

Piotr Fiertek

Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki,  
Katedra Systemów Automatyki  
ul. Gdańska 4/86  
84-230 Rumia  
pfiertek@hegam.com.pl

## **Planowanie trasy robota mobilnego w obecności poruszających się przeszkód za pomocą metody sztucznego potencjału oraz optymalizacja uzyskanej trajektorii**

### **Streszczenie**

Ze względu na swą prostotę i elegancję metoda sztucznego potencjału jest szeroko stosowana do planowania trasy robotów mobilnych oraz w algorytmach unikania kolizji z stacjonarnymi lub poruszającymi się przeszkodami. Tym niemniej duża część badań skupia się na rozwiązywaniu problemu planowania ruchu w środowisku stacjonarnym, w którym przeszkody nie zmieniają swojego położenia. Niniejsza praca proponuje odmienne podejście do planowania trajektorii. Przeszkodę reprezentuje wirtualny obiekt, którego położenie jest związane z jej przyszłym przewidywanym położeniem. Następnie proponowany jest algorytm uproszczenia, uzyskanej za pomocą metody sztucznego potencjału, trajektorii, tak aby końcowa trasa była krótsza i posiadała mniej zakrętów.

### **1. Wstęp**

Metoda sztucznego potencjału jest zwykle używana do planowania trajektorii autonomicznych robotów mobilnych jak również do uniknięcia kolizji z przeszkodami w przypadku pracy manipulatorów (J.R. Andrews i N. Hogan, 1983). Zastosowano ją również do utrzymania samochodu osobowego na swoim pasie ruchu (Eric J. Rossetter, 2003). Podstawową koncepcją metody sztucznego potencjału jest opisanie przestrzeni roboczej robota za pomocą sztucznej funkcji potencjału w której robot jest przyciągany do punktu docelowego i odpychany od przeszkód (Andrews i Hogan, 1983; Khatib, 1985; Latombe, 1991). Suma wszystkich sił wypadkowych determinuje kolejny kierunek i prędkość poruszania się. Jednym z powodów popularności tej metody jest jej prostota i elegancja. Metoda sztucznego potencjału ma wiele słabych punktów (Y. Koren, J. Borenstein, 1991) niemniej nieustannie trwają prace w celu ich wyeliminowania (Liu Chengqing, Marcelo H. Ang Jr, Hariharan Krishnan, Lim Ser Yong, 2000).

Większość z wcześniejszych studiów używa metody sztucznego potencjału do uporania się z planowaniem trajektorii robota mobilnego w środowisku stacjonarnym gdzie zarówno punkt docelowy jaki i przeszkody nie zmieniają swojego położenia. W wielu rzeczywistych implementacjach otoczenie jednak się zmienia. Jednym z podejść rozwiązania tego problemu jest dołączenie czasu jako jednego z wymiarów modelu opisującego otoczenie (Fujimura i Samet, 1989; Shih i Lee, 1990; Conn i Kam, 1998). Zgodnie z tym, problem planowania trajektorii w środowisku dynamicznym jest redukowany do planowania trajektorii w środowisku stacjonarnym. Poważnym ograniczeniem tego podejścia jest założenie

znajomości apriori trajektorii poruszających się przeszkód, które są często nieznane w przypadku prawdziwych aplikacji. Odmiennie podejście do rozwiązania tego problemu jest proponowane przez Ko i Lee (1996), Hussien (1989) oraz Ge i Cui (2002), którzy rozszerzyli metodę sztucznego potencjału w ten sposób, że przy wyznaczaniu wirtualnych sił oddziałujących na robota uwzględnia się informacje dotyczące względnych prędkości pomiędzy robotem a przeszkodami. Dodatkowo Ge i Cui uwzględnili zmieniające się w czasie położenie docelowe robota.

Przedstawiona w tej pracy metoda omijania poruszających się obiektów zakłada znajomość przyszłej trajektorii poruszających się obiektów. Została ona stworzona do wyznaczania trajektorii zawodników w rozgrywkach piłki nożnej rozgrywanej przez małe roboty mobilne (FIRA, RoboCup). W takich warunkach przeszkodami które trzeba omijać są pozostałe roboty. W szczególnych przypadkach przeszkodą może być również piłka. W przypadku zawodników własnej drużyny znajomość ich przyszłej trajektorii dostępna jest apriori natomiast przyszłe położenie piłki może być w prosty sposób wyznaczone na podstawie praw fizyki. Położenie zawodników drużyny przeciwnej rozpatrywane jest w tym przypadku w krótszym horyzoncie czasowym. Przedstawiony w tej pracy algorytm ma charakter ogólny i może być rozpatrywany w oderwaniu od rozgrywek robotów. Przedstawione rozwiązania zostały przetestowane na symulatorze stworzonym przez autora niniejszego artykułu.

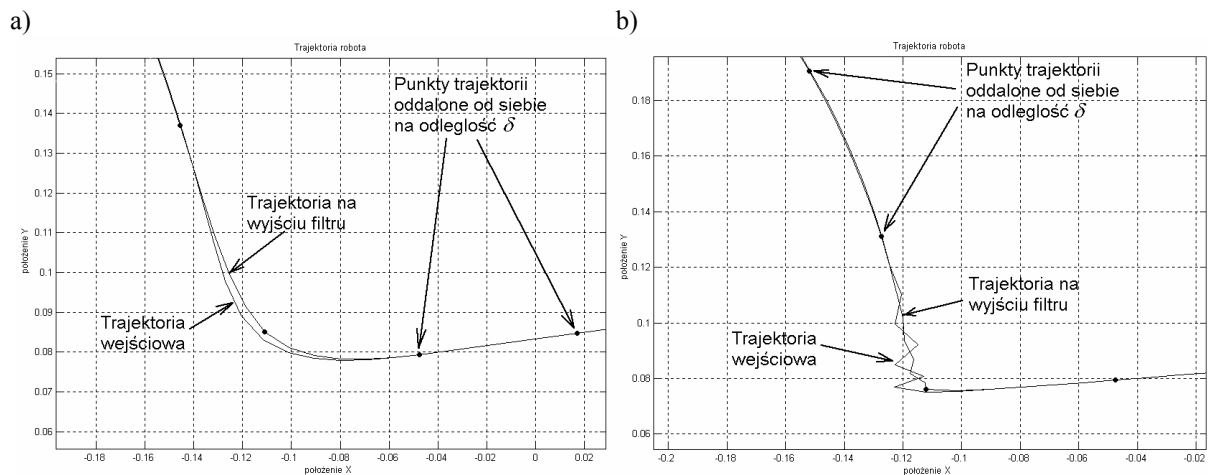
Prezentowane rozwiązanie pozwala uzyskać takie zachowanie się robotów jak bezkolizyjne mijanie się czy jechanie jeden za drugim w przypadku gdy oba roboty podążają w tym samym kierunku. Przedstawiona metoda ze względu na związek z metodą sztucznego potencjału nie radzi sobie najlepiej z problemem minimum lokalnego. Ponieważ jednak w środowisku takim jak boisko do gry w piłkę sytuacja zmienia się nieustannie, utknięcie robota w minimum lokalnym nie jest problemem krytycznym. W rozdziale drugim przedstawiony jest krótki opis metody sztucznego potencjału opisanych jest kilka prostych metod poprawiających jakość uzyskiwanej tą metodą trajektorii. W rozdziale trzecim przedstawiłem proponowany przeze mnie sposób uwzględnienia przyszłego położenia przeszkód w planowaniu trasy robota. Rozdział czwarty dotyczy optymalizacji wyznaczonej wstępnie trajektorii.

## 2. Wyznaczanie trajektorii robota dla przypadku stacjonarnego

Przyjąłem, że trajektoria jest zdefiniowana w postaci zbioru punktów w których ma się znaleźć robot w odpowiednim czasie. Aby uprościć zadanie, założyłem stałą różnicę czasu pomiędzy kolejnymi punktami. W momencie gdy robot będzie poruszał się szybciej, odstęp pomiędzy punktami trajektorii będą większe. Gdy zwolni, punkty trajektorii się zagęszczą.

Zakładając że robot porusza się ze stałą prędkością  $v_z$  oraz różnicę czasu pomiędzy kolejnymi punktami trajektorii wynoszącą  $\Delta T$  możemy przyjąć stałą odległość pomiędzy nimi wynoszącą w przybliżeniu  $\delta = \Delta T \cdot v_z$ .

Wyznaczanie trajektorii w metodzie sztucznego potencjału polega na wyznaczeniu wypadkowego wektora siły działającego na robota w danym punkcie. Następnie podążamy w kierunku wskazywanym przez ten wektor. Po wykonaniu kroku (przemieszczeniu się) wyznaczamy siłę wypadkową w nowym punkcie itd. Działając w ten sposób będziemy przemieszczać się zgodnie ze spadkiem gradientu pola potencjału. Ponieważ długość  $\delta$  pojedynczego kroku trajektorii jest zbyt duża aby wykorzystać ją do przemieszczania się, ustalamy długość kroku roboczego równego  $0,2\delta$ . W celu wyrównania trajektorii, uzyskane punkty podaję na wejście filtra. Do właściwej trajektorii wprowadzamy dopiero punkt oddalony o odległość  $\delta$  od ostatnio przyjętego punktu (rysunek 1).



Rysunek 1. Efekt zastosowania filtru trajektorii a) zniekształcenie trajektorii spowodowane bezwładnością filtru; b) zmniejszenie 'drgan' trajektorii.

Aby zapobiec zatrzymaniu się przez dłuższy czas algorytmu w punkcie równowagi nietrwałej do każdego punktu trajektorii roboczej dodaję składnik losowy o rozkładzie normalnym, zerowej średniej i wariancji wynoszącej  $0,025 \cdot d$ , gdzie  $d$  jest długością kroku roboczego. W momencie gdy trajektoria znajdzie się w punkcie równowagi nietrwałej, dodatkowy składnik wytrąca algorytm z tego punktu, pomagając opuścić ten obszar.

### 3. Uwzględnienie przyszłego położenia robotów w planowanej trajektorii

W poprzednim punkcie opisany został sposób wyznaczenia trajektorii, w której kolejnym jej punktom możemy przypisać przesunięcie w czasie o stałą wartość. Gdybyśmy potrafili wyznaczyć lub aproksymować taką trajektorię dla każdego obiektu znajdującego się w otoczeniu robota, moglibyśmy wykorzystać dodatkową informację, o przemieszczaniu się obiektu w czasie, do planowania trajektorii. Niezbędną do tego celu trajektorię możemy uzyskać w następujący sposób:

1. W przypadku robotów naszej drużyny, trajektoria ta jest dla nas dostępna bezpośrednio.
2. W przypadku robotów przeciwnej drużyny, obserwujemy zachowanie się robota i na jego podstawie budujemy model jego działania. Modelem może być np. sieć neuronowa, drzewo decyzyjne lub w najprostszym przypadku funkcja wielomianowa.
3. W przypadku piłki, ruch obiektu można opisać za pomocą praw fizyki i na tej podstawie znając jej aktualny stan przewidzieć jej przyszłe położenie.

Uzyskana przyszła trajektoria robota przeciwnika nie jest zbyt dokładna i obejmuje jedynie krótki horyzont czasowy. Należy ostrożnie dobierać wykorzystywany zakres czasowy. Zbyt krótki spowoduje, że rezygnujemy z korzyści wynikającej z możliwości uwzględnienia przyszłego położenia przeciwnika. Zbyt długi, przyczyni się do błędnych przewidywań, a to z kolei może spowodować błędne decyzje podczas wyznaczania trajektorii robota.

Niezależnie od tego z którym z wyżej wymienionych przypadków mamy do czynienia, ostatecznie otrzymujemy trajektorie w postaci punktów na płaszczyźnie, jednakowo odległych od siebie na osi czasu. Następnym krokiem jest wyznaczenie punktu w trajektorii przeszkody, który najlepiej reprezentuje przyszłe położenie przeszkody z punktu widzenia rozpatrywanego robota. Najbardziej rozsądnym wydaje się wybór punktu najszybszego spotkania. Tzn. punktu w którym nasz robot spotkałby się z przeszkodą w najkrótszym czasie (Tak jak byśmy chcieli się zderzyć z przeszkodą). Za tym wyborem przemawiają następujące argumenty:

1. Nie ma sensu rozpatrywać położenia przeszkód pojawiających się bliżej na osi czasu niż punkt najszybszego spotkania. Nawet jeśli robot chciałby się spotkać z przeszkodą w tym punkcie, nie zrobiłby tego, gdyż nie zdążyłby do niego dojechać.
2. Wiarygodność informacji dotyczących przyszłego położenia przeszkody szybko maleje wraz z poruszaniem się do przodu na osi czasu. W związku z czym przyjęcie przyszłego punktu trajektorii przeszkody, leżącego za punktem najszybszego spotkania na osi czasu, wydaje się nieuzasadnione.
3. Kolejnym argumentem przemawiającym za wyborem punktu najszybszego spotkania jest prostota i szybkość algorytmu wyznaczającego taki punkt.

Może się również zdarzyć, że nie da się znaleźć punktu spotkania robota z przeszkodą lub jest on poza przyjętym horyzontem czasowym. Np. przeszkoda oddala się od robota. W takich sytuacjach najlepiej do dalszych rozważań przyjąć ostatnie położenie w przewidywanej przyszłej trajektorii przeszkody.

Po wykonaniu tych operacji dla wszystkich obiektów w otoczeniu robota, uzyskamy zestaw położenia przeszkód, reprezentujący ich przyszłe położenie. Dalej postępujemy tak jak w tradycyjnej metodzie sztucznego potencjału, traktując je jak przeszkody stacjonarne.

W szybko zmieniającym się środowisku lepiej wyznaczać trasę robota na podstawie przyszlých niedokładnych pozycji przeszkód, niż aktualnych, choć dokładnych. Dokładność oszacowania przyszłego położenia przeszkody jest tym większa im nasz robot znajduje się bliżej przeszkody i im prędkość przeszkody jest mniejsza. Z każdą przeszkodą związany jest obszar oddziaływania, który uwzględnia wielkość przeszkody, rozmiar naszego robota i promień bezpieczeństwa. Stąd mały błąd w ustaleniu położenia przeszkody, jak i nieznaczne wtargnięcie w jej obszar oddziaływania nie muszą wiązać się z poważnymi konsekwencjami np. w postaci zderzenia dwóch robotów.

Ponieważ przeszkody mogą się poruszać, kształt pola oddziaływania przeszkody powinien uwzględniać kierunek i wartość jej prędkości. W tym celu możemy wydłużyć obszar oddziaływania przeszkody w kierunku jej ruchu. Wydłużenie to powinno być proporcjonalne do prędkości przeszkody. Jeżeli przeszkoda się nie porusza, wydłużenie obszaru oddziaływania przeszkody powinno wynosić zero. Modyfikacja obszaru wpływu poruszającej się przeszkody zapobiega wyznaczaniu przyszłej trajektorii robota, zmierzającej wprost przed rozpadziony obiekt.

Aby uzyskać wymagane wydłużenie obszaru oddziaływania przeszkody, w najprostszym wypadku wystarczy stworzyć wirtualną przeszkodę, której położenie i wielkość związane są z poruszającym się rzeczywistym obiektem.

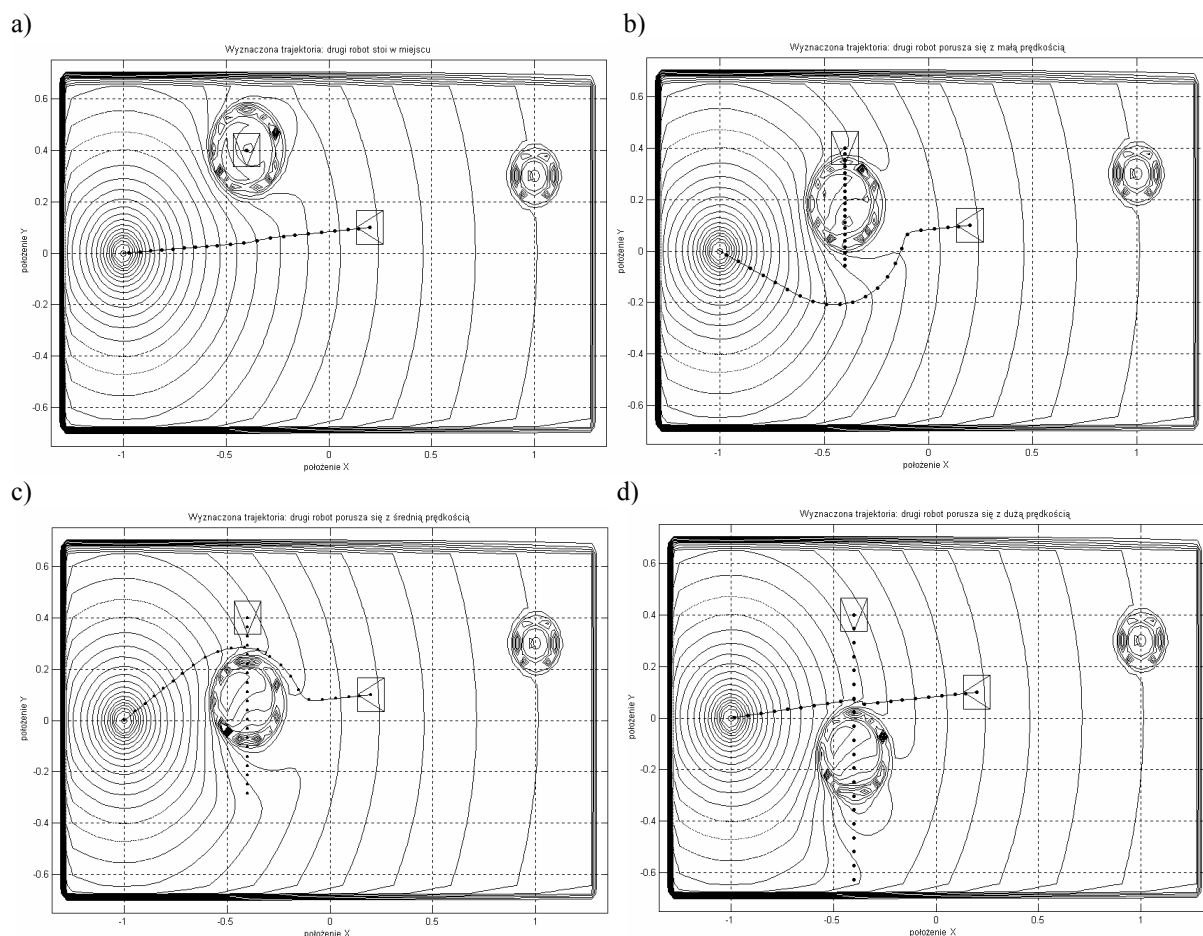
Aby ustawić dodatkową przeszkodę w odpowiednim miejscu (uwzględnienie kierunku i prędkości poruszania się) możemy posłużyć się przewidywaną przyszlą trajektorią rozpatrywanego obiektu. Kolejne punkty trajektorii wyznaczone są dla kolejnych punktów czasu. Wystarczy odczytać z trajektorii przyszłe położenie obiektu na kilka kroków w przód i w tym miejscu ustawić dodatkową przeszkodę. W momencie gdy robot porusza się z małą prędkością, odstęp między punktami trajektorii są mniejsze, tak więc i odległość przeszkody od obiektu będzie mniejsza. W przypadku dużej prędkości obiektu, sytuacja będzie odwrotna.

W celu przedstawienia działania opisanej metody, rozpatrzmy następujący przykład: Ustalmy położenie początkowe naszego robota w punkcie  $(0,2; 0,1)$ . Punkt docelowy ma współrzędne  $(-0,1; 0,0)$ . Robot przeciwnika znajduje się w punkcie  $(-0,4; 0,4)$  i porusza się w dół z prędkością  $v_R$  (tzn.  $V_R(x)=0; V_R(y)=-v_R$ ). Piłka znajduje się w pozycji  $(1,0; 0,3)$ . Przy takim ustawieniu nie ma ona żadnego wpływu na wyznaczoną trajektorię robota.

Na początek założmy, że robot przeciwnika stoi w miejscu  $v_R=0$  (rysunek 2a). W tym przypadku, przyszłe położenie przeciwnika pokrywa się z jego punktem startowym, który będziemy uwzględniać podczas wyznaczania trajektorii naszego robota. Położenie dodatkowej przeszkody, wprowadzonej w celu uwzględnienia prędkości robota, również



pokryje się z jego punktem startowym. W tym przypadku, algorytm zmodyfikowanej metody sztucznego potencjału niczym nie różni się od klasycznej metody, odnoszącej się do środowiska stacjonarnego. Wyznaczona trasa, biegnie prosto od punktu startowego do punktu docelowego.



Rysunek 2. Wyznaczona trajektoria robota w przypadku gdy robot przeciwnika porusza się z różną prędkością.

W momencie, gdy robot przeciwnika będzie poruszał się z małą prędkością, jego przyszłe położenie musi być uwzględnione aby nie doszło do kolizji pomiędzy obydwooma robotami (rysunek 2b). W tym przypadku robot przeciwnika porusza się z prędkością  $v_R=0,4v_Z$  gdzie  $v_Z$  jest nominalną prędkością robota. Kolejne punkty wychodzące od robota przeciwnika, są jego położeniem w kolejnych odstępach czasu  $\Delta t$ . Na rysunku 2b widzimy, że trajektoria ta jest dużo gęstsza (mniejszy odstęp pomiędzy kolejnymi punktami) od zaplanowanej trajektorii dla naszego robota. Nasz robot porusza się ponad dwa razy szybciej niż robot przeciwnika. Dla takiej konfiguracji położenia i prędkości robotów, został wybrany dziesiąty element trajektorii drugiego robota, jako przyszły możliwy punkt spotkania się robotów. Dodatkowy punkt przeszkody, związany z prędkością poruszającego się robota, został przyjęty w punkcie odpowiadającym trzynastemu punktowi jego planowanej trasy.

Uwzględnienie przyszłego położenia robota przeciwnika powoduje, że utworzona na bazie metody sztucznego potencjału trajektoria nie kieruje się prosto ku punktowi docelowemu, lecz stara się ominąć przyszłe położenie przeszkody. Ponieważ drugi robot porusza się stosunkowo wolno, korzystniejsza jest jazda przed nim, niż zatrzymanie się i czekanie aż nas minie. Ważną rzeczą na którą należy zwrócić uwagę, jest odległość w jakiej trajektoria omija poruszający się obiekt (por. rysunek 2b i rysunek 2c). Na rysunku 2b



planowana trajektoria dużym łukiem omija robota z jego przodu, natomiast na rysunku 2c drugi robot omijany jest z tyłu w dużo mniejszej odległości. Jest to między innymi wynikiem zastosowania dodatkowej przeszkody, wymuszającej zwiększenie zakresu oddziaływania poruszającego się robota w kierunku jego ruchu. Po wyminięciu hipotetycznego położenia robota, trajektoria kieruje się prosto ku punktowi docelowemu.

W przypadku gdy prędkość drugiego robota jest bardzo duża, zdąży on dojechać na tyle daleko, że jego przyszłe położenie nie spowoduje wprowadzenia zmian w planowanej trajektorii (rysunek 2d).

Do tej pory, robot będący przeszkodą poruszał się prostopadłe do planowanej przez nas trasy i problem polegał na inteligentnym ominięciu go. Można sobie również wyobrazić sytuację w której przeszkadzający robot będzie nadjeżdżał z kierunku punktu docelowego, lub jechał przed nami w tę samą stronę. Zastosowanie opisanej wcześniej metody uwzględnienia przyszłego położenia robota, w pierwszym przypadku spowoduje zaplanowanie mijania w połowie drogi między zbliżającymi się robotami. W drugim przypadku, podążanie za robotem, gdyż ze względu na to że robot się od nas oddala, dla algorytmu wyznaczającego trajektorię, będzie on znajdował się daleko od naszego robota.

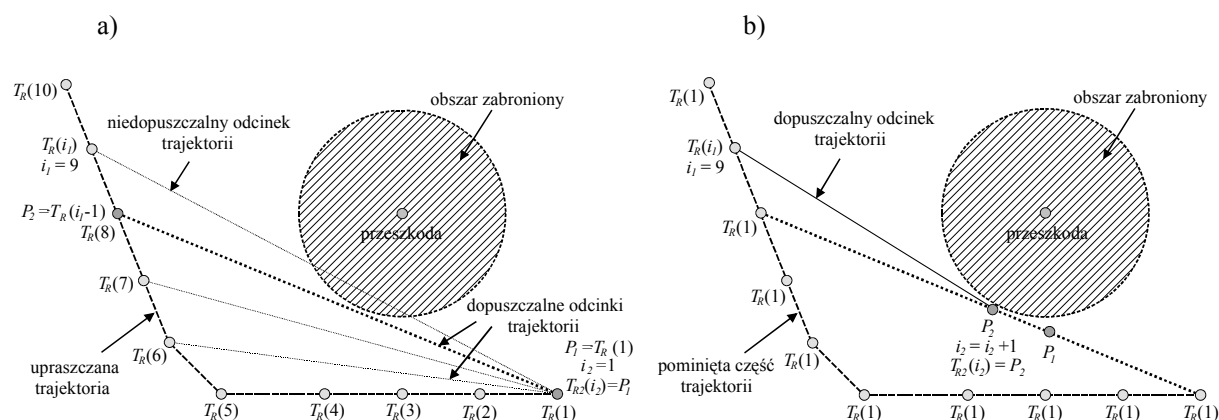
#### 4. Optymalizacja wyznaczonej trajektorii

Trajektoria wyznaczona za pomocą metody sztucznego potencjału zazwyczaj nie jest optymalna i może być uproszczona. Uproszczenie trajektorii daje nam następujące korzyści:

1. Zmniejszenie długości trasy
2. Zmniejszenie liczby zakrętów jakie musi wykonać robot
3. Skrócenie czasu przejazdu robota związanego z dwoma poprzednimi punktami

Aby uzyskać krótszą trajektorię końcową, musimy wyjść z ram narzuconych nam przez punkty wcześniej zaplanowanej trasy, i poszukać jej realizacji poza nią. Oczywiście zaplanowana już droga powinna stanowić punkt odniesienia przy dalszej optymalizacji trajektorii.

Załóżmy, że mamy trajektorię omijającą przeszkodę (rysunek 3).  $T_R(\cdot)$  są jej kolejnymi punktami. Dodatkowo wprowadzamy punkty pomocnicze  $P_1$  i  $P_2$ . Na początku pracy algorytmu, położenie punktu  $P_1$  pokrywa się z położeniem pierwszego punktu trajektorii (aktualne położenie robota). Zmienne  $i_1$  i  $i_2$  oznaczają odpowiednio indeksy punktów w trajektorii pierwotnej i zmodyfikowanej. Nowo tworzona trajektoria zaczyna się od punktu startowego wcześniejszej trasy.



Rysunek 3. Przedstawienie pierwszej i drugiej fazy drugiego algorytmu upraszczania trajektorii.

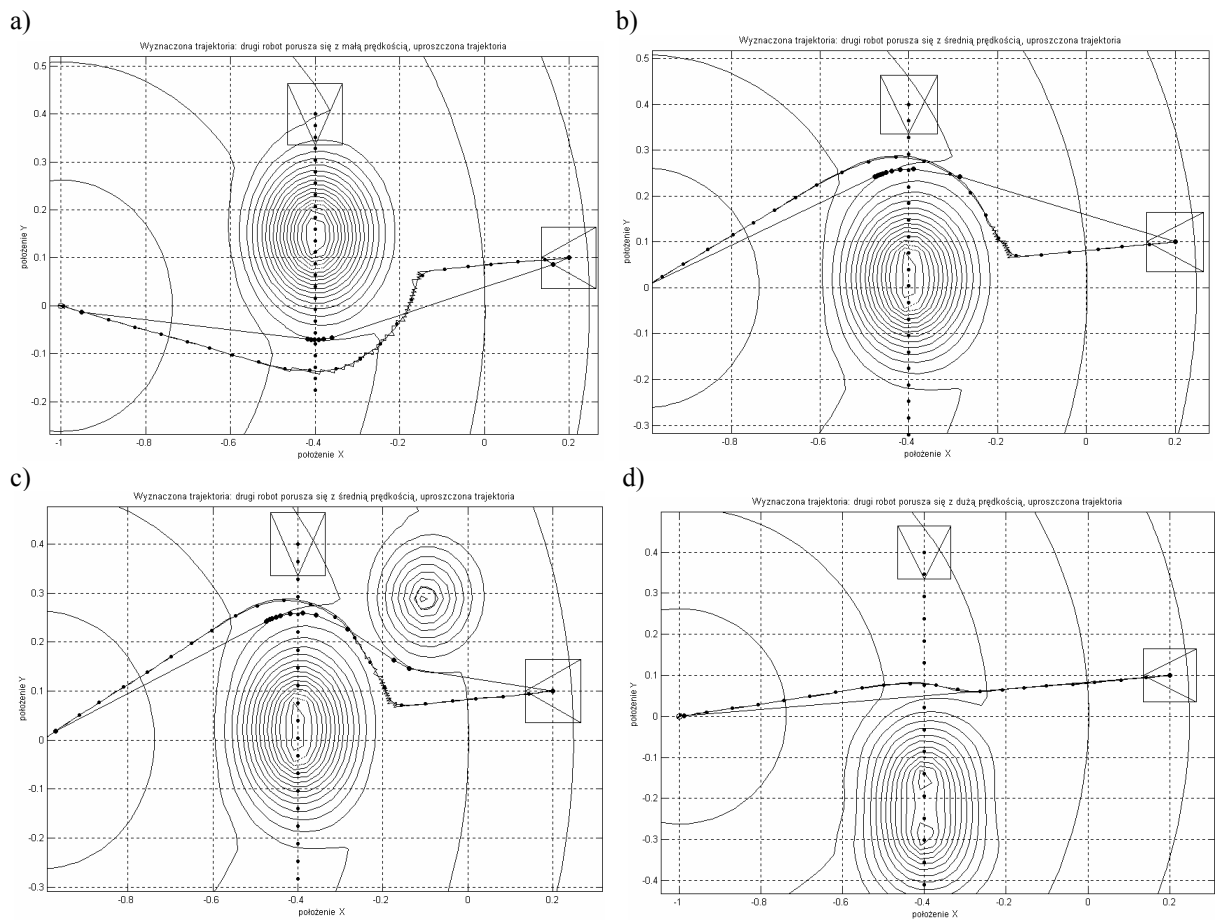
Algorytm składa się z dwóch na przemian powtarzanych faz. W fazie pierwszej znajdujemy punkt  $P_2$  (rysunek 3a), który jest najbardziej oddalonym, z punktu widzenia kolejności, punktem pierwotnej trajektorii dla którego odcinek łączący punkty  $P_1$  i  $P_2$  jest jeszcze odcinkiem dozwolonym. Przez odcinek dozwolony rozumiem odcinek nie przecinający obszaru zabronionego żadnej z przeszkód (rysunek 5). Wyznaczenie tego punktu nie jest zbyt trudne i sprowadza się do wybierania kolejnych punktów trajektorii wejściowej, a następnie testowaniu odcinków łączących te punkty z punktem  $P_1$ . Na początku pracy algorytmu, gdy punktem  $P_1$  jest punkt startowy, poszukiwania zaczynamy od punktu drugiego trajektorii. W dalszej części, poszukiwania prowadzimy posuwając się zawsze ku końcowi pierwotnej trajektorii. Zmienna  $i_1$  wskazująca aktualną pozycję w pierwotnej trajektorii. W momencie gdy  $i_1$  będzie równe liczbie wszystkich punktów (dojdziemy do końca planowanej trasy), algorytm zakończy swe działanie. Powiązanie punktu  $P_2$  z punktami wcześniejszej trajektorii, powoduje że staje się ona odniesieniem dla nowo tworzonej.

Po znalezieniu odpowiedniego punktu  $P_2$ , przechodzimy do fazy drugiej w której zajmujemy się odcinkiem powstałym z połączenia punktu  $P_1$  i  $P_2$  (rysunek 3b). Szukamy takiego punktu, który leżąc na odcinku  $P_1-P_2$ , znajduje się jak najbliżej punktu  $P_1$  i jednocześnie tworzy z punktem  $T_R(i_1)$  odcinek dopuszczalny. Punkt  $T_R(i)$  jest punktem pierwotnej trajektorii, leżącym bezpośrednio za punktem  $P_2$  wyznaczonym w poprzedniej fazie pracy algorytmu. Proponowany przeze mnie pomysł opiera się na podziale odcinka na pół. Tzn. wybieramy punkt leżący na środku odcinka  $P_1-P_2$  i sprawdzamy czy odcinek łączący ten punkt z punktem  $T_R(i)$  jest odcinkiem dozwolonym. Jeśli tak, to za  $P_2$  podstawiamy współrzędne tego punktu. W przeciwnym wypadku zamieniony zostanie punkt  $P_1$ . Operację tę powtarzamy wielokrotnie. W ten sposób, z każdym krokiem, długość odcinka  $P_1-P_2$  zmniejsza się o połowę, przy czym szukany punkt wciąż znajduje się w jego wnętrzu. Po wykonaniu wcześniej zaplanowanej liczby kroków i zwiększeniu licznika  $i_2$  o jeden, jako nowy punkt tworzonej trajektorii  $T_{R2}(i_2)$  wybieramy punkt  $P_2$ . Aby rozpocząć następny cykl pracy algorytmu od nowo znalezionej punktu, za  $P_1$  podstawiamy  $P_2$  i przechodzimy do fazy pierwszej. Dokładność wyznaczenia położenia szukanego w drugiej fazie punktu, zależy od przyjętej liczby kroków podziału odcinka  $P_1-P_2$ . Każde sprawdzenie poprawności odcinka zajmuje trochę czasu, dlatego zależy nam na tym aby liczba podziałów odcinka  $P_1-P_2$  była jak najmniejsza. Dla naszych celów wystarczy, by końcowa długość odcinka nie była większa od połowy długości odcinka łączącego kolejne punkty trajektorii.

Algorytm ten posiada bardzo ważną cechę, możliwość zakończenia swej pracy w dowolnym momencie bez utraty uzyskanych już wyników. Wystarczy bezpośrednio połączyć punkt  $P_1$  z punktem  $T_R(i_1)$ . Z punktu widzenia sterowania, najważniejszych jest kilka pierwszych punktów trajektorii, gdyż sytuacja na boisku zmienia się dość szybko a wraz z nią planowane trajektorie. Oznacza to, że dalsze punkty będą już nieaktualne, zanim robot zdoła do nich dojechać. W przypadku gdy planowana trajektoria jest dość długa, a czasu w danym cyklu sterowania pozostało niewiele, taka cecha algorytmu może być bardzo przydatna.

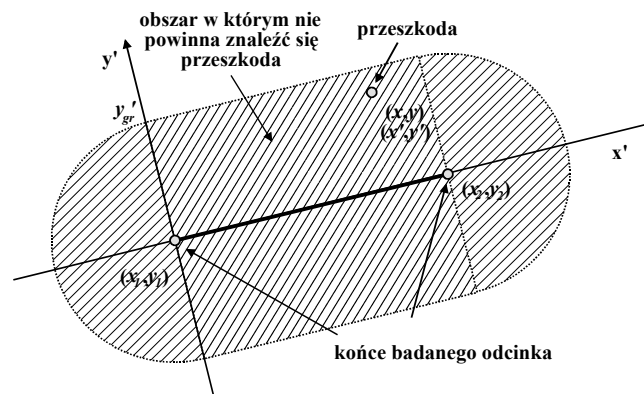
Rysunek 4 przedstawia wyniki zastosowania drugiego algorytmu, w przypadkach podobnych do przedstawionych na rysunku 9, z tą różnicą, że wszystkie odpowiadają użyciu innego zestawu funkcji opisujących oddziaływania pochodzące od przeszkód i punktu docelowego. Na przedstawionych rysunkach możemy zauważyć charakterystyczną dla tego algorytmu koncentrację punktów zmodyfikowanej trajektorii wokół zakrzywień drogi omijającej przeszkodę. Aby przedstawiona metoda mogła odpowiednio zoptymalizować trasę przejazdu, potrzebna jest odpowiednia gęstość punktów w trajektorii bazowej, gdyż algorytm ten nie uwzględnia możliwości wprowadzenia dodatkowych punktów. W takim przypadku, uzyskana trajektoria dla pewnych odcinków będzie pokrywała się z trajektorią bazową.





Rysunek 4. Wynik uproszczenia trajektorii robota.

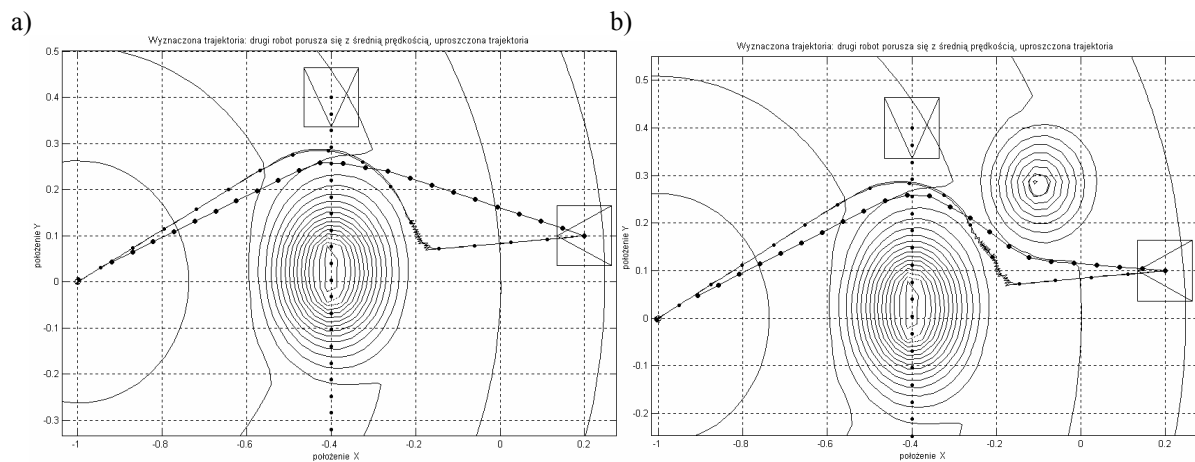
Aby sprawdzić, czy dany odcinek trajektorii jest poprawny, tzn. czy nie przecina obszaru zabronionego żadnej z przeszkód, wystarczy przeliczyć pozycję  $(x,y)$  wszystkich przeszkód z globalnego układu współrzędnych, na lokalny układ współrzędnych  $(x',y')$  odcinka (rysunek13). Przy sprawdzaniu poprawności odcinka trajektorii należy przyjąć nieco mniejszą odległość oddziaływania przeszkody niż w trakcie wyznaczania trajektorii. Uproszczona trajektoria będzie omijać przeszkody w nieco bliższej odległości. Istotne jest, że część punktów trajektorii bazowej leży na granicy oddziaływania przeszkody. Przyjęcie większej wartości granicznej  $y_{gr}'$  podczas badania poprawności odcinka, spowoduje, że w większości przypadków otrzymamy negatywny wynik. Większość odcinków klasyfikowana będzie jako odcinki niedozwolone, co uniemożliwi poprawne uproszczenie trajektorii.



Rysunek 5. Sprawdzanie czy dany odcinek znajduje się w obszarze oddziaływania przeszkody.



Przedstawione na rysunku 6 trajektorie odpowiadają sytuacjom przedstawionym na rysunku 4 po zastosowaniu algorytmu uzupełniania trajektorii brakującymi punktami. Efektem zastosowania tej metody jest trajektoria która spełnia nałożone wymagania w punkcie drugim.



Rysunek 6. Wynik uproszczenia trajektorii robota z uzupełnieniem brakujących punktów.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona w tej pracy zmodyfikowana metoda sztucznego potencjału została wykorzystana do sterowania grupą robotów mobilnych w stworzonym przeze mnie symulatorze. Algorytm wyznaczania trajektorii robota stanowi ważny element większego zintegrowanego systemu sterującego. Na przykład zaproponowany sposób zapisu trajektorii robota związany jest z zastosowanymi algorytmami odwzorowania zadanej trajektorii przez robota mobilnego. Nieodłącznym elementem systemu jest mechanizm wykrywania bezczynności robota związanej z przebywaniem przez dłuższy czas w minimum lokalnym funkcji potencjału oraz podjęcie odpowiednich działań w momencie wykrycia takiego zdarzenia. Innym mechanizmem wspomagającym metodę sztucznego potencjału (unikanie zbędnego grupowania się robotów) jest mechanizm zamiany ze sobą punktów docelowych robotów. Związane jest to z tym że poszczególne roboty mogą zamieniać się zadaniami.

Obecnie trwają prace nad doskonaleniem opisanych w tej pracy algorytmów oraz nad opracowaniem innych rozwiązań w dziedzinie sterowania grupą robotów w dynamicznie zmieniającym się środowisku. Ponadto w niedalekiej przyszłości planujemy wyjść ze środowiska symulacyjnego i zaimplementować opisaną metodę do sterowania rzeczywistą grupą robotów grającą w piłkę nożną.

### Literatura:

- [1] J.R. Andrews, N. Hogan. Impedance control as a framework for implementing obstacle avoidance in a manipulator. *Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems*, Eds. Hardt, D.E. and Book, W., ASME, Boston, pp. 243-251, 1983.
- [2] J. Barraquand, B. Langlois, J. Latombe. Numerical potential field techniques for robot path planning. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, 22(2):224-241, Kwiecień 1992.
- [3] Randal W. Beard, Timothy W. McLain. Motion planning using potential fields, Styczeń 2003.

- [4] J. Borenstein, Y. Koren. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots, *IEEE Trans. Sys. Man. Cyb*, 19(5):1179-1187, 1989.
- [5] Sebastian Buck, Ulrich Weber, Michael Beetz, Thorsten Schmitt. Multi robot path planning for dynamic environments. *A Case Study*.
- [6] Liu Chengqing, Marcelo H. Ang Jr, Hariharan Krishnan, Lim Ser Yong. Virtual obstacle concept for local-minimum-recovery in potential-field based navigation. *Proceeding IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, Kwiecień 2000.
- [7] J.H. Chuang, N. Ahuja. An analytically tractable potential field model of free space and its application in obstacle avoidance. *IEEE Trans. Sys. Man. Cyb*. -Part B: Cyb, 28(5):729-736, 1998.
- [8] R.A.Conn, M.Kam. Robot motion planning on N-dimensional star worlds among moving obstacles. *IEEE Trans. Robotic. Autom.*, 14(2):320-325.
- [9] K. Fujimura, H. Samet. A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles. *IEEE Trans. Robotic. Autom.*, 5(1):61-69, 1989.
- [10] S.S. GE i Y.J. CUI. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. 2002.
- [11] B. Hussien. Robot path planning and obstacle avoidance by means of potential function method. *Ph.D Dissertation*, University of Missouri-Columbia, 1989.
- [12] Y.K.Hwang, H. Ahuja. A potential field approach to path planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, 1, 23-32, 1992.
- [13] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, Missouri, pp. 500-505, Marzec 1990,
- [14] J.O. Kim, P.K.Khosla. Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions. *IEEE Trans. Robotic Autom.*, 8(3):338-349, 1992.
- [15] N. Y. Ko, B. H. Lee. Avoidability measure in moving obstacle avoidance problem and its use for robot motion planning. *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Sys*. Vol.3,pp.1296-1303, 1996.
- [16] Y. Koren, J. Borenstein. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, pp. 1398-1404, Kwiecień 1991.
- [17] J.C. Latombe. Robot mottion planning. *Kluwer Academic Publishers*, Boston, MA, 1991.
- [18] E. Rimon. Exact robot navigation using artificial potential functions. *Ph.D Dissertation*, Yale University, 1990.
- [19] E. Rimon, D.E. Koditschek. Exact robot navigation using artificial potential functions. *IEEE Trans. Robotic Autom.*, 8(5):501-518, 1992.
- [20] Eric J. Rossetter. A potential field frameworkfor active vehicle lanekeeping sssistance, Sierpień 2003.
- [21] C.L.Shih, T. Lee. A unified approach for robot motion planning with moving polyhedral obstacles. *IEEE Trans. Sys. Man. Cyb*., 20(4):903-915, 1990.

