

Podstawy automatyki i robotyki

Robotyka
Wykład 3

Katarzyna Zadarnowska

Katedra Cybernetyki i Robotyki

14 czerwca 2024

Wprowadzenie

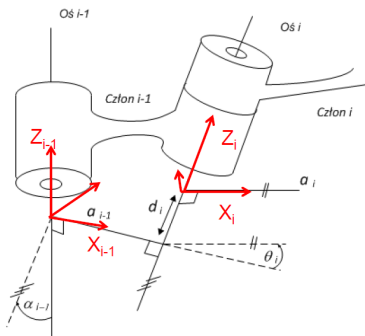
Było...



Rysunek: Źródło: [1]

Wprowadzenie

...było...

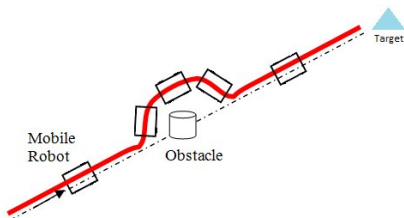
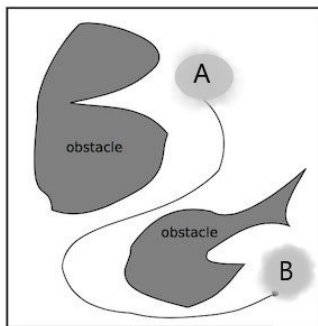


- Zadanie planowania ruchu – definicje, założenia
- Metody oparte na budowie modelu:
 - Odwrotne zadanie kinematyki,
 - Metody interpolacyjne.
- Metody oparte na przeszukiwaniu przestrzeni stanu – grafowe:
 - algorytm heurystyczny A* (globalna)
 - metoda propagacji fali (globalna),
 - metoda diagramu Voronoi (lokalna),
 - graf widoczności (lokalna),
 - metoda pól potencjałowych (lokalna),
 - metoda elastycznej wstęgi (lokalna).
- metody inspirowane biologicznie:
 - metody ewolucyjne,
 - algorytmy mrówkowe,
 - symulowane wyżarzanie,
 - uczenie maszynowe.

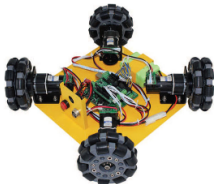
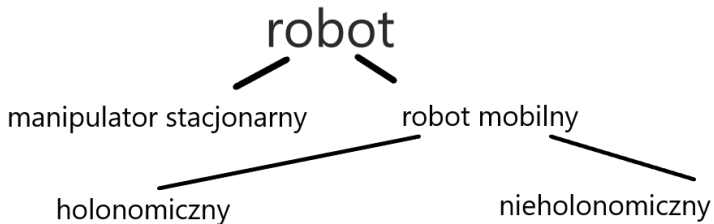
Planowanie ruchu robota

Definicja

Planowanie ruchu robotów polega na celowym doborze oddziaływań na robota tak, by ten przemieścił się od zadanego punktu początkowego do końcowego, unikając kolizji z przeszkodami i przy zapewnieniu odpowiedniej jakości ruchu (np. ścieżka będzie najkrótsza, najszybsza, najmniej energochłonna). Punkt początkowy i końcowy można zadawać w przestrzeni konfiguracyjnej lub zadaniowej robota.



Planowanie ruchu robota



Planowanie ruchu robota

Planowanie toru vs. planowanie trajektorii

- **Planowanie toru ruchu** skupia się na znalezieniu sekwencji punktów (lub drogi), które robot musi przejść, aby dotrzeć z punktu startowego do punktu docelowego, unikając przy tym przeszkód. Głównym celem jest znalezienie możliwej do przejścia ścieżki w przestrzeni roboczej robota.
- **Planowanie trajektorii** zajmuje się określeniem, jak robot powinien poruszać się wzdłuż wyznaczonego toru ruchu. Dotyczy to głównie czasu, czyli uwzględnienia modelu dynamiki i kinematyki robota, a także ograniczeń takich jak maksymalna prędkość i przyspieszenie oraz innych parametrów dynamiki ruchu na ścieżce.

Planowanie toru ruchu i planowanie trajektorii to dwa kolejne etapy w procesie nawigacji robota, gdzie pierwszy określa gdzie iść, a drugi jak iść.

Według zadań:

- planowanie toru ruchu (path planning),
- planowanie trajektorii (trajectory planning).

Według środowiska:

- statyczne – metody globalne,
- dynamiczne – metody lokalne.

Według dostępności informacji:

- z pełną wiedzą – metody globalne,
- z ograniczoną wiedzą – metody lokalne.

Według sposobu reprezentacji przestrzeni roboczej:

- ciągłe (opis za pomocą równań różniczkowych),
- dyskretne (opis w formie automatowo-grafowej).

Planowanie ruchu robota

Podział

Według przestrzeni roboczej:

- 2D,
- 3D.

Według metodyki:

- oparte na grafach – przedstawienie przestrzeni roboczej w postaci grafu i szukanie ścieżki od węzła początkowego do węzła docelowego (algorytm A*, Dijkstra itp.);
- próbkujące – generowanie losowych próbek w przestrzeni roboczej i łączenie ich w ścieżkę omijającą przeszkody (Rapidly-exploring Random Trees (RRT), Probabilistic RoadMaps (PRM));
- oparte na optymalizacji – do znajdowania najbardziej optymalnej ścieżki pod względem określonego kryterium kosztu;
- oparte na modelu;
- inspirowane biologicznie.

Metody planowania oparte na budowie modelu

Proste zadanie kinematyki

Kinematyka opisuje położenie i orientację efektora w przestrzeni zadaniowej w funkcji zmiennych przegubowych

$$y = k(q).$$

Różniczkując powyższe otrzymamy zależność prędkości zmian współrzędnych zadaniowych od prędkości zmian współrzędnych przegubowych

$$\dot{y} = \frac{\partial k}{\partial q}(q)\dot{q} = J(q)\dot{q},$$

przy czym $J(q)$ to macierz Jacobiego opisująca tę zależność.

Konfiguracja regularna

$$\det(J(q)) \neq 0,$$

Konfiguracja osobliwa

$$\det(J(q)) = 0.$$

Metody planowania oparte na budowie modelu

Odwrotne zadanie kinematyki

- Dla manipulatorów nieredundantnych ($n = m$)

$$\dot{q}(t) = J^{-1}(q(t))\dot{y}(t).$$

- Dla manipulatorów redundantnych ($n \geq m$)

$$\dot{q}(t) = J^+(q(t))\dot{y}(t),$$

przy czym $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$ to pseudoinwers Moore'a – Penrose'a.

Metody planowania oparte na budowie modelu

Odwrotne zadanie kinematyki – metoda jacobianowa rozwiązania OZK

- Dla manipulatorów nieredundantnych ($n = m$)

$$\dot{q}(t) = \gamma J^{-1}(q(t))(y_d - k(q)), \quad k(q(t_0)) = y(t_0).$$

- Dla manipulatorów redundantnych ($n \geq m$)

$$\dot{q}(t) = \gamma J^+(q(t))(y_d - k(q)), \quad k(q(t_0)) = y(t_0).$$

Metody oparte na budowie modelu

Odwrotne zadanie kinematyki – algorytm Newtona

- Dla nieosobliwej macierzy Jacobiego i $n = m$

$$q_{k+1} = q_k + \gamma J^{-1}(q(t))(y_d - k(q_k)).$$

- Gdy $\text{rank } J(q(t)) = m$ i $n \geq m$

$$q_{k+1} = q_k + \gamma J^+(q(t))(y_d - k(q_k)).$$

Jakobianowy algorytm odporny ($n = m$)

$$q_{k+1} = q_k + \gamma(J^{-1}(q(t)) + \mu_k I)(y_d - k(q_k))$$

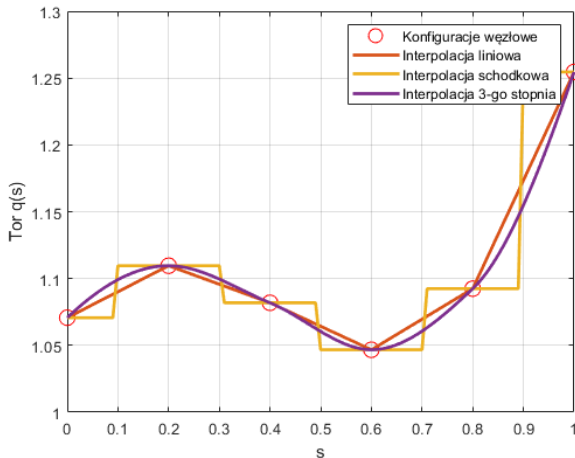
lub

$$q_{k+1} = q_k + \gamma(J^{-1}(q(t)) + \mu_k D(q_k))(y_d - k(q_k)),$$

gdzie $D_{jj} = J_{jj}$ dla $J_{jj} \neq 0$ i $D_{jj} = 1$ dla $J_{jj} = 0$.

Metody planowania oparte na budowie modelu

Metody interpolacji toru - idea



Interpolacja wielomianami stopnia trzeciego z ciągłą prędkością

Zadanie: dla ustalonych chwil czasu t_1, \dots, t_N i konfiguracji q_1, \dots, q_N oraz zadanych prędkości brzegowych \dot{q}_1 i \dot{q}_N wyznaczyć tor złożony ze sklejonych wielomianów stopnia trzeciego o ciągłej prędkości w konfiguracjach węzłowych.

Cechy:

- metoda lokalna i efektywna obliczeniowo,
- ograniczony błąd śledzenia toru prostoliniowego w przestrzeni konfiguracyjnej,
- ograniczona amplituda skoków przyspieszenia w konfiguracjach węzłowych.

Metody planowania oparte na budowie modelu

Metody interpolacji toru - przykłady

Interpolacja wielomianami stopnia trzeciego z ciągłym przyspieszeniem

Zadanie: dla ustalonych chwil czasu t_1, \dots, t_N i konfiguracji $q_1, q_3, \dots, q_{N-2}, q_N$ oraz zadanych prędkości i przyspieszeń na końcach przedziału \dot{q}_1 i \dot{q}_N oraz \ddot{q}_1 i \ddot{q}_N wyznaczyć tor złożony ze sklejonych wielomianów stopnia trzeciego o ciągłych pochodnych do rzędu drugiego włącznie w konfiguracjach węzłowych.

Cechy:

- szczególnie przydatna w zadaniach planowania trajektorii manipulatorów/robotów mobilnych z pełną dynamiką (nieciągłość przyspieszeń prowadzi do nieciągłości sterowań),
- ograniczona amplituda błędu śledzenia toru w przestrzeni konfiguracyjnej,
- maksymalna amplituda błędu śledzenia na segmentach zawierających punkty nieookreślone w celu uzyskania ciągłości drugiej pochodnej wynikowego toru.

Metody planowania oparte na budowie modelu

Metody interpolacji toru

W aplikacjach robotycznych spotyka się sklejanie torów częściowych najczęściej niskich stopni przy pomocy wielomianów wyższych stopni, zapewniających odpowiednią ciągłość wynikowego toru, np. sklejanie parabolą segmentów prostoliniowych.

Metoda kontrolowanego odchylenia od ścieżki prostoliniowej:

- 1 Stosuje się, gdy ważne jest, by wynikowy tor w przestrzeni zadaniowej, nie odbiegał od zadanego.
- 2 Polega na zadaniu z góry określonego maksymalnego błędu i rekurencyjnym dodawaniu kolejnych punktów węzłowych położony na ścieżce prostoliniowej.
- 3 Jest przykładem strategii „dziel i rządź”.
- 4 Algorytm jest zbieżny, gdy zadany tor prostoliniowy leży w obrębie przestrzeni roboczej manipulatora.
- 5 Cechuje się nadmierną ostrożnością – może wprowadzać więcej dodatkowych węzłów niż jest to konieczne.

Fizyczna realizowalność zadanego toru:

- 1 Spektrum częstotliwości trajektorii uzyskane z rozwinięcia toru w szereg Fouriera porównuje się z pasmem przenoszenia układu napędowego manipulatora/roboty.
- 2 Sygnał sterujący podawany jest przez układ napędowy o określonym paśmie przenoszenia, ograniczonym od góry. Składowe o dużej amplitudzie i wysokich częstotliwościach mogą nie być realizowalne przez dostępny napęd.
- 3 Układ napędowy zrealizuje jedynie częstotliwości poniżej górnego pasma przenoszenia, a zatem faktycznie generowana trajektoria może być różna od zaplanowanej. Należy ograniczać liczbę harmonicznnych generujących trajektorię.
- 4 Gdy częstotliwości zadane do realizacji są bliskie częstotliwościom własnym mechanizmu robota, występują niekorzystne wibracje i efekty rezonansowe. Dobiera się je tak, by nie powodowały zjawisk rezonansowych.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Definicje

- 1** **Złożoność obliczeniowa:** zależy od liczby stopni swobody robotów, liczności grupy robotów, liczby ruchomych przeszkód. Zadania **NP-trudne** (złożoność eksponencjalna) – trudne do rozwiązania i **P-trudne** (złożoność wielomianowa) – łatwe do rozwiązania.
- 2** **Planer ruchu: zupełny** – znajduje rozwiązanie gdy ono istnieje lub informuje o nieistnieniu rozwiązania; **niezupełny** – może nie znaleźć rozwiązania nawet gdy ono istnieje lub nie potrafi rozstrzygnąć w skończonym czasie czy ono istnieje; **probabilistycznie zupełny** – podaje wiarygodne rozwiązanie w zadanym czasie.
- 3** W obliczu dużej złożoności obliczeniowej zadania korzysta się z **metod heurystycznych**, które zmniejszają przestrzeń poszukiwań. Polegają one na wykorzystaniu heurystyk, czyli uproszczonych reguł lub strategii, które pomagają w podejmowaniu decyzji w środowiskach, gdzie pełna analiza jest niemożliwa lub zbyt kosztowna.

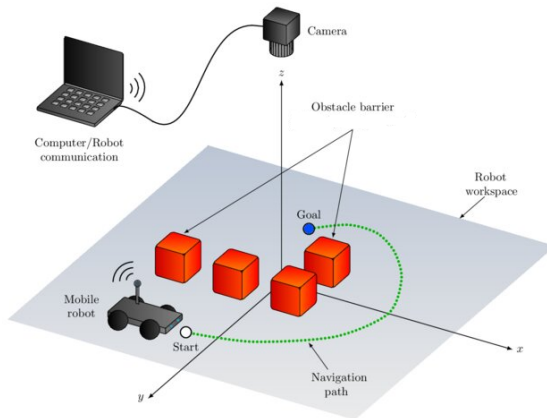
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Test kolizyjności

- Test kolizyjności polega na określeniu kolizyjności ogniw manipulatora między sobą, bądź ogniw manipulatora/robota mobilnego z przeszkodami.
- Ogniwa manipulatora oraz przeszkody reprezentuje się w postaci obiektów elementarnych: kule, elipsoidy, stożki uogólnione, wielościany wypukłe.
- Test kolizyjności wpływa na złożoność obliczeniową zadania. W celu redukcji wymiaru zadania modeluje się np. stopnie swobody związane z efektoem w postaci jednej bryły. Wiele małych przeszkód agreguje się w jedną większą przeszkodę (uwypuklenie grupy przeszkód).

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Percepcja robota



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Percepcja robota

- Percepcja robotów oparta jest o postrzeganie struktur geometrycznych na scenie.
- Roboty wykorzystują kamery, czujniki RGB-D oraz skanery laserowe do określenia kształtu przeszkód znajdujących się w środowisku.
- W tym celu budowane są mapy zajętości, mamy rastrowe, mapy wokselowe określające zajętość przestrzeni i kształty przeszkód.
- Mając wiedzę o kształcie przeszkód, roboty planują swój ruch i unikają kolizji z otoczeniem.
- Wykorzystanie głębokich sieci neuronowych w robotyce pozwala na detekcję i klasyfikację obiektów na obrazach kolorowych.

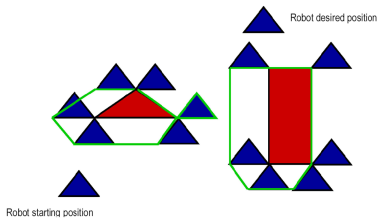
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Założenia

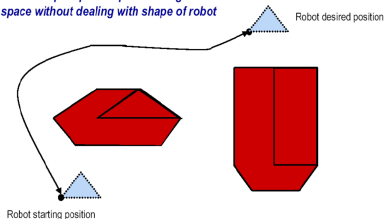
- Znana jest dokładna mapa otoczenia.
- Uwzględnione są ograniczenia robota.
- Możliwa jest korekta mapy i przeplanowanie.
- Sensory dają dokładną informację o otoczeniu.
- Robot dysponuje idealnym systemem lokalizacji.
- Robot jest okrągły w rzucie z góry, dlatego jego orientacja nie ma znaczenia.
- Robot jest holonomiczny - ma możliwość jazdy w dowolnym kierunku.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Założenia – agregacja przeszkód



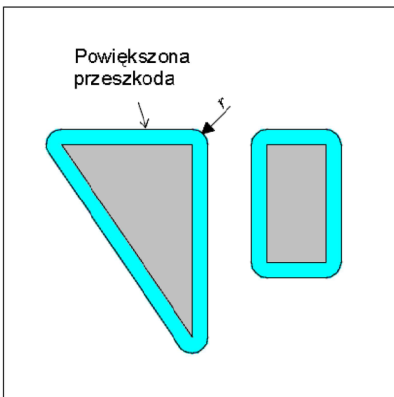
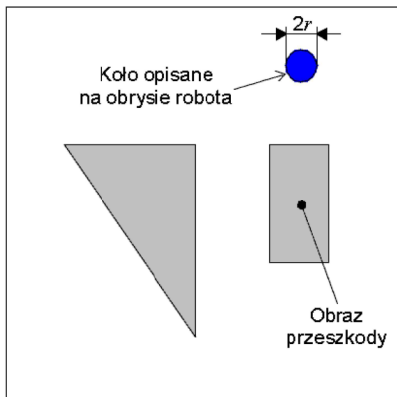
Can now plan path of point through this space without dealing with shape of robot



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Założenia – powiększanie przeszkód

Przy założeniu, że robot jest okrągły, powiększa się przeszkody o wielkość promienia robota. Dzięki temu można rozważać robota jako punkt materialny, a to znacznie upraszcza algorytmy planowania.

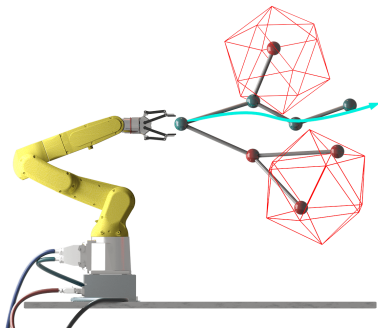


Planowanie toru ruchu robota

Algorytmy planowania ruchu

Algorytmy planowania ścieżki powinny być

- szybkie (do wykonania w czasie pracy robota),
- dokładne,
- działające w każdych warunkach (niezależnie od położenia robota czy konfiguracji otoczenia).



Planowanie ruchu robota

Metody planowania ruchu robotów mobilnych

Globalne – zakładają znajomość otoczenia, pozycji robota i rozkładu przeszkód jeszcze przed przystąpieniem do planowania. Potencjalnie optymalne, ale ceną jest zwielokrotnienie nakładów obliczeniowych i mała odporność na zmiany warunków początkowych zadania (np. nieoczekiwane pojawienie się przeszkód ruchomych). Ścieżka jest obliczana iteracyjnie. Czasochłonne, a zatem wykorzystywane w planowaniu off-line (cała ścieżka jest wstępnie planowana i dopiero potem przesyłana do wykonania).

Lokalne – wiedza o przeszkodach jest ograniczona do bezpośredniego otoczenia robota. Przede wszystkim mają zapewnić bezkolizyjność ruchu, z ewentualną optymalizacją lokalnej jakości ruchu. Ścieżka tworzona jest przyrostowo. Wykorzystywane do planowania w czasie rzeczywistym (on-line) ze względu na dużą szybkość działania i odporność na zmiany środowiska. Może się zdarzyć, że ścieżka nie zostanie odnaleziona, pomimo jej istnienia.

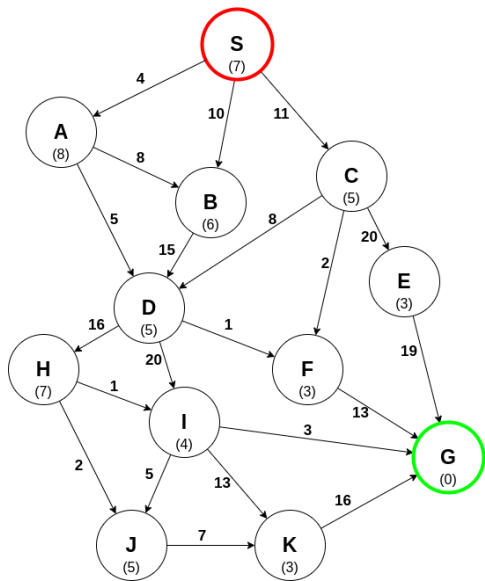
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Graf – podstawowe pojęcia

- 1 Graf określa się podając zbiór wierzchołków i łuków między nimi.
- 2 Graf ma strukturę drzewa, a łuki to gałęzie drzewa.
- 3 Tylko jedna droga łączy dwa dowolne wierzchołki grafu.
- 4 Wierzchołkiem może być konfiguracja manipulatora, bądź położenie robota mobilnego.
- 5 Gałęzią może być operator zmiany konfiguracji pod wpływem sterowania.
- 6 Wagą gałęzi jest zmiana konfiguracji robota, mająca ścisły związek z energią wywołującą tę zmianę.
- 7 Graf może być skierowany (gdy ustali się kierunek ruchu wzdłuż każdej gałęzi), bądź nieskierowany.
- 8 Dla grafu skierowanego wierzchołki połączone wspólną gałęzią pozostają w relacji rodzic – potomek.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

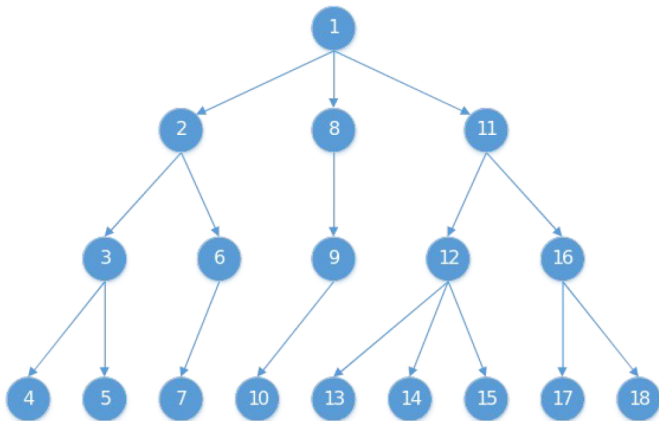
Graf – przykład



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Przeszukiwanie "w głąb"

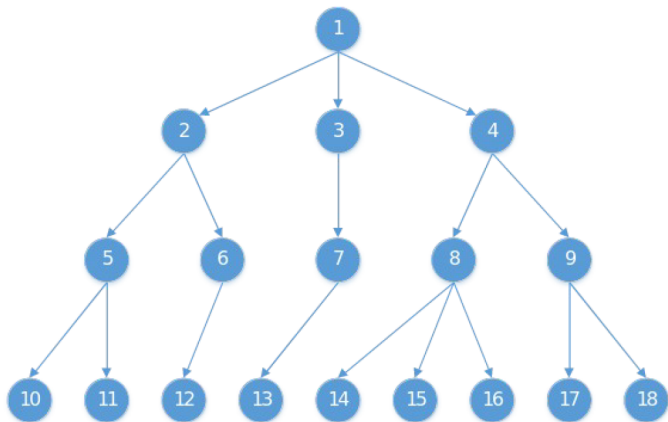
Przeszukiwanie w głąb (ang. depth-first search DFS) - po zbadaniu wszystkich krawędzi wychodzących z podanego wierzchołka algorytm powraca do wierzchołka, z którego dany wierzchołek został odwie



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Przeszukiwanie "wszerz"

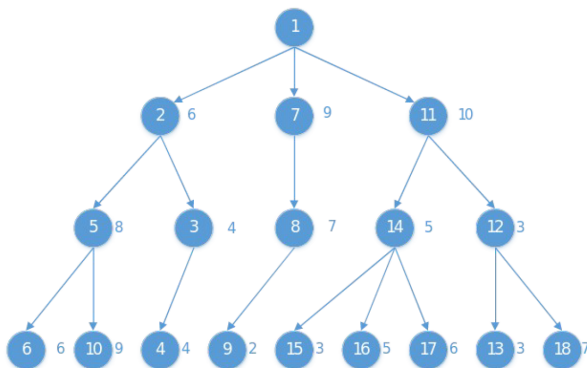
Przeszukiwanie wszerz (ang. breadth-first search, BFS) - przechodzenie grafu rozpoczyna się od zadanego wierzchołka i polega na odwiedzeniu wszystkich osiągalnych z niego wierzchołków.



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Algorytm "najpierw najlepszy" (ang. best-first search)

Przeszukiwanie najpierw najlepszy (ang. best-first search) - wymagane jest zdefiniowanie kosztów poszczególnych węzłów, a zatem jest to algorytm heurystyczny. W każdej chwili wykonuje ruch, który minimalizuje funkcję oceny.



Metody przeszukiwania heurystycznego:

- szukanie typu „wspinanie do góry” (HC ang. hill climbing),
- szukanie „najpierw najlepszy” (BFS ang. best-first search),
- algorytm A^* ,
- algorytm A^* z iteracyjnym poprawianiem,
- szukanie z ograniczeniem kosztu (UCS ang. uniform cost search),
- algorytm stopniowego studzenia, zwany wyżarzaniem (ang. simulated annealing).

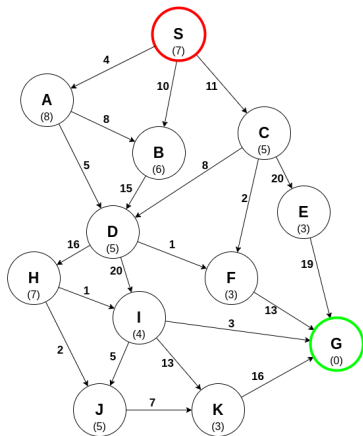
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Algorytm A*

$f(q) = g(q) + h(q, x_d)$ – funkcja jakości ruchu,

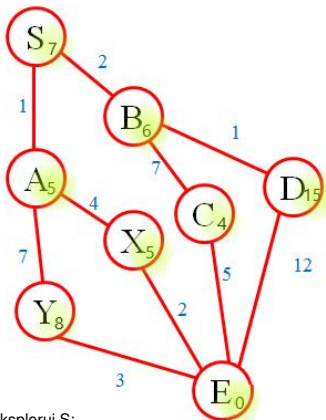
$g(q)$ – koszt ruchu od wierzchołka początkowego do danego,

$h(q, x_d)$ – estymata kosztu przejścia od danego wierzchołka do końcowego, tzw. funkcja heurystyczna.



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Algorytm A*



Eksploruj S:

$$\{S, A\} \quad f = 1 + 5 = 6$$

$$\{S, B\} \quad f = 2 + 6 = 8$$

CLOSE: S(7) OPEN: A(6), B(8)

Eksploruj A:

$$\{S, B\} \quad f = 2 + 6 = 8 \text{ (z OPEN)}$$

$$\{S, A, X\} \quad f = (1 + 4) + 5 = 10$$

$$\{S, A, Y\} \quad f = (1 + 7) + 8 = 16$$

CLOSE: S(7), A(6) OPEN: B(8), X(10), Y(16)

Eksploruj B:

$$\{S, A, X\} \quad f = (1 + 4) + 5 = 10 \text{ (z OPEN)}$$

$$\{S, A, Y\} \quad f = (1 + 7) + 8 = 16 \text{ (z OPEN)}$$

$$\{S, B, C\} \quad f = (2 + 7) + 4 = 13$$

$$\{S, B, D\} \quad f = (2 + 1) + 15 = 18$$

CLOSE: S(7), A(6), B(8) OPEN: X(10), Y(16), C(13), D(18)

Eksploruj X:

$$\{S, A, X, E\} \quad f = (1 + 4 + 2) + 0 = 7$$

$$\{S, A, Y\} \quad f = (1 + 7) + 8 = 16 \text{ (z OPEN)}$$

$$\{S, B, C\} \quad f = (2 + 7) + 4 = 13 \text{ (z OPEN)}$$

$$\{S, B, D\} \quad f = (2 + 1) + 15 = 18 \text{ (z OPEN)}$$

CLOSE: S(7), A(6), B(8), X(7)

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Algorytm A* – własności

- 1 Algorytm A* jest zupełny i optymalny – znajduje ścieżkę, jeśli tylko taka istnieje, i przy tym jest to ścieżka najkrótsza.
- 2 Wymaga spełnienia warunku $h(q, x_d) < h^*(q, x_d)$, przy czym $h^*(q, x_d)$ jest rzeczywistą wartością kosztu przejścia od konfiguracji q do punktu docelowego x_d .
- 3 Algorytm A* jest optymalny dla danej heurystyki, co znaczy, że nie istnieje inny algorytm, który z pomocą tej samej heurystyki odwiedziłby mniej wierzchołków niż A*.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Algorytm A* – znaczenie funkcji heurystycznej

Składniki $h(q, x_d)$ i $g(q)$ reprezentują w funkcji

$$f(q) = g(q) + h(q, x_d)$$

dwie przeciwstawne tendencje: optymizm $h(q)$ i konserwatyzm $g(n)$.

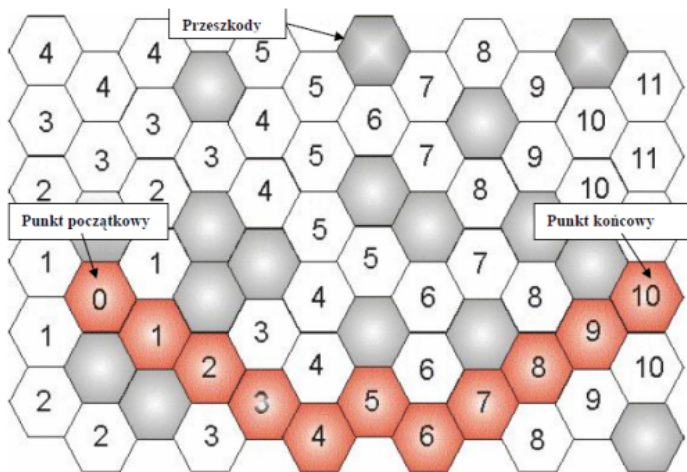
Możemy całkiem swobodnie sterować strategią w jedną lub drugą stronę stosując wzór

$$f(q) = (1 - k) * g(q) + k * h(q, x_d).$$

Zwiększając współczynnik wagi k możemy nadawać przeszukiwaniu charakter bardziej agresywny (i ryzykowny), gdy np. mamy zaufanie do funkcji $h(q, x_d)$ i chcemy posuwać się szybko do przodu. Z kolei zmniejszając ten współczynnik, zapewniamy dokładniejsze badanie przestrzeni, posuwając się wolniej do przodu, ale kompensując niektóre błędy funkcji $h(q, x_d)$. Zauważmy, że w skrajnych przypadkach, $k = 1$ daje przeszukiwanie najpierw-najlepszy, natomiast $k = 0$ daje przeszukiwanie równokosztowe.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda propagacji fali



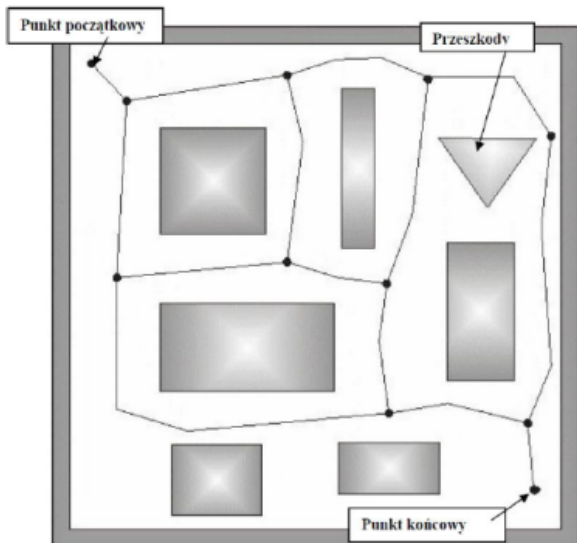
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda propagacji fali

- 1 Sprawdza się w przypadku robotów holonomicznych.
- 2 Stosuje się w zadaniach wielokrotnego wyznaczenia drogi między dowolnym punktem przestrzeni konfiguracyjnej, a jednym, zadany punktem tej przestrzeni.
- 3 Stosowana dla środowisk stacjonarnych i zamkniętych.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda diagramu Woronoia



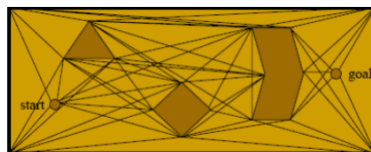
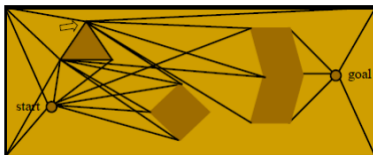
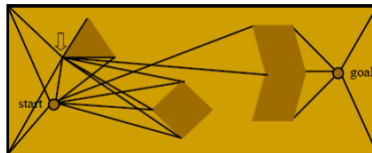
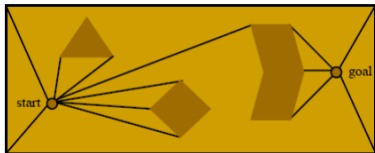
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda diagramu Woronoia

- Metoda globalna.
- Planuje skrajnie bezpieczne tory (przez to czasami zbyt długie) – stosowana dla robotów nieholonomicznych.
- Zwykle wykorzystywana w środowiskach o niezbyt dużej liczbie przeszkód stacjonarnych.
- Środowisko robota musi być ograniczone (zamknięte).
- Przeszkody powinny być wypukłe. W innym wypadku wpisuje się je w figury wypukłe.
- Jeśli przeszkody są bardzo małe i nieznacznie od siebie oddalone, dokonuje się ich agregacji – przyspieszenie procesu planowania.
- Liczba wierzchołków w grafie jest funkcją liczby przeszkód, rośnie szybciej niż liniowo.
- Działa w połączeniu z metodami lokalnymi (np. z metodą elastycznej wstęgi).
- Najkrótsza droga niekoniecznie musi być łatwa do zrealizowania.
- I fazę wykonuje się w trybie off-line, II faza może być wykonana on-line.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Graf widoczności



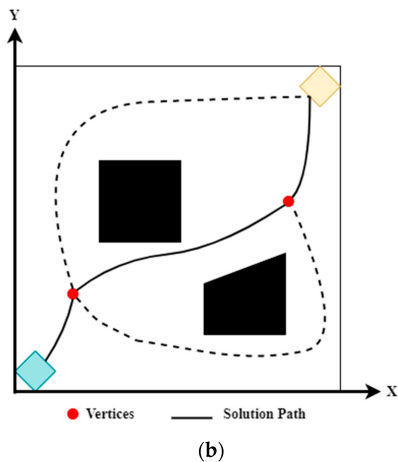
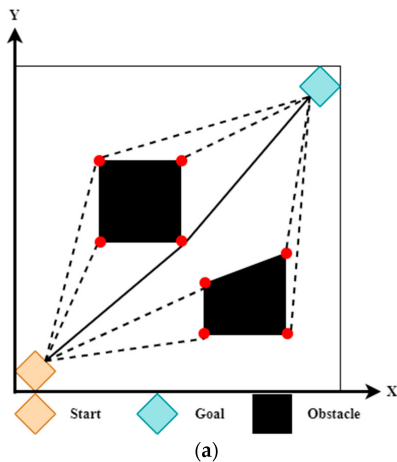
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Graf widoczności

- Przeszkody muszą być wielokątami.
- Polega na utworzeniu grafu łączącego wierzchołki ze sobą w ten sposób, aby gałęzie łączące nie przecięły krawędzi przeszkód.
- Rysowane są linie od punktu startowego i końcowego, do wszystkich widocznych wierzchołków z tych miejsc.
- W kolejnych krokach rekurencyjnie rysuje się linie z nowych wierzchołków, do kolejnych widocznych z nich wierzchołków.
- Gałęzie w grafie opisane są odległością euklidesową pomiędzy wierzchołkami.
- Po utworzeniu grafu wyznacza się najkrótszą trasę od punktu początkowego do punktu końcowego.
- Metoda daje możliwość uzyskania najkrótszej trasy.
- Wymaga znajomości przestrzeni.
- Trasa może kolidować z wierzchołkami przeszkód i prowadzić wzdłuż ścian przeszkód (poszerzanie przeszkód, stosowanie z metodą elastycznej wstęgi).
- Efektywna czasowo, może być stosowana w trybie on-line.
- Radzi sobie w środowisku niestacjonarnym (pod warunkiem, że mapa otoczenia często uaktualniana).

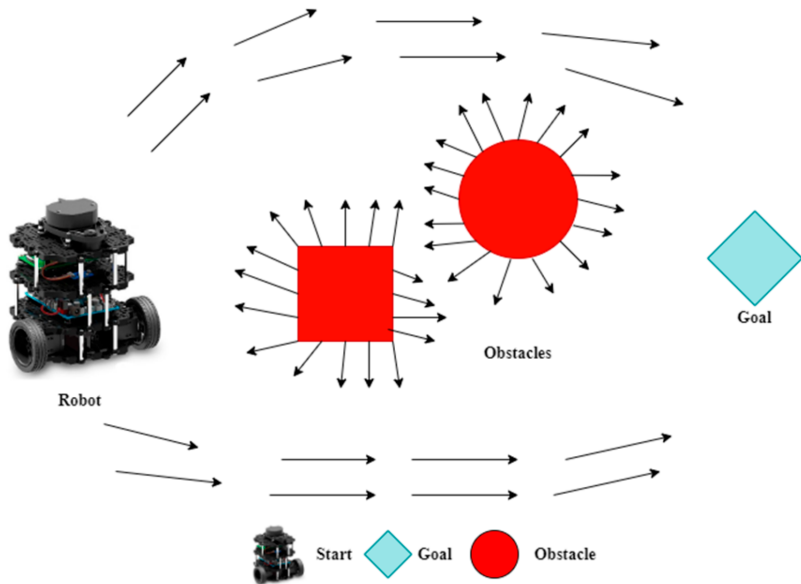
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Graf widoczności vs metoda diagramu Voronoi



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda pól potencjałowych



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda pól potencjałowych

- Metoda lokalna, całkowicie niewrażliwa na kształt przeszkód.
- Układ robot - przeszkoda modelowany jako wzajemnie oddziałujące na siebie ładunki elektryczne.
- Siły pochodzące od przeszkód odpychają robota, a siły pochodzące od punktu docelowego przyciągają go.
- Kierunek ruchu robota jest wypadkową działających na niego sił.
- W zadanym kroku, ruch w kierunku wyznaczonym przez siłę wypadkowa, przemieszcza robota o stałą, niewielką i ustaloną odległość.
- odpowiednio małe przemieszczenie chwilowe gwarantuje, że robot nie zderzy się z przeszkodą.

Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda pól potencjałowych - wady

Problem minimum lokalnego (uzyskania zerowej wartości wypadkowego wektora sił poza punktem docelowym):

- dobór funkcji opisującej oddziaływania odpychające pozbawionej minimów lokalnych (niemożliwe dla większej ilości bardziej skomplikowanych przeszkód),
- specjalny scenariusz postępowania w sytuacji gdy robot utknie w minimum lokalnym (np. poruszać się wzdłuż przeszkody, aż do momentu gdy przeszkoda zostanie ominięta),
- przed planowaniem toru, każdej z przeszkód przypisanie tzw. spinu, czyli kierunku ruchu robota gdy ten znajdzie się w pobliżu przeszkody (uwzględnienie informacji globalnej),
- chwilowe wyłączenie siły przyciągania pochodzącej od punktu docelowego i zwiększenie amplitudy sił odpychających,
- stosowanie technik błędzenia losowego lub algorytmu symulowanego odprężania.

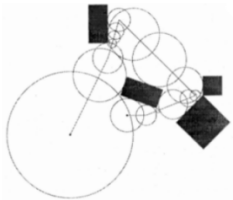
Nadmierna złożoność obliczeniowa:

- przeszkody modelowane jako układ ładunków punktowych rozmieszczonych na brzegach przeszkód, przy czym liczba tych punktów jest niewielka;
- agregacja grup małych przeszkód położonych blisko siebie;
- nie uwzględnianie wpływu przeszkód położonych poza przyjętym zakresem;
- pomijanie (lub ograniczanie) wpływu przeszkód ominiętych.

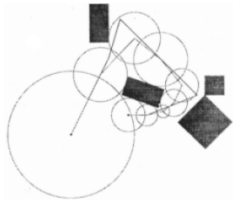
Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda elastycznej wstęgi

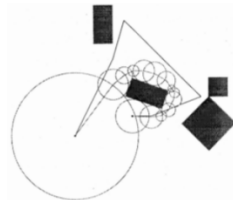
Tor inicjalizujący



Tor po 3 iteracjach



Tor po 28 iteracjach



Planowanie toru ruchu robota - metody grafowe

Metoda elastycznej wstęgi

- 1 Wymaga znajomości gotowej trasy.
- 2 Trasę odpowiednio się modyfikuje tak, aby przyjęła ona jak najmniejszą długość, przy zachowaniu bezpiecznej odległości od przeszkód:
 - Na całej trasie ustawia się przecinające się okręgi o promieniu równym odległości od środka do najbliższej przeszkody.
 - Okręgom przypisuje się pewną siłę sprężystości, która stara się skrócić i wygładzić tor (łamaną pomiędzy środkiem danego okręgu i środkami okręgów sąsiadującymi).
 - Dalej, rozciąga się lub skraca trasę tak długo, aż do uzyskania optymalnej długości trasy.
- 3 Metoda daje najlepsze rozwiązanie ze względu na długość trasy i bezpieczeństwo.
- 4 Przy źle poprowadzonej gotowej trasie zysk jest niewielki.
- 5 Redukcja złożoności obliczeniowej polega na zmniejszeniu liczby okręgów.
- 6 Łatwość metody w reagowaniu na niewielkie zmiany otoczenia (spowodowanie ruchem przeszkód) – modyfikuje się jedynie niezbędne fragmenty trasy.

Planowanie toru ruchu robota

Metody planowania inspirowane biologicznie

Cechy:

- rozproszony sposób poszukiwania rozwiązania przez populację dopuszczalnych torów lub trajektorii - ogólniej osobników,
- odporne – wynik poszukiwań nie zależy od pojedynczego osobnika, który może zostać w każdej chwili wykluczony z populacji bez istotnej szkody dla jakości rozwiązania.

Przykłady:

- metody ewolucyjne,
- kolonie mrówek,
- symulowane odprężanie,
- planowanie przez uczenie maszynowe.

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Metody ewolucyjne

- 1 Krok 1. Wybrać początkową, dopuszczalną populację bezkolizyjnych (losowe + metody potencjałowe) torów (trajektorii) - osobników i ocenić każdego z nich funkcją jakości. Tory zapisane w postaci kodu: łańcucha binarnego lub wektora liczb rzeczywistych opisujących wierzchołki oraz dodatkowe cechy.
- 2 Krok 2. Zastosować operatory ewolucyjne (np. mutacje, rekombinacje) do wybranych w procesie selekcji osobników, by wygenerować osobniki potomne. Dopuszczalne tory, spełniające test bezkolizyjności, ocenić funkcją jakości. Daje się szansę słabszym osobnikom w celu zapewnienia różnorodność genów (zawężony zakres eksploracji przestrzeni przeszukiwań może prowadzić do utknięcia w minimach lokalnych).
- 3 Krok 3. Zastosować reguły "przeżycia" osobników. Osobniki pozostawione tworzą populację dla kolejnej iteracji algorytmu.
- 4 Krok 4. Sprawdzić warunek zakończenia obliczeń. Gdy nie jest spełniony, cofnąć się do kroku 2. W przeciwnym przypadku wskazać tor (trajektorię) najlepszy względem funkcji jakości.

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Metody ewolucyjne

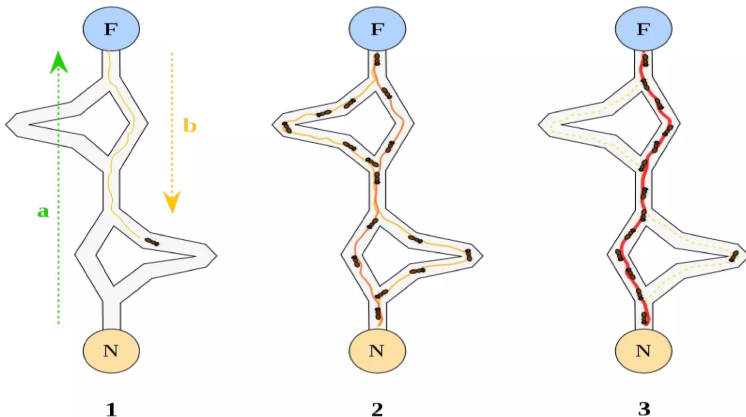
Cechy:

- prosta implementacja i przejrzysta idea,
- ze względu na elastyczność pozwalają na zrównoleglenie obliczeń,
- długi czas konieczny do uzyskania satysfakcjonującego rozwiązania oraz brak efektywnego testu optymalności rozwiązania (oraz szacowania jak bardzo odległe jest uzyskane rozwiązanie od optymalnego).

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Algorytm mrówkowy

Algorytm Mrówkowy – przykład



Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Algorytm mrówkowy

- 1 Krok 1. Wybrać wierzchołki pokrywające przestrzeń konfiguracyjną, sąsiednie wierzchołki połączyć łukami. Zainicjować początkowe stężenie feromonu poprzez przypisanie wag łukom. Wybrać punkty brzegowe poszukiwanej drogi.
- 2 Krok 2. Wygenerować kolonię mrówek i rozproszyć ją w przestrzeni stanu.
- 3 Krok 3. Każda mrówka osiągnąwszy wierzchołek wybiera kierunek ku węzłom sąsiednim poprzez sprawdzenie wag. Określa się prawdopodobieństwo wyboru kierunku do danego wierzchołka. Po wyborze wierzchołka, waga łuku do niego prowadzącego jest wzmacniana.
- 4 Krok 4. Po pewnym czasie działania kolonii mrówek poprzez śledzenie drogi maksymalnego stężenia feromonu zainicjowanej w punkcie początkowym powstaje tor optymalny.

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Cechy algorytmu mrówkowego

- W algorytmie należy uwzględnić mechanizm parowania feromonu (w praktyce zmniejszanie wag losowo wygenerowanych łuków).
- Trudny dobór parametrów warunkujących działanie metody:
 - zbyt duże wzmocnienie wag – przedwczesna zbieżność,
 - zbyt małe wzmocnienie - losowe błędzenie oraz w efekcie zbyt wolna zbieżność.
- Metoda uniwersalna i łatwa w implementacji.
- Wymaga utworzenia grafu o wielu wierzchołkach i łukach co generuje znaczne nakłady obliczeniowe (czasowe i pamięciowe).

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Symulowane wyżarzanie



Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Symulowane wyżarzanie – algorytm

- 1 Krok 1. Ustal początkową temperaturę $T = T_{max}$. Wybierz losową konfigurację bieżącą q i określ jej jakość $J(q)$.
- 2 Krok 2. Zmodyfikuj konfigurację bieżącą np. według rozkładu normalnego i wylicz jej jakość $J(\tilde{q})$. Oceń różnicę jakości $\Delta J = J(q) - J(\tilde{q})$ obu konfiguracji.
- 3 Zaakceptuj nowe rozwiązanie \tilde{q} , jeżeli obniża ono całkowity koszt. Jeżeli jednak ta zmiana podnosi całkowity koszt to nowe rozwiązanie może być przyjęte z pewnym prawdopodobieństwem. Prawdopodobieństwo wyboru gorszej propozycji (w celu uniknięcia minimum lokalnego) zależy od parametru T i różnicy jakości rozwiązań ΔJ . Jest ono tym mniejsze, im
 - różnica między proponowanym a starym rozwiązaniem jest większa (celem jest ograniczenie odchodzenia od wcześniejszego lepszego rozwiązania),
 - wartość parametru T jest mniejsza (w trakcie działania algorytmu wartość parametru jest stale obniżana - w efekcie szansa wyboru gorszego rozwiązania maleje).
- 4 Zmniejsz wartość parametru T .
- 5 Zakończ algorytm lub wróć do kroku 3. Algorytm kończy działanie, gdy bieżące rozwiązanie nie zmienia się dla kilku kolejnych kroków.

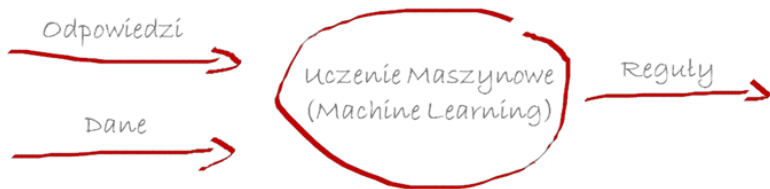
Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Symulowane wyżarzanie – cechy algorytmu

- 1 Z reguły nie występuje jako samodzielna metoda planowania – jest adoptowana przez różne metody planowania do opuszczania minimów lokalnych funkcji jakości.
- 2 Parametr sterujący zwany temperaturą maleje w trakcie wykonywania algorytmu. Im wyższą wartość ma ten parametr, tym bardziej chaotyczne mogą być zmiany.
- 3 Z pewnym prawdopodobieństwem może być zaakceptowane rozwiązanie gorsze (umożliwienie wyjścia z minimum lokalnego). Prawdopodobieństwo przyjęcia gorszego rozwiązania spada wraz ze spadkiem temperatury i wzrostem różnicy jakości obu rozwiązań (ograniczenie odchodzenia od wcześniejszego lepszego rozwiązania).
- 4 Algorytm nie gwarantuje, że zostanie przy najlepszym rozwiązaniu.

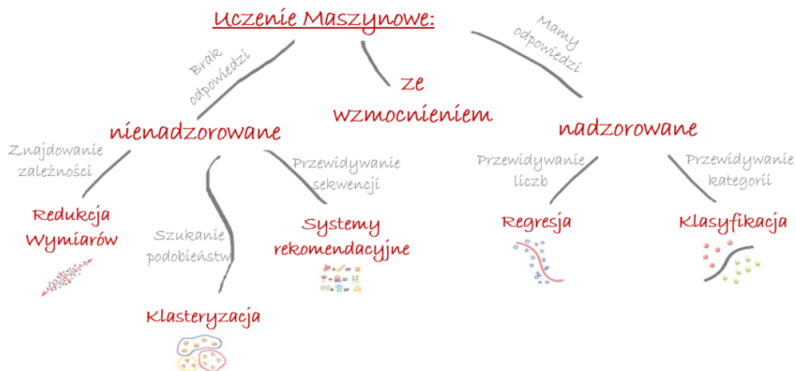
Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Uczenie maszynowe



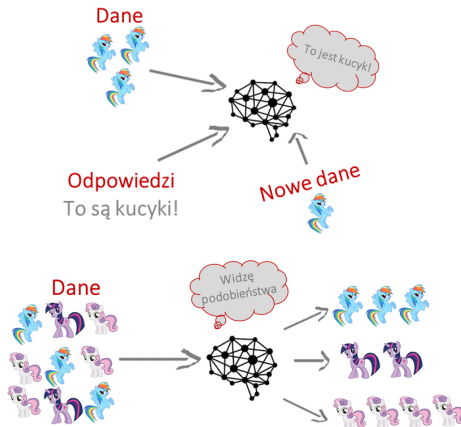
Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Uczenie maszynowe – podział



Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Uczenie maszynowe – nadzorowane i nienadzorowane



Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Uczenie maszynowe – uczenie ze wzmocnieniem



Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

Uczenie maszynowe

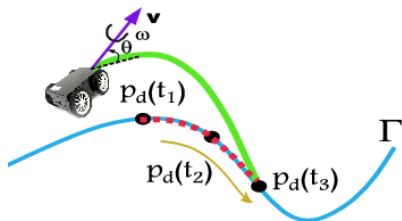
- Mniej efektywne obliczeniowo.
- Bardziej elastyczne.
- Do planowania ruchu robotów autonomicznych, działających w środowisku otwartym (nieprzewidywalnym i dynamicznie zmiennym).
- System sterowania powinien charakteryzować się reaktywnością.
- Robot nabywa wiedzę przyrostowo z nadrzędnym celem w postaci efektywnego działania, a nie utworzenia wiernego modelu otoczenia.
- W uczeniu ze wzmacnianiem stosowany system nagród i kar (metoda Q – learning, robot i otoczenie zapisane w postaci automatów skończonych).

Planowanie toru ruchu robota – Metody inspirowane biologicznie

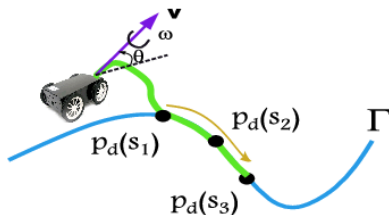
metoda Q – learning

- Robota i otoczenie modelujemy jako dwa zsynchronizowane automaty skończone (liczba stanów i liczba przejść jest skończona).
- Robot posiada skuteczną procedurę określania stanu opisującego otoczenie robota (informacje z czujników).
- Robot wypracowuje akcję i oddziałuje na otoczenie (poprzez sterowania określane jako prawo sterowania) zmieniając jego stan.
- Wykonane działanie ocenia funkcja nagrody. Robot jest nagradzany za osiągnięcie poszczególnych podcelów, które przybliżają go do celu.
- Celem robota jest znalezienie optymalnej strategii sterowania, która istnieje i wynika z zasady optymalności Bellmana. Strategia optymalna wybiera dla każdego stanu akcję, która maksymalizuje funkcję nagrody.
- Q - strategia jest sparametryzowana współczynnikami liczbowymi, których właściwy dobór jest trudny. Trudne jest również ustalenie funkcji nagrody.

Planowanie trajektorii



(a) trajectory tracking



(b) path following

Metody planowania trajektorii robota wzdłuż zadanego toru ruchu:

- Ciągłe zadanie planowania trajektorii wzdłuż zadanego toru ruchu
- Dyskretna płaszczyzna fazowa i metoda programowania dynamicznego Metody otaczania dla zadania z czasem swobodnym Metody otaczania dla zadania z czasem ustalonym

Metody planowania trajektorii robota niewymagające toru ruchu:

- Podejście wariacyjne
- Metoda bazująca na Zasadzie Maksimum

Opowiedziano:

- 1 Planowanie (toru/trajektorii) ruchu manipulatorów i robotów mobilnych – objaśnienie pojęć
- 2 Metody interpolacyjne bazujące na modelu kinematyki robotów
- 3 Metody oparte na przeszukiwaniu przestrzeni stanu:
 - metody grafowe
 - metody inspirowane biologicznie

Wspomniano:

- 1 Metody planowania trajektorii wzdłuż zadanego toru ruchu
- 2 Metody planowania trajektorii niewymagające toru ruchu

Nie opowiedziano:

- Planowanie toru nieholonomicznych robotów mobilnych.



[1] I. Dułęba *Metody i algorytmy planowania ruchu robotów mobilnych i manipulacyjnych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001