastosowanego algorytmu

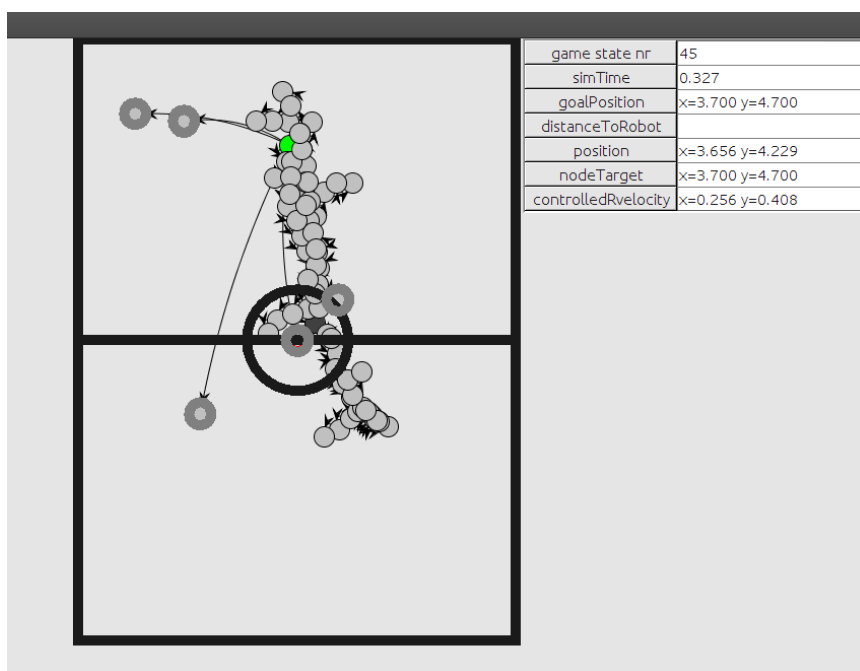
Zaimplementowaną wersję algorytmu RRT można w łatwy sposób konfigurować poprzez zmianę kluczowych parametrów takich jak:

1. włączanie/wyłączanie predykcji ruchu przeszkód,
2. prawdopodobieństwo losowania tymczasowego punktu docelowego należącego do `wayPoints` (*wayPointProb*) lub jako właściwy punkt docelowy (*goalProb*),
3. rozmiary dopuszczalnej przestrzeni z jakiej losowany jest tymczasowy cel, wynikające z rozmiaru świata lub innych ograniczeń,
4. ograniczenia na przestrzeń przeszukiwań wynikające z zaistniałej sytuacji na planszy, bądź z rodzaju zadania,
5. odległość po przekroczeniu której uznajemy, że robot dojechał do celu,
6. ścieżka z poprzedniego wywołania algorytmu, przekazywana tylko wtedy, gdy punkt docelowy nie zmienił się,
7. maksymalna liczba węzłów drzewa RRT,
8. maksymalna liczba węzłów doczepionych do korzenia,
9. odległość między `wayPoints`; z przekazanej ścieżki scalane są węzły między którymi odległość jest mniejsza niż wartość parametru,
10. `rrtStep` odległość o jaką rozszerzany jest węzeł leżący najbliżej tymczasowego celu w jego kierunku.

## 6.2 Aplikacja analizująca działanie algorytmu

W trakcie implementacji algorytmu RRT wyniknęła konieczność napisania programu umożliwiającego sprawdzenie poprawności jego działania. W tym celu powstała aplikacja `RRT_debug`. Umożliwia ona wczytanie serii drzew zapisanych w formacie xml. Program został napisany w języku Java, a do reprezentacji węzłów drzewa wykorzystano bibliotekę `JUNG-Java Universal Network/Graph Framework`. Aplikacja umożliwia śledzenie konstruowanych przez RRT drzew. Ilustracja 6.2 zawiera

przykładowy zrzut ekranu z uruchomionej aplikacji. Program umożliwia wyświetlanie dodatkowych informacji o zaznaczonym węźle drzewa oraz wykonywanie zbliżenia celem podglądu szczegółowo wybranej części drzewa. W prawym górnym rogu wyświetlane są informacje o czasie symulacji w jakim zostało stworzone drzewo, pozycji docelowej drzewa, tymczasowej pozycji w kierunku której rozszerzano drzewo przy dodawaniu zaznaczonego węzła, współrzędnych zaznaczonego węzła na planszy oraz prędkości sterowanego robota.



Rysunek 6.2: Aplikacja RRT\_debug.

### 6.3 Opis środowisk testowych

Algorytm RRT poddano wstępnym testom w aplikacji RRT\_debug. Po sprawdzeniu poprawności działania zdecydowano się na porównanie algorytmu pod względem skuteczności z metodą CVM opracowaną w pracy inżynierskiej [15]. W tym celu zastosowano ten sam zestaw środowisk testowych (załącznik C strona 94). W związku ze zmianą wymiarów boiska, sytuacje zaczerpnięte z pracy inżynierskiej zostały przeskalowane, odpowiednio wydłużony został także maksymalny czas eksperymentu. Dla środowisk dynamicznych wyniósł on 12.47[s], a dla statycznych 8.73[s]. Po przeskalowaniu droga do piłki nie przekraczała 3[m], maksymalną prędkość ograni-

czono do  $1[\frac{m}{s}]$ . W optymistycznym wariancie, jadąc prosto do celu z maksymalną prędkością robot powinien przejechać dystans maksymalnie w  $3[s]$ . Testy przeprowadzono na 10 środowiskach statycznych oraz na 10 środowiskach dynamicznych. W przypadku eksperymentów w środowisku statycznym dokonano pewnego uproszczenia. Zrezygnowano z rozróżnienia eksperymentów na sytuacje, gdy robot zwrócony jest w stronę celu lub przeciwnie. Metoda opracowana w pracy inżynierskiej była zdecydowanie mniej skuteczna w sytuacjach, gdy cel znajdował się za robotem. Wynikało to ze specyfiki samego algorytmu, jak i rodzaju zastosowanej bazy jezdnej (ograniczenia wynikające z więzów nieholonomicznych). Algorytm RRT jest niewrażliwy na położenie punktu docelowego względem sterowanego robota, zastosowana baza jezdna także pozwala na poruszanie się w dowolnym kierunku. Zadaniem sterowanego robota było dojechanie do piłki, unikając przy tym kolizji z innymi robotami, bandą boiska oraz bramkami. Aby warunki eksperymentu były zbliżone do tych jakim poddano algorytm CVM, wyłączono w sterowniku regulator PID. Zdecydowano się na zbadanie działania algorytmu dla różnych prawdopodobieństw wyboru tymczasowego punktu docelowego. Na każdej planszy algorytm uruchomiono 20-krotnie dla różnego zestawu prawdopodobieństw *goalProb*, *wayPointProb*. Przetestowano wszystkie możliwe warianty prawdopodobieństw z krokiem 0.1. Takich par jest dokładnie 65. Ponumerowane zestawy współczynników zamieszczone są w załączniku C na stronie 94. Pomiarom zostały poddane następujące wielkości:

1. liczba eksperymentów zakończonych sukcesem dla każdego zestawu wag,
2. czas dojazdu robota do celu, przy czym uwzględnione zostały jedynie sytuacje w których robot zakończył eksperyment sukcesem,
3. średni czas obliczeń jednego uruchomienia algorytmu, z pominięciem sytuacji w których cel był bezpośrednio osiągalny,
4. maksymalna długość wyznaczonej ścieżki w czasie trwania jednego eksperymentu, dla testowanego zestawu prawdopodobieństw,
5. maksymalna liczba węzłów drzewa wyznaczana w analogiczny sposób jak powyżej.

Dodatkowo zamieszczony został wykres przedstawiający ile razy dla danego zestawu wag i konkretnej planszy choć raz znaleziono ścieżkę do celu.

W trakcie przeprowadzanych eksperymentów krok, z jakim pracował symulator został ustawiony na  $0.001[s]$ , przy takiej wartości `real-time factor` kształtował się w okolicach  $0.9 - 1.0$  na maszynie wyposażonej w procesor Intel i5-2520M z zegarem  $2.5[GHz]$ . W przypadku środowisk statycznych daje to maksymalny czas pełnego eksperymentu na poziomie 31 godzin, w przypadku środowisk dynamicznych górne ograniczenie wyniosło 45 godzin.

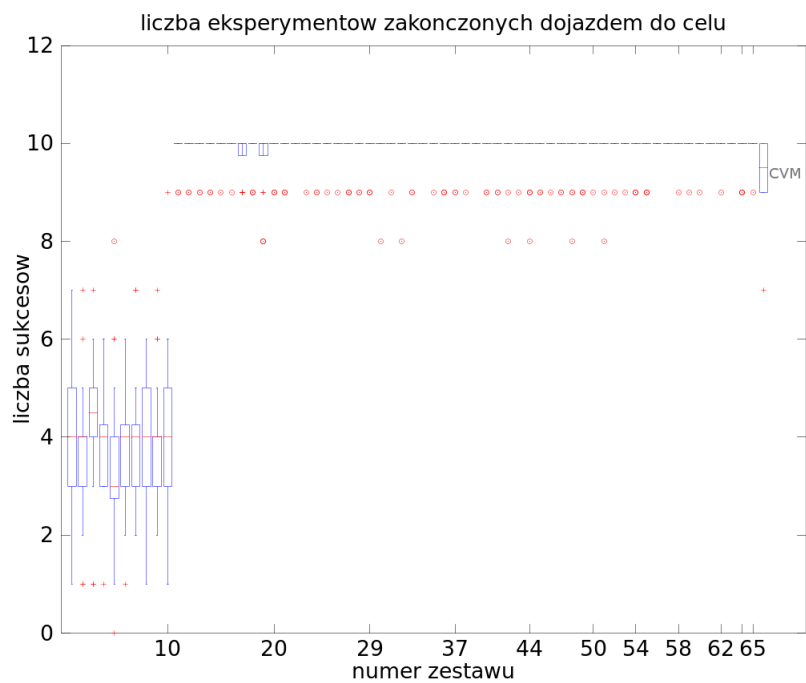
## 6.4 Wyniki eksperymentów w środowisku statycznym

Poniższe wykresy prezentują wyniki otrzymane dla środowisk statycznych. Wyniki zostały zaprezentowane w taki sposób, że na osi  $OX$  zaznaczono markerami wartości, przy których zmienia się wartość parametru *goalProb*. Zatem przykładowo, pomiędzy wartościami 0 a 10 *goalProb* jest stałe, równe 0, a *wayPointProb* zmienia się z krokiem 0.1. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku pozostałych przedziałów. Dodatkowo, w przypadku wykresu 6.3 zamieszczono wynik otrzymany przez CVM w pracy inżynierskiej.

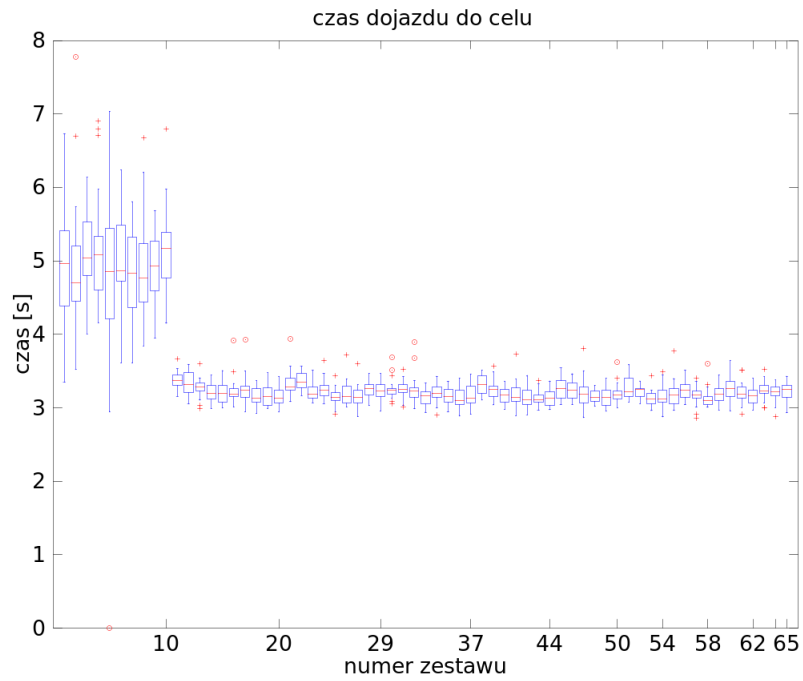
Można zauważyć, że dla współczynników poniżej numeru 11, czyli gdy prawdopodobieństwo budowania drzewa do celu jest równe 0, algorytm przy odpowiednio długim uruchomieniu także potrafi wyznaczyć ścieżkę do celu. Jednak czas obliczeń samego algorytmu jest długi, rzędu  $350[ms]$ , a czas dojazdu jest na poziomie  $5[s]$ . Przy takich parametrach, znalezienie ścieżki do celu wymaga zbudowania drzewa zawierającego w granicach 800 węzłów. Dla większości zestawów wag, populacja wyników jest skupiona przy wartości 10 co oznacza 100% skuteczność, dla porównania na wykresie 6.3, jako ostatni współczynnik wagowy zamieszczono najlepszy wynik uzyskany przez algorytm CVM. Drugi kwartyl jest równy 9.47, co także oznacza wysoką skuteczność, jednak nieco niższą niż RRT. Na wykresach można jeszcze zauważyć, że prawdopodobieństwo *wayPointProb* ma nieznaczny wpływ na czas dojazdu do celu. Natomiast wraz ze wzrostem *wayPointProb* maleją czas obliczeń, oraz rozmiar budowanego drzewa, co zostało przedstawione na wykresach 6.5 oraz 6.8. Uzasadnia to stosowanie *waypoints* w algorytmie. budowanego drzewa jak i samej ścieżki do celu. Na wykresach symbolem  $+$  oznaczone są wartości pomiędzy  $1.5IQR$ , a  $3IQR$ , natomiast symbolem  $o$  oznaczone są wartości, których odchylenie od popu-



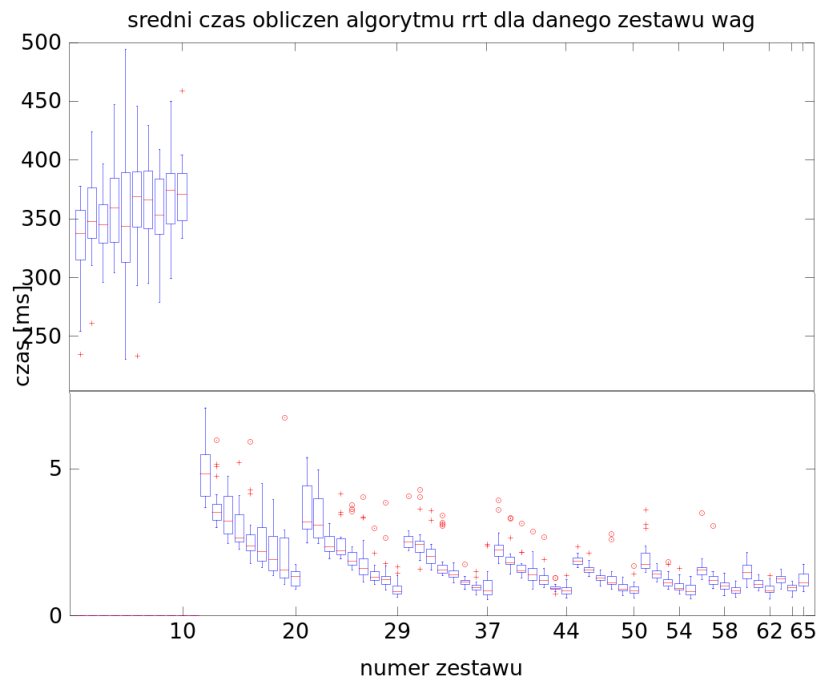
lacji przekracza trzykrotnie rozstęp ćwiartkowy (IQR).



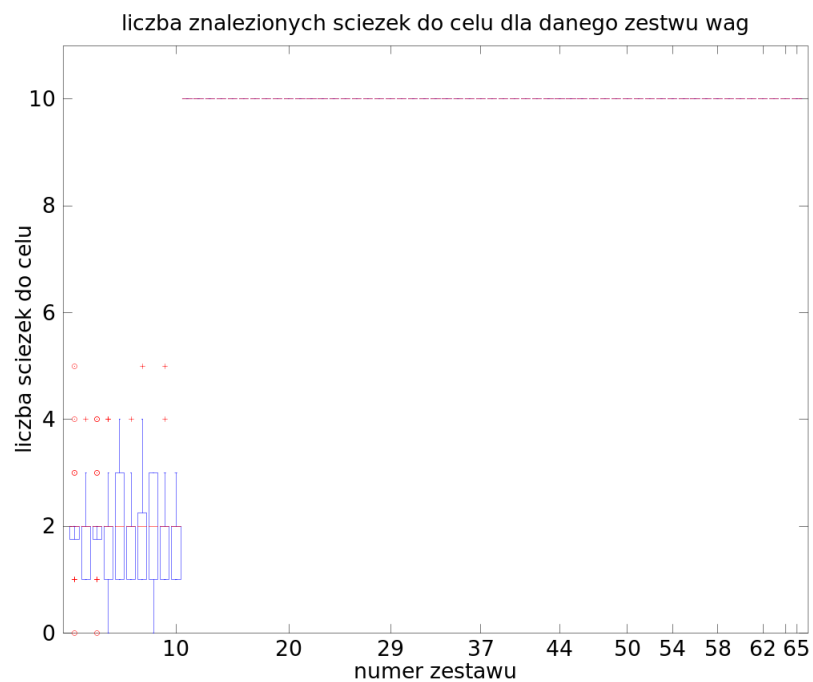
Rysunek 6.3: Liczba eksperymentów zakończonych sukcesem.



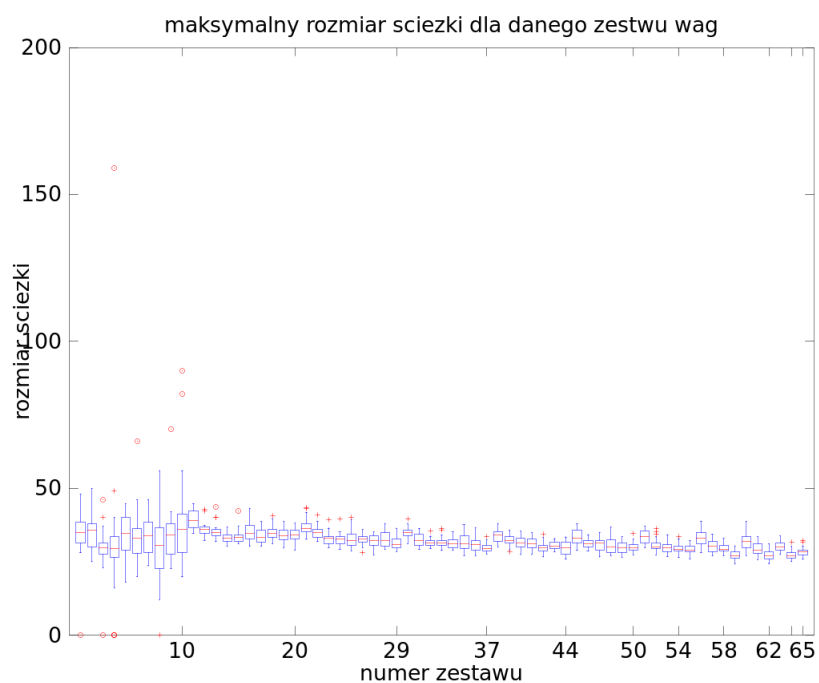
Rysunek 6.4: Czas dojazdu do celu.



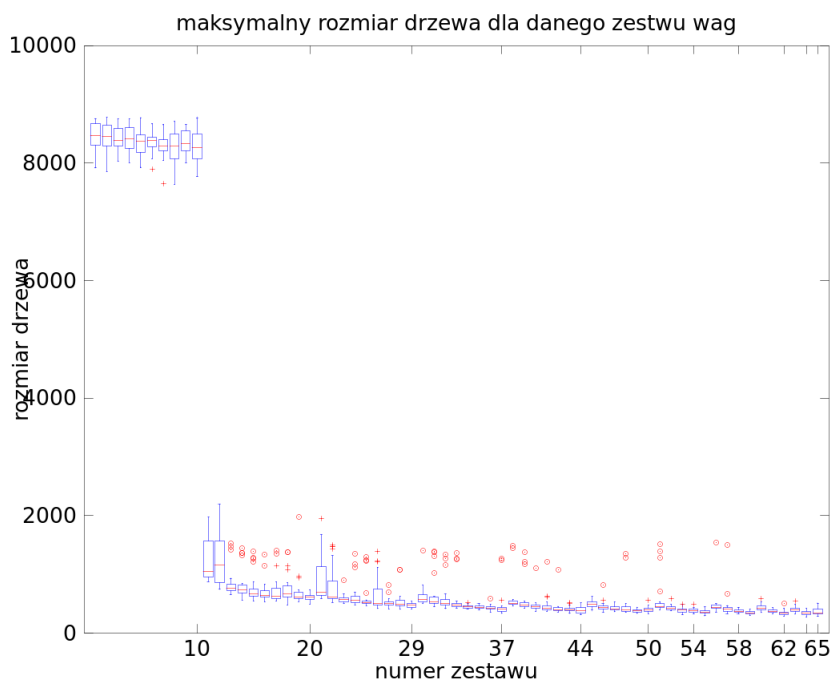
Rysunek 6.5: Czas jednego uruchomienia RRT.



Rysunek 6.6: Liczba znalezionych ścieżek prowadzących do celu.



Rysunek 6.7: Maksymalny rozmiar ścieżki prowadzącej do celu.



Rysunek 6.8: Maksymalny rozmiar drzewa znalezione przez RRT.

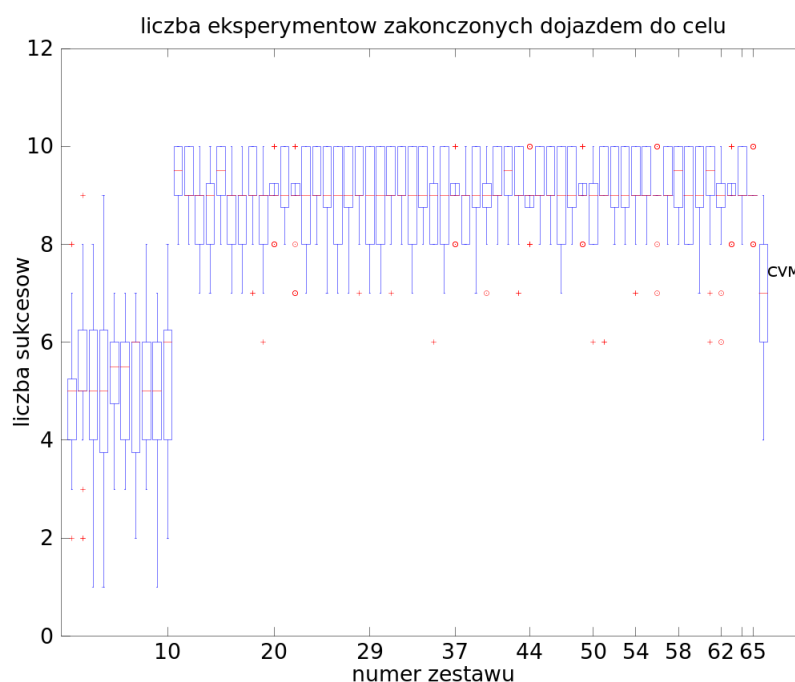
## 6.5 Wyniki eksperymentów w środowisku dynamicznym

Rezultaty otrzymane podczas testów z ruchomymi przeszkodami zostały zaprezentowane poniżej. Na rysunku 6.9 ostatnia waga, o numerze 66 odpowiada najlepszemu wynikowi dla algorytmu CVM. Można zauważyć, że liczba sukcesów dla wag poniżej numeru 11 jest wyższa niż w przypadku eksperymentów statycznych. Jest to spowodowane tym, że po pewnym czasie piłka staje się bezpośrednio osiągalna i algorytm unikania kolizji nie jest konieczny. Podobnie jak w przypadku eksperymentów statycznych czas obliczeń w tym przypadku jest wysoki rzędu  $320[ms]$ , a czas dojazdu przekracza  $6[s]$ . Najlepsze wyniki pod względem liczby sukcesów otrzymano dla następujących wag:

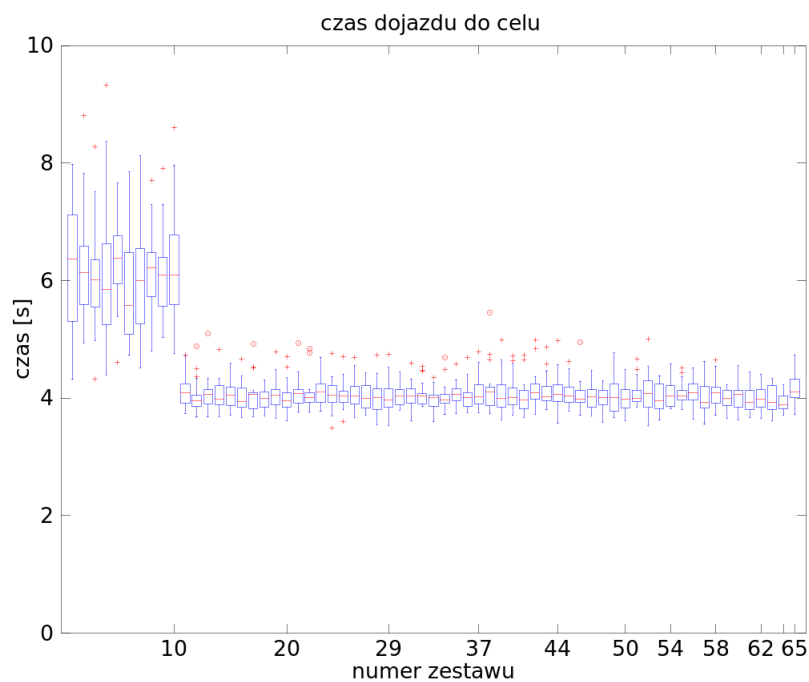
- $goalProb = 0.1$ ,  $wayPointProb = 0$
- $goalProb = 0.1$ ,  $wayPointProb = 0.4$
- $goalProb = 0.4$ ,  $wayPointProb = 0.4$

- $goalProb = 0.7$ ,  $wayPointProb = 0.3$
- $goalProb = 0.7$ ,  $wayPointProb = 0.3$

Drugi kwartył przyjmuje wtedy wartość w okolicach 9.5, co oznacza, że ponad połowa eksperymentów zakończyła się 9 lub 10 razy sukcesem. Dla porównania w przypadku algorytmu CVM kwartył rzędu drugiego ma wartość 8. Ustawienie parametru  $pgoal$  na wartość większą niż 0 powoduje znaczący wzrost liczby sukcesów. Ponadto w takiej sytuacji algorytm choć raz w każdym powtorzeniu eksperymentu wyznacza ścieżkę do celu. Nie można tutaj zaobserwować znaczącego spadku czasu obliczeń wraz ze wzrostem  $wayPointProb$ . Spowodowane jest to faktem, że piłka w większości przypadków po pewnym czasie stawała się bezpośrednio widoczna i algorytm nie musiałbyć uruchamiany.



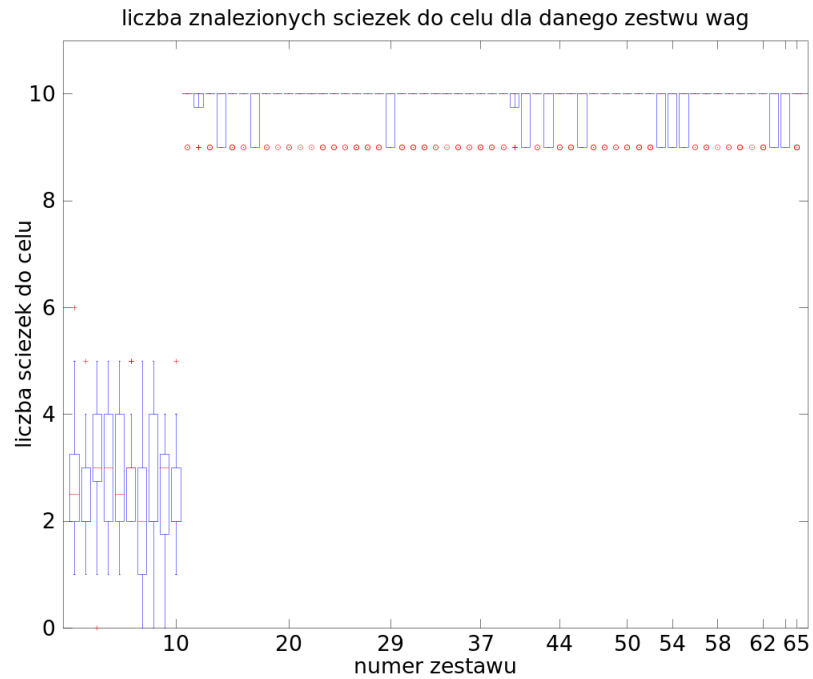
Rysunek 6.9: Liczba eksperymentów zakończonych sukcesem.



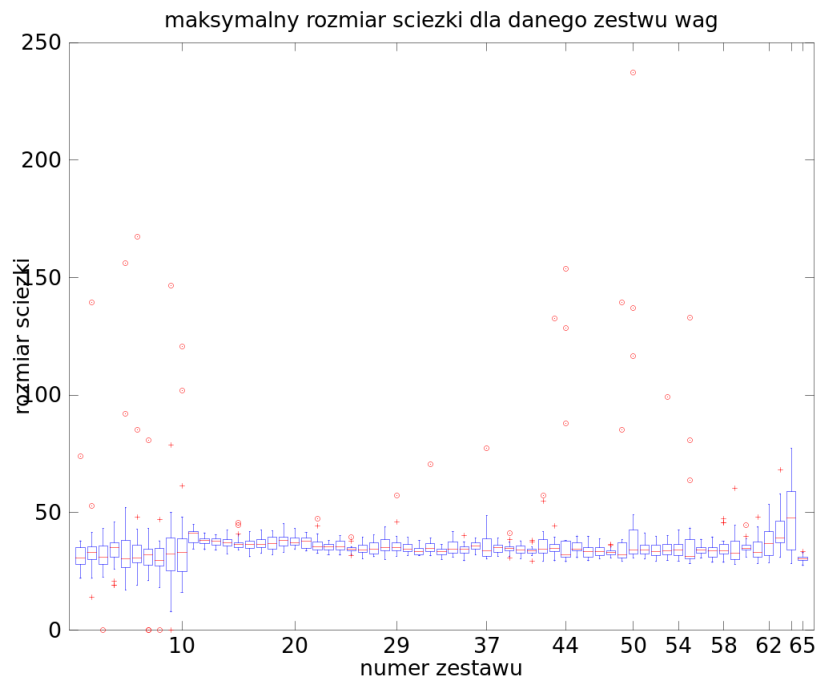
Rysunek 6.10: Czas dojazdu do celu.



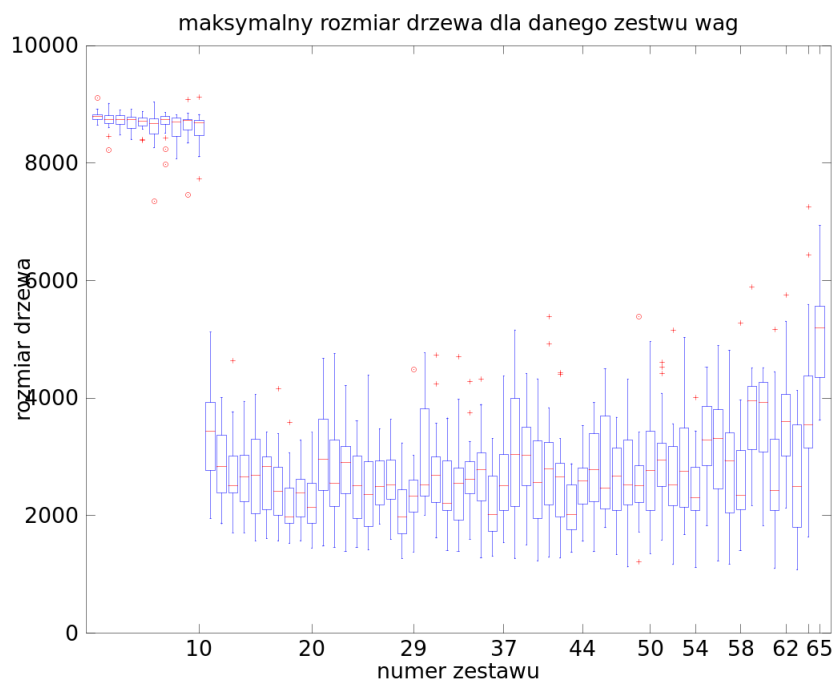
Rysunek 6.11: Czas jednego uruchomienia RRT.



Rysunek 6.12: Liczba znalezionych ścieżek prowadzących do celu.



Rysunek 6.13: Maksymalny rozmiar ścieżki prowadzącej do celu.



Rysunek 6.14: Maksymalny rozmiar drzewa znalezione przez RRT.

## 6.6 Komentarz do wyników

Z otrzymanych rezultatów w łatwy sposób wynika, że algorytm RRT lepiej radzi sobie z testowymi środowiskami niż CVM. Sytuacja jest bardziej widoczna w przypadku sytuacji z dynamicznymi przeszkodami. Krótki czas obliczeń, oraz lepsze wykorzystanie zdolności omnikierunkowej bazy jezdnej potwierdzają słuszność zmiany algorytmu nawigacji z CVM na RRT.



## Rozdział 7

# Realizacja złożonych funkcji przez robota

Problem sterowania i koordynacji działań w obrębie drużyny robotów grających w piłkę nożną nie jest zadaniem trywialnym. Po pierwsze środowisko, w którym znajdują się roboty jest silnie dynamiczne. Po drugie drużyna przeciwna, nie działa w sposób losowy, co więcej jej plan gry może szybko ulegać zmianie. Zatem analizowanie jej poczynąń powinno odbywać się praktycznie w czasie rzeczywistym. Przed takim algorytmem stawiane są następujące oczekiwania:

- koordynacja działań w obrębie drużyny powinna zakładać osiągnięcie długofalowych celów (oddanie strzału na bramkę, a w efekcie zwycięstwo),
- reagowanie w czasie rzeczywistym (*on-line*) na zachowania drużyny przeciwnej,
- budowa modelu dynamicznego świata na podstawie niepewnej informacji z czujników,
- modułowa architektura, umożliwiająca łatwą konfigurację i adaptację do bieżącej sytuacji.

Przed przystąpieniem do prac nad aplikacją sterującą drużyną robotów dokonano przeglądu stosowanych przez uczestników mistrzostw rozwiązań. Okazało się, że wstępnie opracowana architektura jest zbieżna z już istniejącym modelem nazwanym STP – Skill Tactics Play szerzej opisanym w publikacji STP: Skills, tactics and plays for multi-robot control in adversarial environments [11] stworzonym przez grupę naukowców z Carnegie Mellon University. Rozwiązanie to było

z powodzeniem stosowane przez drużynę **CMD Dragons** w kilku mistrzostwach RoboCup. Architektura STP rozwiązuje problem koordynacji i planowania działań w obrębie drużyny. Głównym jej założeniem jest generowanie planów na trzech poziomach:

1. **Play**, czyli strategia działań dla całej drużyny, przydzielająca robotom wykonywanie kolejnych **Tactics**,
2. **Tactic**, zawierający plan zachowań pojedynczego zawodnika, zapisany w formie maszyny stanów **SSM** (**s**kill **s**tate **m**achine),
3. **Skills**, obejmujący sterowanie robotem zmierzające do wykonania pojedynczej akcji (podążanie do wyznaczonego punktu, przechwycenie piłki etc.).

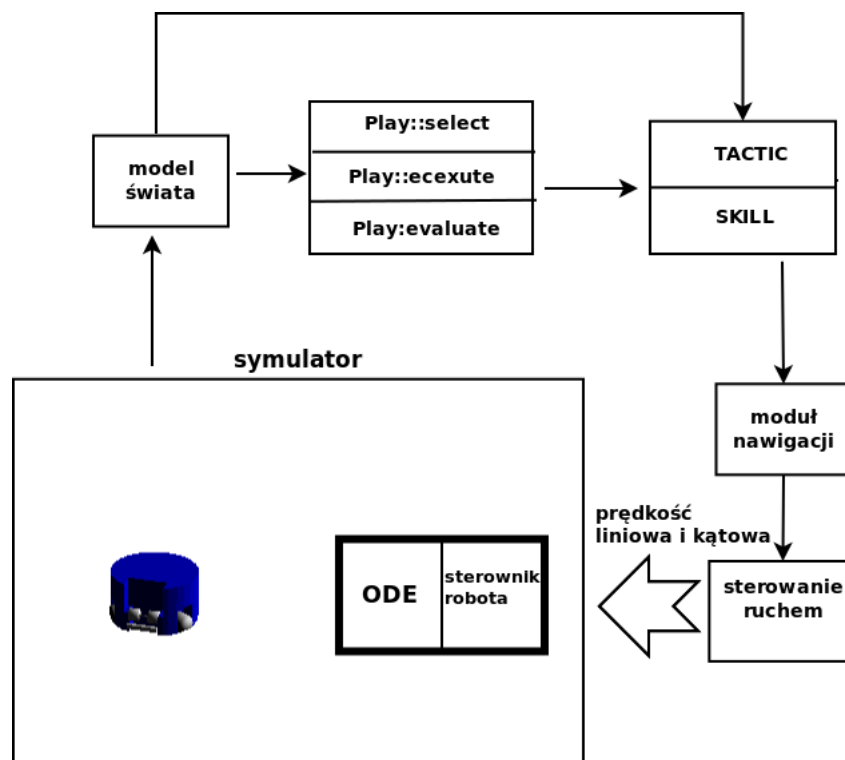
## 7.1 Opis algorytmu sterującego zawodnikiem

Nazwa STP odnosi się bezpośrednio do podejścia rozwiązującego problem planowania działań zawodników w obrębie drużyny. Jak już wspomniano w poprzednim paragrafie, podejście zakłada planowanie zachowań zawodników na kilku poziomach. Hierarchia ma za zadanie ułatwić przepływ danych, adaptację do poczynąń przeciwnika, parametryzowanie poszczególnych działań oraz zapewnić koordynację. Realizacja architektury wymaga jednak istnienia następujących modułów nie związanych bezpośrednio z samym STP:

1. zawierającego informacje o świecie,
2. umożliwiającego ocenę sytuacji na planszy (wyznaczającego atrakcyjności zachowań, punktów docelowych etc.),
3. planowania; moduł ten powinien być odpowiedzialny za koordynację działań drużyny (tutaj właściwie realizowane jest STP),
4. nawigacji robota mobilnego; moduł ten powinien być odpowiedzialny za tworzenie bezkolizyjnej ścieżki prowadzącej do zadanego celu,
5. sterowania ruchem robota; moduł ten powinien wyznaczyć optymalne prędkości prowadzące do zadanego punktu oraz rozwiązywać takie problemy jak: bezwładność robota, skończone przyspieszenie, poślizg kół,

6. sterowania warstwą fizyczną robota, odpowiedzialny za zadawanie prędkości liniowej i kątowej, uruchamianie urządzenia do prowadzenia piłki –*dribblera*, kopnięcie piłki.

Wszystkie warstwy algorytmu oraz przepływ informacji zostały zobrazowane na rysunku 7.1. W niniejszej pracy moduł nawigacji został zrealizowany w oparciu o opisany w paragrafie 5.3 algorytm RRT. Rozszerzono go jednak o nową funkcjonalność. W momencie wystąpienia kolizji, sterowanie nad robotem przejmuje algorytm operujący na funkcji nawigacji opisanej na stronie 42. Samo sterowanie ruchem robota polega na obliczaniu trapezoidalnego rozkładu prędkości opisanego w 4.2, natomiast kontrolę nad warstwą fizyczną robota sprawuje zaimplementowany w ramach pracy magisterskiej i omówiony w 3.3.2 sterownik modelu robota włączony do symulatora. Model świata zrealizowano w najprostszej formie, poprzez udostępnianie jedynie informacji o prędkości i położeniu wszystkich elementów na boisku w bieżącym momencie.



Rysunek 7.1: Architektura aplikacji sterującej drużyną.

Zasada działania podejścia STP została zaprezentowana na listingu poniżej:

---

**Algorytm 7.1** Główna pętla planowania STP

---

```

pobierz dane z czujników
zaktualizuj model świata
na podstawie aktualnej sytuacji na planszy wyznacz bieżącą strategię P
for numer robota  $i = 1 \rightarrow N$  do
     $(T_i, Tparams_i) \leftarrow \text{WyznaczTaktykę}(P, i)$ 
     $(SSM_i, Sparams_i) \leftarrow \text{WykonajTaktykę}(T_i, TParams_i)$ 
    if  $T_i$  jest nową taktyką then
         $S_i \leftarrow SSM_i(0)$ 
    wykonaj kolejne zadanie z automatu  $SSM_i$  i przejdź do kolejnego stanu  $S'$ 
    wyznacz sterowanie dla robota
    wyślij odpowiednią komendę do robota

```

---

### 7.1.1 Omówienie warstwy Play

Poziomem najwyżej w hierarchii jest **Play**. Przez to pojęcie rozumiany jest plan gry dla całej drużyny, uwzględniona jest tutaj koordynacja poczynañ pomiędzy zawodnikami. Plan zakłada przydział roli dla każdego zawodnika. Rola do jakiej został przypisany zawodnik określa sekwencję taktyk, które ma on wykonywać. W obrębie danego planu zawodnik wykonuje swoją rolę, aż do momentu zakończenia danego planu lub wyznaczenia kolejnego. Zawodnicy mogą być przypisywani do ról w sposób dynamiczny, bądź statyczny (jak ma to miejsce w przypadku bramkarza). Na tym poziomie określone są parametry używane przy realizacji poszczególnych taktyk. Dodatkowo, każdy poziom poniżej **Play** może określać nowe parametry wykorzystywane przy wykonywaniu zadań na niższym poziomie. Wykonywanie każdego planu **Play** wymaga spełnienia określonych predykatów, np. czy mamy rozpoczęcie gry z autu, czy wystąpił rzut różny. Poniżej zamieszczony został przykładowy plan atakujący dla drużyny zaczerpnięty z oryginalnej publikacji:

Listing 7.1: Przykładowy plan atakujący

```
1  APPLICABLE: offense
2  DONE: aborted, !offense
3
4  ROLE1
5    shoot A
6    none
7  ROLE2
8    defend point {-1400 250} 0 700
9    none
10 ROLE3
11    defend lane {B 0 -200} {B 1175 -200}
12    none
13 ROLE4
14    defend point {-1400 -250} 0 1400
15    none
```

Na listingu wyszczególnione są warunki konieczne do realizacji danego planu, oraz warunki powodujące jego zakończenie. W tym przypadku są to proste wyrażenia, mogą one przybierać bardziej złożone formy logiczne. Same predykaty mogą także być bardziej wyrafinowane, na przykład czy piłka znajduje się na aucie, czy drużynie przydzielono rzut różny etc. Plan jest przewidziany dla czterech ról. Zawodnik, do którego przydzielona jest rola pierwsza, ma za zadanie oddać strzał. Natomiast pozostali zawodnicy mają zadanie bronić punktu lub obszaru. Każda rola składa się w tym przypadku tylko z jednej taktyki.

### 7.1.2 Omówienie warstwy Tactics

Przez *Tactics* rozumiana jest pojedyncza sekwencja działań w obrębie jednej roli. Można rozumieć to jako plan działań na szczeblu robota prowadzący do osiągnięcia pożądanego w danej sytuacji efektu. Przykładem może być strzał na bramkę. Robot dostaje polecenie oddania strzału na bramkę, zatem plan jego poczynąń ma doprowadzić do sytuacji, w której osiągnie pozycję umożliwiającą strzał na bramkę z zadaniem powodzeniem. W oryginalnej wersji algorytmu zbiór taktyk podzielony został na aktywne (wymagające posiadania piłki) oraz nie wymagające kontaktu z piłką. W danym momencie rozgrywki tylko jeden robot może wykonywać aktywną taktykę. W momencie zakończenia przez zawodnika wykonywania taktyki aktyw-

nej, wszystkim robotom przydzielone są do wykonania nowe taktyki, wynikające z sekwencji określonej w wykonywanej roli. W sytuacji szczególnej, czyli gdy rola zawiera tylko jedną taktykę, jest ona wykonywana od początku. Jak już wspomniano wcześniej taktyka zapisana jest w postaci maszyny stanów **SSM** (**s**kill **s**tate **m**achine). Wykonując daną taktykę robotowi zlecane jest wykonanie kolejnych zachowań. Mogą być one stosowane w różnych taktykach, jednak ich wykonanie może przynosić odmienne efekty. Przykładem może być oddanie strzału w przypadku podania i przy próbie zdobycia gola. Plan na szczeblu pojedynczego robota (sekwencja taktyk) jest wykonywany do momentu zmiany planu gry całej drużyny. Przykładowe taktyki robotów mogą być następujące:

- strzał na bramkę,
- podanie piłki,
- odebranie podania,
- blokowanie innego robota,
- wyjście na pozycję,
- bronienie pozycji,
- dryblowanie z piłką.

### 7.1.3 Realizacja Skills

Pojęcie **Skills** odnosi się do konkretnych umiejętności robota. Każdy **skill** traktowany jest jako osobne zachowanie. Rozróżnić można następujące, podstawowe umiejętności robota:

- doprowadzenie piłki do celu,
- przemieszczenie robota do celu,
- podążanie za innym robotem,
- obrót z piłką,
- oddanie strzału.

Z pojedynczych zachowań budowana jest wspomniana wcześniej maszyna stanów, tworząca taktykę. Na tym szczeblu zachowanie robota zmieniane jest w każdym kroku gry. Z każdego zadania, w każdym momencie określone musi być przejście do nowego zadania. Możliwe jest także kontynuowanie tego samego zadania, lub ponowne jego wykonanie. Przykładowo jeśli zlecimy robotowi przemieszczenie do celu z piłką i piłka odskoczy robotowi, to powinien do niej podejść i ponownie prowadzić lub jeśli nastąpi dobra okazja do strzału wykorzystać ją. Realizacja pojedynczego zadania składa się z trzech etapów:

- pobrania informacji z modelu świata,
- przetworzenia stanu na planszy i utworzenia polecenia dla sterownika robota,
- wyznaczenia kolejnego zachowania do realizacji.

Przejście do kolejnego zachowania jest uwarunkowane parametrami narzuconymi przez aktualnie wykonywaną taktykę. Poniżej zamieszczono przykładowe zachowanie zaczerpnięte z publikacji [11].

---

**Algorytm 7.2** Zadanie dojechania z piłką do celu, źródło [11]

---

```
if  $SSM_i = \text{MoveBall}$  AND ball_on_front AND can_kick AND shot_is_good then
    Transition(Kick)
if ball_on_front AND ball_is_visible) then
    Transition(GoToBALL)
command generation
calculate target
navigate to target
```

---

#### 7.1.4 Opis zrealizowanej wersji algorytmu

W ramach niniejszej pracy w pełni zrealizowano dwie warstwy z oryginalnej publikacji. Największy nacisk położono na realizację prostych zachowań. Stworzona aplikacja udostępnia następujące zachowania:

- poruszanie z piłką do celu,
- przejęcie piłki,
- obrót z piłką,
- oddanie strzału,
- poruszanie do wyznaczonego celu,
- odjechanie od przeszkód na zadaną odległość w danym kierunku,
- zatrzymanie robota.

Poruszanie z piłką sprowadza się do wyznaczenia przez algorytm RRT ścieżki do celu i podążanie do kolejnych punktów znajdujących się na ścieżce. Aby robot nie stracił piłki, jego prędkość obrotowa jest wyznaczana w sposób opisany w 4.3. W sytuacji, gdy wyznaczony punkt na ścieżce znajduje się za robotem, wykonuje on najpierw obrót w miejscu, tak aby nie stracić piłki.

Poruszanie się do celu jest realizowane przez czysty algorytm RRT. Jeśli przy wykonaniu tego zachowania zezwalamy robotowi na przejęcie piłki i znajduje się on najbliżej niej, to zmieniamy zachowanie na przejęcie piłki.

Przejęcie piłki zostało natomiast zaprezentowane na listingu poniżej:

---

**Algorytm 7.3** Zachowanie mające na celu przejęcie piłki

---

```
if  $SSM_i = \text{GetBall}$  AND ball.is.free then
    Transition(GoToBall)
if distace_to_ball < THRESHOLD then
    Transition(GetBall)
command generation
calculate target
navigate to target
```

---

Samo przejęcie piłki polega na osiągnięciu odpowiedniej orientacji na boisku oraz zbliżeniu się na wystarczająco bliską odległość od piłki. Zachowanie polegające na oddaniu strzału opisano na kolejnym listingu.



---

**Algorytm 7.4** Oddanie strzału

---

```
if  $SSM_i = \text{KickBall}$  AND ball_is_free then
  Transition(GoToBall)
if shoot_evaluation > THRESHOLD then
  Transition(KickBall)
if shoot_evaluation < THRESHOLD then
  Transition(Rotate)
command generation
calculate target
navigate to target
```

---

Odjechanie od przeszkody, jak już wcześniej wspomniano, zaimplementowano z użyciem funkcji nawigacji.

Zaimplementowane taktyki zostały zamieszczone w tabeli 7.1.

Tabela 7.1: Zaimplementowane taktyki.

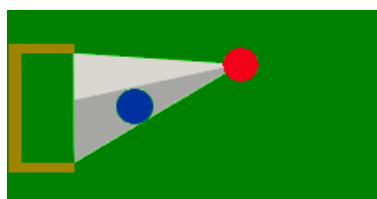
Taktyki aktywne	Taktyki nie wymagające udziału piłki
strzał na bramkę	jazda do zadanego punktu
wykonanie podania	wyjście na pozycję do podania
dryblowanie z piłką na bramkę	odebranie podania

Stworzono także prostą warstwę **Play**, składającą się jedynie z planów służących wykonaniu zaplanowanych testów. Jeden z planów przydziela każdemu z robotów taktykę realizującą podążanie do zadanego punktu i przejęcie piłki jeśli jest to możliwe. Drugi plan przydziela jednemu z zawodników taktykę wykonania podania, a drugiemu wyjście na pozycję, odebranie podania i oddanie strzału na bramkę. Opracowany w ramach pracy moduł oceny sytuacji na planszy pozwala na:

- stwierdzenie czy robot jest w posiadaniu piłki,
- pobranie informacji o stanie piłki (aut, gol, piłka w posiadaniu zawodnika własnej drużyny lub przeciwnej, piłka jest wolna),
- ocenę atrakcyjności danej pozycji pod względem oddania strzału na bramkę lub podania,

- wyznaczenie najbardziej atrakcyjnej pozycji w danym regionie do oddania strzału.

Sposób oceniania pozycji pod kątem strzału został przedstawiony na rysunku 7.3. Początkowo wyznaczany jest maksymalny kąt do strzału na bramkę, a następnie uwzględniane są ograniczenia wynikające z robotów stojących przed bramką. Jako ocena wybierana jest miara największego wolnego kąta w kierunku bramki.



Rysunek 7.2: Wyznaczanie atrakcyjności pod kątem strzału.

## 7.2 Testy warstw tactics oraz skills

Kolejnym etapem jakim poddano aplikację było przetestowanie zaimplementowanej częściowo architektury STP. Eksperymenty wzorowano na rzeczywistych, przez jakie musi przejść każda zgłoszona do rozgrywek drużyna. Przed przystąpieniem do turnieju głównego, rozgrywane są eliminacje sprawdzające poziom uczestników. Jako zadania testowe postanowiono wybrać niektóre, rzeczywiste zadania eliminacyjne, przez jakie musiały przejść drużyny w ostatnich latach. Więcej informacji na temat eliminacji można znaleźć na stronie projektu [1].

## 7.3 Nawigacja w dynamicznym środowisku

Pierwsze zadanie pochodzi z eliminacji do mistrzostw w 2011 roku. Celem próby jest sprawdzenie zdolności robotów do bezpiecznego poruszania się w dynamicznym środowisku. Poniżej zamieszczono rysunek przedstawiający środowisko testowe. Znajduje się na nim sześć robotów pełniących role przeszkód. Dwa spośród nich są nieruchome, a pozostałe cztery poruszają się wzdłuż zaznaczonej kolorem żółtym linii prostej. Zadaniem robota jest poruszanie się pomiędzy dwoma statycznymi przeszkodami, każdorazowo mijając je od strony bramki.



Rysunek 7.3: Plan środowiska testowego.

Zasady eksperymentu są następujące:

1. Liczba startujących robotów jest ograniczona do trzech.
2. Uczestniczące roboty muszą poruszać się pomiędzy dwoma nieruchomymi przeszkodami.
3. Każdorazowo, kiedy robot dotknie przeszkody otrzymuje punkt ujemny.
4. Każdy uczestnik, który pokona z powodzeniem trasę otrzymuje punkt.
5. Robot, który wykona okrążenie z piłką otrzymuje dodatkowo 2 punkty.
6. Test trwa 2 minuty.

Ponieważ nie znaleziono informacji, jak należy zachować się w momencie, gdy robot prowadzący piłkę straci nad nią kontrolę i piłka znajdzie się na aucie, zdecydowano się na przeprowadzenie eksperymentu w dwóch wariantach. W pierwszym z nich, jeśli piłka znalazła się na aucie pozostawała tam, aż do momentu ukończenia eksperymentu. W drugim wariancie w sytuacji, gdy piłka opuściła boisko była ustawiana ponownie na środku boiska. Dla każdego z wariantów eksperyment przeprowadzono 20 razy. Wyniki zamieszczono w kolejnym paragrafie.

### 7.3.1 Wyniki testu nawigacji

Po wstępnej analizie zachowania zawodnika podczas realizacji eksperymentu, zdecydowano się na drobne modyfikacje algorytmu unikania kolizji. Zastosowana w roz-

dziale 6 prosta predykcja położenia przeszkody okazała się niewystarczająca. Dokonano modyfikacji polegającej na zapamiętywaniu prędkości przeszkody z ostatnich trzech kroków algorytmu. Dla każdego zestawu prędkości dokonywano predykcji położenia przeszkody w następnym kroku algorytmu i za 5 kroków. Dodatkowo zdecydowano się uzależnić promień przeszkody od odległości od sterowanego robota. Im przeszkoda znajdowała się dalej tym większy był promień ją opisujący. Podejście to miało na celu zmuszenie robota do wcześniejszego wykonania manewru unikania kolizji. Dodatkowo, aby zmusić robota do okrążania statycznych przeszkód wprowadzono zmieniające się w zależności od położenia robota ograniczenie na przestrzeń przeszukiwaną przez algorytm RRT.

### Rezultaty uczestników eliminacji

Poniżej zamieszczone zostały wyniki zadania, jakie zdobyły drużyny startujące w mistrzostwach, można je znaleźć pod adresem <http://small-size.informatik.uni-bremen.de/robocup2011:schedule>. Niestety, nie znaleziono bardziej szczegółowych informacji, dotyczących na przykład średniego czasu przejazdu okrążenia, bądź liczby robotów biorących udział w zadaniu.

Tabela 7.2: Wyniki zadania otrzymane przez uczestników RoboCup w 2011 roku.

Nazwa drużyny	wynik
Skuba	35
MRL	29
Thunder bots	25

## Wyniki zaimplementowanego algorytmu wariant 1

Tabela 7.3: Otrzymane wyniki w wariacie pozostawiającym piłkę poza boiskiem po wyjściu na aut.

Suma dodatnich punktów		Suma uzyskanych punktów	
minimum	18	minimum	11
1 kwartył	23	1 kwartył	17.75
mediana	26.5	mediana	23.5
3 kwartył	27	3 kwartył	24.25
maksimum	28	maksimum	25

Liczba przejazdów z piłką		Czas przejazdu[s]	
minimum	0	minimum	11.8
1 kwartył	3	1 kwartył	12.29
mediana	5	mediana	12.92
3 kwartył	5	3 kwartył	14.77
maksimum	5	maksimum	18.55

**Wyniki zaimplementowanego algorytmu wariant 2**

Tabela 7.4: Otrzymane wyniki w wariantcie ustawiającym piłkę na środku boiska po wyjściu na aut.

Suma dodatnich punktów		Suma uzyskanych punktów	
minimum	18	minimum	9
1 kwartył	24	1 kwartył	18.5
mediana	27	mediana	23
3 kwartył	27	3 kwartył	26
maksimum	27	maksimum	27

Liczba przejazdów z piłką		Czas przejazdu[s]	
minimum	2	minimum	11.59
1 kwartył	4	1 kwartył	12.42
mediana	5	mediana	12.74
3 kwartył	5	3 kwartył	13.64
maksimum	5	maksimum	18.26

**Komentarz do otrzymanych wyników**

Łatwo zauważyć, że otrzymane wyniki nie różnią się zasadniczo. W przypadku wariantu drugiego, w pesymistycznym przypadku drużyna otrzymała mniej punktów. Jest to spowodowane większą ilością kolizji robota prowadzącego piłkę. Robot ten po pierwsze porusza się z mniejszą prędkością, a po drugie ma ograniczone zdolności do manewrowania, gdyż nie może stracić piłki. W normalnej rozgrywce roboty obydwu drużyn muszą unikać kolizji. Natomiast w warunkach tego eksperymentu, dynamiczne przeszkody poruszały się na 'ślepo' z zadaną prędkością. Natomiast mediana w obu przypadkach jest porównywalna. Otrzymane wyniki okazały się nieco słabsze, niż rezultaty uczestników mistrzostw.

## 7.4 Strzelanie po podaniu

Kolejne zadanie pochodzi z 2009 roku. W zadaniu uczestniczy od 2 do 3 robotów z jednej drużyny. Ich zadaniem jest zdobycie jak największej ilości goli w przeciągu 120 sekund. Punkty przyznawane są następująco:

1. drużyna zdobywa 1 punkt w momencie gdy przed poprawnym strzałem na bramkę dwa roboty dotkną piłki (wykonane zostanie np. jedno podanie).
2. drużyna zdobywa 2 punkty gdy przed oddanym strzałem 3 roboty dotkną piłki.

Zasady eksperymentu zamieszczono poniżej:

1. Przed startem wszystkie roboty muszą być umieszczone w odległości nie przekraczającej  $1[m]$  od własnej linii bramkowej,
2. Zawodnicy drużyny przeciwnej pełnią rolę statycznych przeszkód,
3. Przy każdym starcie piłka jest umieszczana w jednym z narożników, na własnej połowie grającej drużyny,
4. Gol może być zdobyty tylko w sytuacji, gdy robot znajduje się na połowie przeciwnika,
5. Po zdobyciu bramki piłka ponownie wraca do jednego z narożników.

W celu realizacji tego zadania, zaimplementowano prosty plan gry dla dwóch robotów. Jego przebieg, z wykorzystaniem notacji zgodnej z STP zamieszczono na listingu 7.2. Jeden z robotów ma za zadanie podjechać do piłki i podać ją drugiemu zawodnikowi. Natomiast drugi z robotów powinien w tym czasie wyjść na pozycję do strzału, a następnie odebrać podanie. Po przejęciu piłki wykonywana jest przez niego taktyka `shoot`. Zakłada ona oddanie strzału na bramkę. Jeśli robot znajduje się w dogodnej pozycji do oddania strzału, próba zdobycia bramki wykonywana jest natychmiastowo. W przeciwnym przypadku robot zmuszony jest do wykonania manewrów, pozwalających mu wyjść na pozycję do strzału. Jeśli przy poruszaniu się z piłką przekroczy regulaminowy dystans  $50[cm]$  rozpoczyna dryblowanie z piłką w kierunku pozycji do oddania strzału. Dogodna pozycja do oddania strzału jest wyznaczana w sposób losowy. Z zadanego obszaru z rozkładem równomiernym losowane są punkty i oceniane pod kątem oddania strzału. Zapamiętywany jest ten

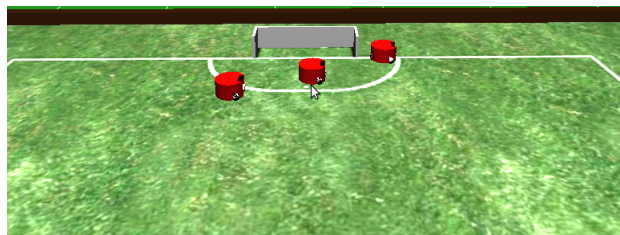
Listing 7.2: Plan gry wykorzystany w eksperymencie

```

1  APPLICABLE: offense
2  DONE: aborted, !offense
3
4  ROLE1
5    pass {ROLE2}
6    none
7  ROLE2
8    position_to_pass {red_goal_coordinates}
9    receive_pass {ROLE1}
10   shoot {red_goal_coordinates}
11   none

```

z najwyższą oceną. Na ilustracji poniżej zamieszczono rozmieszczenie przeszkód w trakcie wykonywania eksperymentu.



Rysunek 7.4: Rozmieszczenie przeszkód.

### 7.4.1 Wyniki testu

#### Rezultaty uczestników eliminacji

Tabela 7.5: Wyniki zadania otrzymane w 2009 roku. Źródło *www.robocup2009.org*

Parametr	wartość
Skuba	18
ZjNLict Z	7
B-Smart	4
CMDRagons'09	4
Plasma Z	2



## Wyniki zaimplementowanego algorytmu

Tabela 7.6: Liczba zdobytych bramek, przy użyciu zaimplementowanego algorytmu.

Nazwa parametru	<i>wynik</i>
wartość średnia	4.25
odchylenie standardowe Z	0.76
minimum	2
pierwszy kwartyl	4
drugi kwartyl	4
trzeci kwartyl	5
maksimum	5

## Komentarz do otrzymanych wyników

Nawet przy wykorzystaniu dwóch robotów w eksperymencie udało się zbliżyć do wyniku plasującego na trzecim miejscu. Niestety z braku czasu nie zaimplementowano roli dla trzeciego robota co mogłoby znacznie zwiększyć wynik drużyny (zdobyte bramki liczyłyby się podwójnie). Obserwując przebieg eksperymentów zauważono, że najwięcej czasu robot spędzał na przechwytywaniu piłki. Poprawienie tego elementu także mogłoby zwiększyć otrzymany wynik.

## Rozdział 8

## Podsumowanie

# Dodatek A

## Zawartość płyty CD

Dołączona do pracy płyta CD zawiera następujące elementy:

- pliki źródłowe symulatora *Gazebo* wraz z naniesionymi poprawkami opisanymi w par. 3.3.2 – folder `gazebo`,
- modele elementów środowiska *RoboCup* do symulatora *Gazebo* – folder `modele`,
- kod źródłowy aplikacji sterującej robotem (projekt w środowisku Eclipse<sup>1</sup> dla C++) wraz z dokumentacją – folder `aplikacja_sterujaca`,
- filmy oraz zrzuty ekranu prezentujące wykonane modele oraz działanie aplikacji sterującej – folder `media`,
- plik `praca_magisterska.pdf` – wersja elektroniczna niniejszego dokumentu.

---

<sup>1</sup>Środowisko jest dostępne pod adresem [www.eclipse.org](http://www.eclipse.org).

## Dodatek B

# Instrukcja instalacji Gazebo

Instrukcję instalacji można znaleźć w poradniku dostępnym pod adresem <http://playerstage.sourceforge.net/doc/Gazebo-manual-svn-html/install.html>.

W razie problemów można skorzystać także z opisu dostępnego pod adresem <http://www.irobotics.org/gazebo08.f8.html>. Do instalacji należy użyć wersji *Gazebo* dostępnej na płycie CD dołączonej do pracy (jest to wersja 6782 dostępna poprzez repozytorium SVN, zawiera jednak poprawki opisane w par. 3.3.2). Do poprawnej pracy *Gazebo* wymagana jest obecność dodatkowych aplikacji. Najważniejsze z nich wykorzystano w niniejszej pracy w następujących wersjach:

- Player (wymagany do kompilacji Gazebo) – pobrany z repozytorium SVN w wersji 6350,
- ODE pobrane z oficjalnego repozytorium SVN, wersja 1451,
- OGRE w wersji 1.4.7,
- pozostałe wymagane aplikacje zostały zainstalowane w wersjach zgodnych z opisem w podręczniku instalacji.

poprawic

opis

in-

sta-

lacji

ga-

zebo

zmienic

nu-

me-

ry

rewi-

zji

za-

sto-

so-

wa-

nych

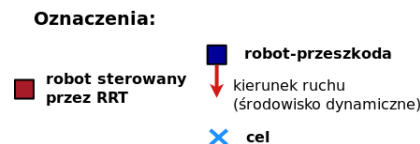
apli-

kacji

# Dodatek C

## Szczegóły eksperymentów

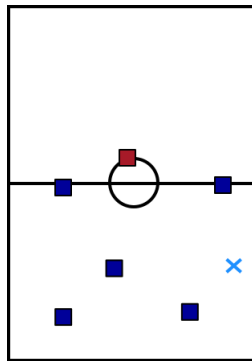
Dodatek zawiera poglądowe rysunki przedstawiające środowiska testowe, na których przeprowadzane były eksperymenty. Na każdym z nich zaznaczono inne roboty nie podlegające sterowaniu przez testowany algorytm oraz początkowe położenie i orientację sterowanego robota. W przypadku eksperymentów w środowisku dynamicznym zaznaczono także kierunek i zwrot prędkości z jaką poruszały się przeszkody. Poniżej zamieszczono legendę objaśniającą znaczenie użytych symboli.



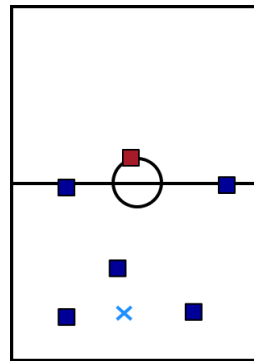
W drugiej części dodatku zamieszczono tabelę z zastosowanymi podczas eksperymentów z użyciem algorytmu *CVM* zestawami wag. Ponieważ każda ze składowych funkcji celu (5.8) algorytmu zwraca wartość z przedziału  $[0; 1]$  zdecydowano się na przetestowanie takich trójek liczb z tego przedziału, które sumują się do jedności.

## Środowiska testowe

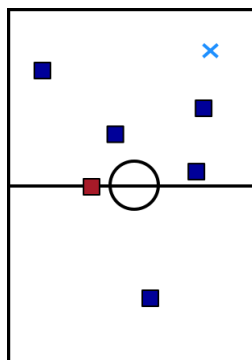
statyczne:



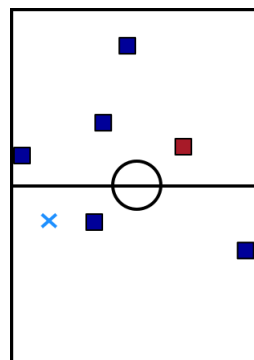
(a)



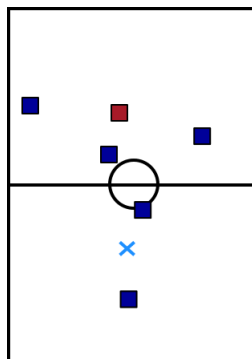
(b)



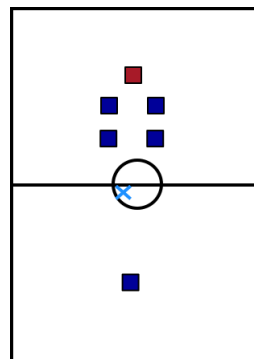
(c)



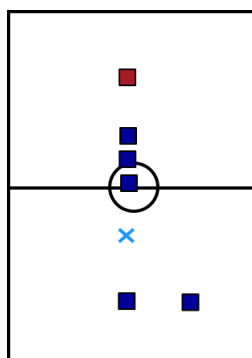
(d)



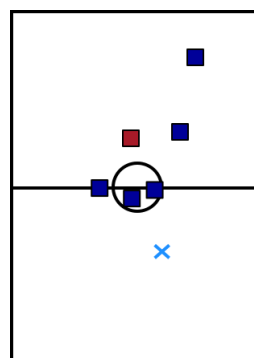
(e)



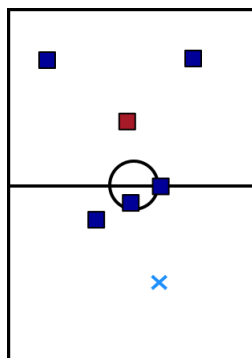
(f)



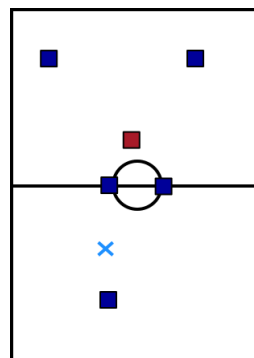
(g)



(h)

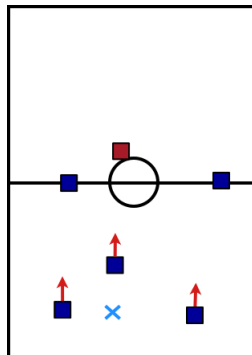


(i)

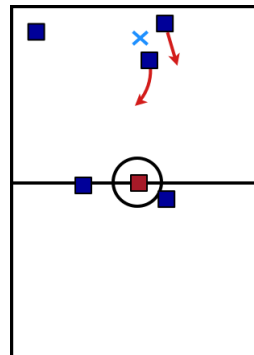


(j)

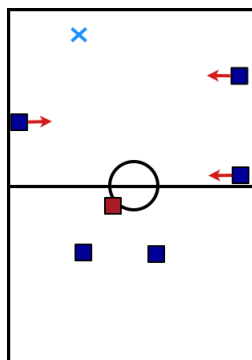
**dynamiczne:**



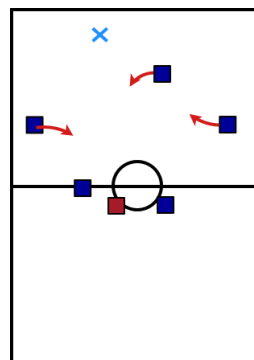
(k)



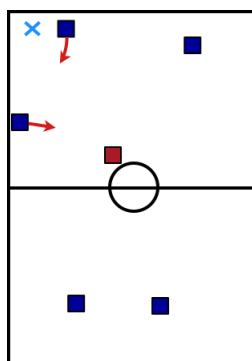
(l)



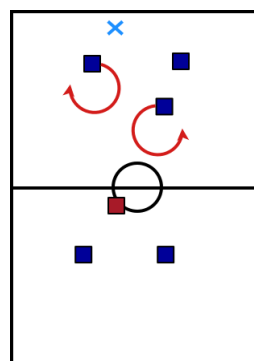
(m)



(n)

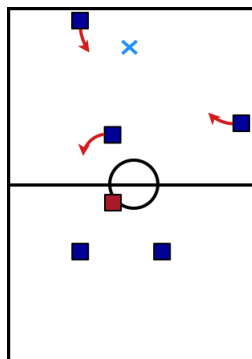


(o)

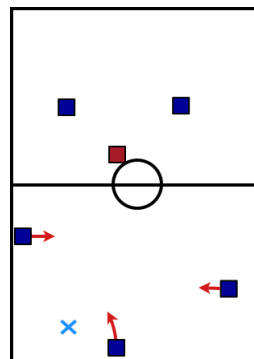


(p)

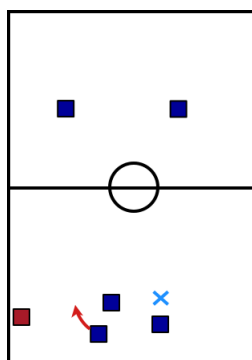




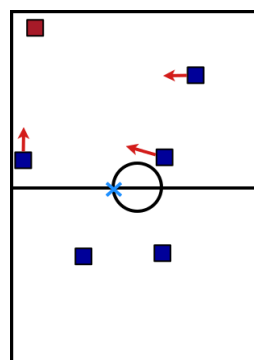
(q)



(r)



(s)



(t)

## Zestawy wag używane w eksperymentach

Zestaw wag	<i>goalProb</i>	<i>wayPointProb</i>
1	0.0	0.1
2	0.0	0.2
3	0.0	0.3
4	0.0	0.4
5	0.0	0.5
6	0.0	0.6
7	0.0	0.7
8	0.0	0.8
9	0.0	0.9
10	0.0	1.0
11	0.1	0.0
12	0.1	0.1
13	0.1	0.2
14	0.1	0.3
15	0.1	0.4
16	0.1	0.5
17	0.1	0.6
18	0.1	0.7
19	0.1	0.8
20	0.1	0.9
21	0.2	0.0
22	0.2	0.1
23	0.2	0.2
24	0.2	0.3
25	0.2	0.4
26	0.2	0.5
27	0.2	0.6
28	0.2	0.7
29	0.2	0.8
30	0.3	0.0
31	0.3	0.1
32	0.3	0.2
33	0.3	0.3

Zestaw wag	<i>goalProb</i>	<i>wayPointProb</i>
34	0.3	0.4
35	0.3	0.5
36	0.3	0.6
37	0.3	0.7
38	0.4	0.0
39	0.4	0.1
40	0.4	0.2
41	0.4	0.3
42	0.4	0.4
43	0.4	0.5
44	0.4	0.6
45	0.5	0.0
46	0.5	0.1
47	0.5	0.2
48	0.5	0.3
49	0.5	0.4
50	0.5	0.5
51	0.6	0.0
52	0.6	0.1
53	0.6	0.2
54	0.6	0.3
55	0.6	0.4
56	0.7	0.0
57	0.7	0.1
58	0.7	0.2
59	0.7	0.3
60	0.8	0.0
61	0.8	0.1
62	0.8	0.2
63	0.9	0.0
64	0.9	0.1
65	1.0	0.0

# Bibliografia

- [1] Oficjalna strona Ligi *RoboCup* dostępna pod adresem:  
[www.robocup.org](http://www.robocup.org)
- [2] J. Bruce, M. Veloso: *Real-Time Randomized Path Planning for Robot Navigation*. Carnegie Mellon University, 2002.
- [3] J.Kim J.M. Esposito, V. Kumar: *An RRT-Based algorithm for testing and validating multi-robot controllers*. University of Pennsylvania, US Naval Academy, 2005.
- [4] I. Duleba: *Metody i algorytmy planowania ruchu robotów mobilnych i manipulacyjnych*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001.
- [5] T. Quasn, L.Pyeatt, J.Moore: *Curvature-Velocity Method for Differentially Steered Robots*. AI Robotics Lab Computer Science Department, Texas Tech University, 2003.
- [6] R. Simmons: *The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance*. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.
- [7] M. Majchrowski: *Algorytm unikania kolizji przez robota mobilnego bazujący na przeszukiwaniu przestrzeni prędkości*. Praca Magisterska, Politechnika Warszawska, 2006.
- [8] J. Borenstein, Y. Koren: *The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1991.
- [9] J. Borenstein, Y. Koren: *Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance*. Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, The University of Michigan, 1991.

- [10] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun: *The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance*. Department of Computer Science, University of Bonn; Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1991.
- [11] B.Browning, J.Bruce, M.Bowling, M.Veloso: *STP: Skills, tactics and plays for multi-robot control in adversarial environments*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh. 2004.
- [12] R.Rojas, A.Gloye Föörster: *Holonomic Control of a robot with an omnidirectional drive*. Freie Universität Berlin, 2006.
- [13] Marcelo H. Ang Jr., Ir. M. Steinbuch: *Design of an omnidirectional universal mobile platform*. Eindhoven University of Technology, 2005.
- [14] X. Li, M.Wang, A.Zell: *Dribbling control of omnidirectional soccer robots*. In Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07).
- [15] M.Gąbka, K.Muszyński Praca dyplomowa inżynierska *Środowisko symulacyjne i algorytm unikania kolizji robota mobilnego grającego w piłkę nożną*. Politechnika Warszawska, 2008.
- [16] J.Bruce, M.Bowling, B.Browning, M.Veloso: *Multi-Robot Team Response to a Multi-Robot Opponent Team*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2002.
- [17] J.Bruce, M.Veloso: *Real-time multi-robot motion planning with safe dynamics*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2006.
- [18] D. E. Koditschek, and E.Rimon: *Robot navigation functions on manifolds with boundary*. Advances in Applied Mathematics Volume 11 Issue 4, Dec. 1990.
- [19] D. E. Koditschek, and E.Rimon: *Exact robot navigation using artificial potential functions*. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 8, no. 5, pp. 501-518. Oct. 1992
- [20] C. Zieliński, W. Szyrkiewicz: *Konspekt do wykładu: Inteligentne Systemy robotyczne*. Politechnika Warszawska, 2008.
- [21] N. Koenig: *Gazebo. The Instant Expert's Guide*. Player Summer School on Cognitive Robotics, Monachium 2007.

- [22] M.Hamada *Układ sterowania autonomicznym robotem mobilnym*. Praca magisterska, Politechnika Warszawska, 2007.

## Todo list

poprawic opis instalacji gazebo . . . . .	92
zmienic numery rewizji zastosowanych aplikacji . . . . .	92