Sztuczna Inteligencja

Soma Dutta

Wydział Matematyki i Informatyki, UWM w Olsztynie
soma.dutta@matman.uwm.edu.pl

Wykład - 2: Algorytmy Przeszukiwania

Semestr letni 2022

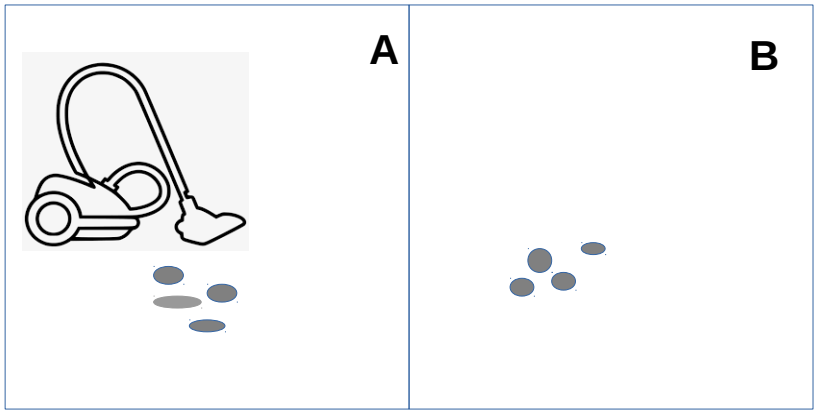
Podsumowanie ostatniego wykładu

- Komponenty inteligentnego agenta
  - Opis środowiska zadań agenta (PEAS)
  - Funkcja agenta i program agenta
- Różne klasyfikacje programu agenta
  - (i) Reprezentacja atomowa (Atomic representation)
  - (ii) Reprezentacja wielo-składnikowa/ rozposzona (Factored representation)
  - (iii) Reprezentacja ustrukturyzowana (Structured representation)

Algorytmy Przeszukiwania

- Algorytmy przeszukiwania w najprostszym przypadku związane z kategorią reprezentacji atomowej - np. znalezienie najkrótszej trasy między dwoma miastami
- Znalezienie możliwie najkrótszej trasy z jednego miasta do drugiego może zawierać połączenia, czas, koszty itp - Tutaj potrzebujemy algorytmów przeszukiwania z reprezentacją wielo-składnikową : Często algorytmy dla tego typu problemów nazywamy Algorytmami spełniającymi więzy (Constrained satisfaction algorithms)
- Dodajmy do poprzedniej sytuacji, że w jednym mieście na możliwie najkrótszej trasie nagle zdarzył się wypadek i wszystkie połączenia są opóźnione - znalezienia rozwiązania tej sytuacji nie da się opisać zestawem wcześniej zdefiniowanych atrybutów, tak jak w przypadku reprezentacji rozproszonych : Potrzebujemy tutaj relacyjnego opisu takich sytuacji, który jest związany z ustrukturyzowanymi reprezentacjami

Prosty agent odruchowy (Simple reflex agent)



Sekwencja percepcji	Akcja
[A, Czysty]	W prawo
[A, Brudny]	Ssuć
[B, Czysty]	W Lewo
[B, Brudny]	Ssuć
[A, Czysty] [A, Czysty]	W prawo
[A, Czysty] [A, Brudny]	Ssuć
⋮	⋮

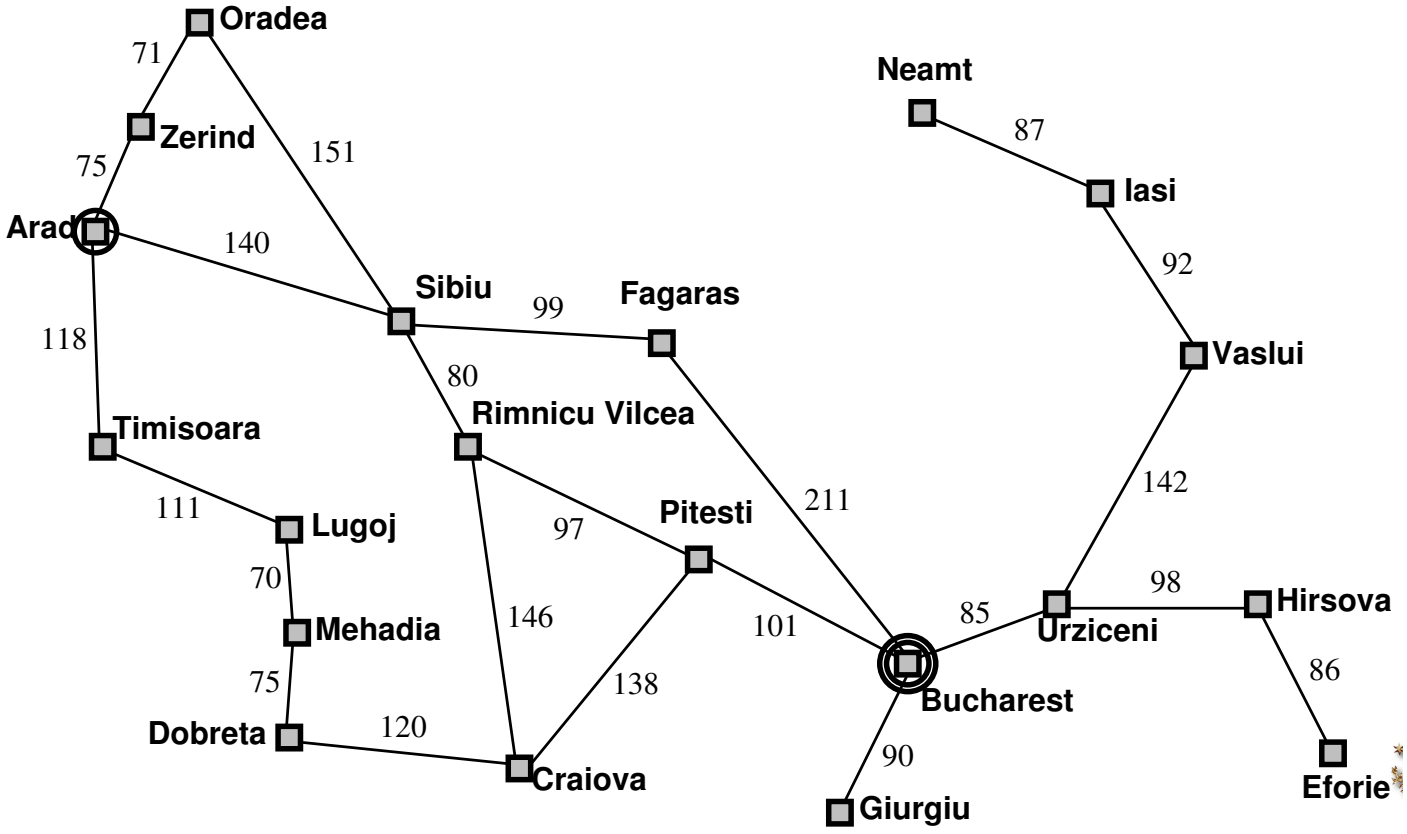
Algorytmy przeszukiwania w prostym przypadku

- Agent oparty na celach (Goal-based agent) (agent bazujący na celu) - nazywamy agentem do rozwiązywania problemów (problem solving agent)
- Budowanie agenta opartego na celach
  - Sformułuj problem (cel): Zestaw stanów spełniających cel
  - Przeszukaj Ścieżkę od stanu początkowego problemu do jednego ze stanów spełniających cel
  - Wykonaj algorytm przeszukiwania

Sformułowanie problemu

- Stan początkowy (Initial state): $In(s)$
- Opis możliwych działań dostępnych dla agenta: $ACTION(s)$
- Relacja przejścia opisujący wynik każdej akcji z określonego stanu : $RESULT(s, a)$ - zwraca stan, do którego można dotrzeć za pomocą jednej akcji - ten stan nazywany jest następnikiem poprzedniego stanu (successor of the previous state)
- (Goal test) Test celu w celu ustalenia, czy stan jest stanem celu
- (Path cost) Funkcja kosztu ścieżki przypisująca wartość liczbową każdej ścieżce. Koszt ścieżki może być sumą kosztów każdego pojedynczego działania ($c(s, a, s')$) tzn. kroku na ścieżce.

(State space of the problem) Przestrzeń stanu problemu jest zbiorem wszystkich stanów, które można osiągnąć ze stanu początkowego za pomocą sekwencji działań

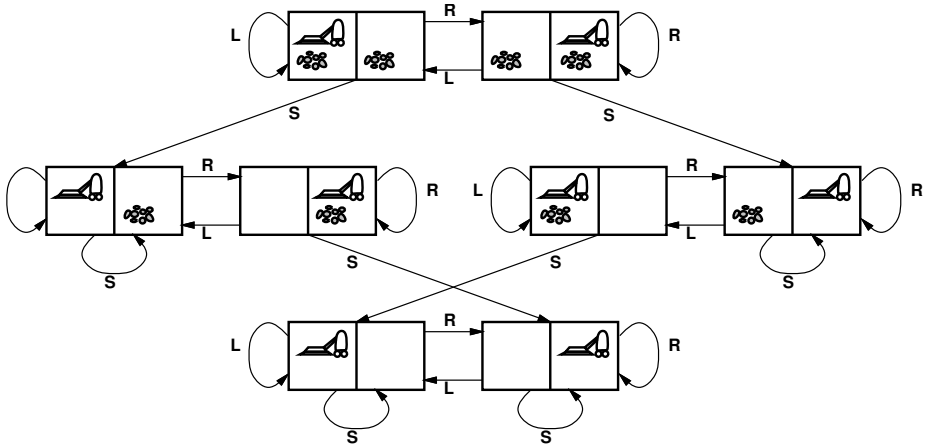


- Stan początkowy: In(Arad)
- Action(Arad) $= \{\rightarrow^{Z}, \rightarrow^{S}, \rightarrow^{T}\}$
- Stany następne Aradu: $\{Zerind, Sibiu, Timisoara\}$
- $Result(Arad, \rightarrow^{T}) =$ Timisoara
- $c(Arad, \rightarrow^{T}, Timisoara) = 118$
- Stan docelowy: Bucharest

Rozwiązanie problemu przeszukiwania

- (Solution) Rozwiązaniem jest sekwencja działań, która poczynając od stanu początkowego prowadzi do stanu docelowego (stanu spelniającego cel)
- (Optimal solution) Optymalne rozwiązanie to rozwiązanie, które ma najmniejszy koszt pośród wszystkich kosztów rozwiązań
- Algorytm przeszukiwania został zaprojektowany w celu znalezienia możliwej sekwencji działań, od stanu początkowego do stanu docelowego

Przykład: Odkurzacz



- stany: stan pomieszczeń (czysto/brudno) i lokalizacja robota
- akcje: *Lewo*, *Prawo*, *Odkurzaj*, *NicNieRob*
- cel: czysto
- koszt rozwiązania: 1 dla każdej akcji (0 dla *nicNieRob*)

Liczba stanów: $2 \times 2^2 = 8$

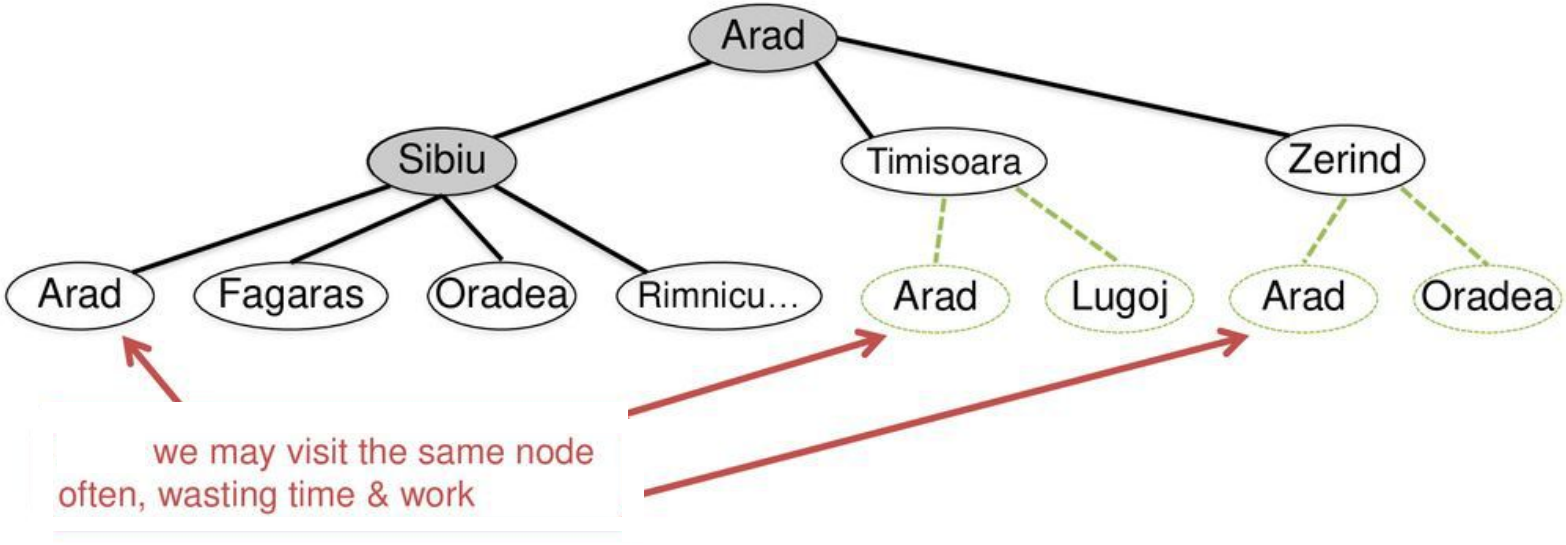
W większym środowisku z n lokalizacjami: $n \times 2^n$ stany

Przeszukiwanie drzewa

- Przeszukiwanie drzewa (Tree search):
  - Możliwe sekwencje akcji tworzą drzewo, którego korzeniem jest stan początkowy, a gałęzie odpowiadają różnym akcjom
  - Algorytm przeszukiwania rozpoczyna się od sprawdzenia, czy węzeł główny jest węzłem celu
  - Następnie proces realizowany przez algorytm rozwija kolejny zestaw węzłów, do których można dotrzeć z poprzedniego węzła - Zestaw węzłów dostępnych do rozszerzenia nazywa się granicą (frontier)
  - Proces rozszerzania granicy trwa aż do znalezienia rozwiązania lub do momentu gdy nie ma już stanów do rozszerzenia
  - Mogą istnieć różne algorytmy przeszukiwania drzewa w zależności od strategii wyboru węzła do rozwinięcia

Pseudokod dla przeszukiwania drzewa

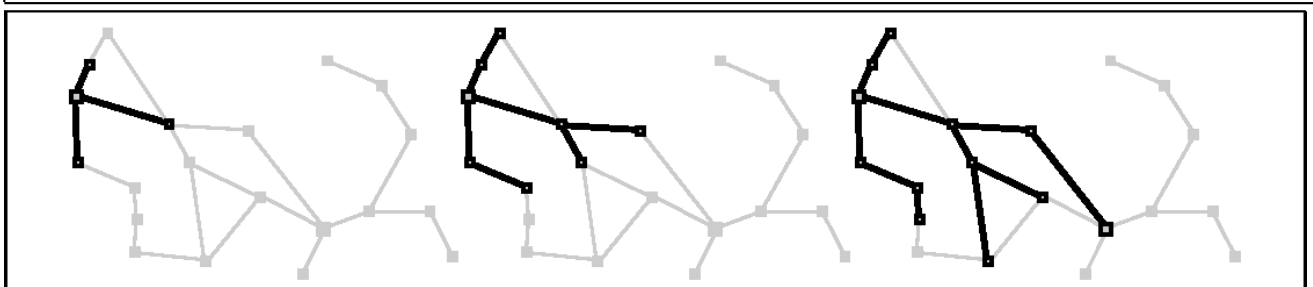
function TREE-SEARCH(problem) returns a solution, or faliure
initialize the frontier with initial state of the problem
Loop do
  if the frontier is empty then return faliure
  choose a leaf-node and remove it from frontier
  if the node contains a goal state return the corresponding solution
  expand the chosen node, adding the resulting node to the frontier



Przeszukiwanie grafów

- Przeszukiwanie grafu pozwala uniknąć powtarzania odwiedzania stanów

function GRAPH-SEARCH(problem) returns a solution, or faliure
initialize the frontier with initial state of the problem
initialize the explored set to be empty
Loop do
  if the frontier is empty then return faliure
  choose a leaf-node and remove it from frontier
  if the node contains a goal state return the corresponding solution
  add the node the explored set
  expand the chosen node, adding the resulting node to the frontier
    only if not in the frontier or explored set



A sequence of search trees generated by a graph search
At each stage, we have extended each path by one step. Notice that at the third stage, the northernmost city (Oradea) has become a dead end: both of its successors are already explored via other paths.

Struktura danych potrzebna do algorytmów przeszukiwania

- Algorytmy przeszukiwania korzystają z odpowiednich struktur danych, aby móc śledzić budowane drzewo lub graf
- Dla każdego węzła n wykorzystywane są struktury danych, które przechowujące następujące informacje
  - n.STATE: Stan w przestrzeni stanów, któremu odpowiada węzeł n
  - n.PARENT: Węzeł w drzewie wyszukiwania, z którego generowane jest n
  - n.ACTION: Działanie (akcja) zastosowane w węźle nadrzędnym w celu osiągnięcia węzła n
  - n.PATH-COST: $g(n)$ - Koszt ścieżki ze stanu początkowego do węzła n
- Dlatego węzeł zawiera informacje o stanie węzła, takie jak węzeł nadrzędny, dla którego generowane jest działanie, oraz koszt osiągnięcia tego stanu

Wykorzystanie kolejki (queue) w algorytmach przeszukiwania

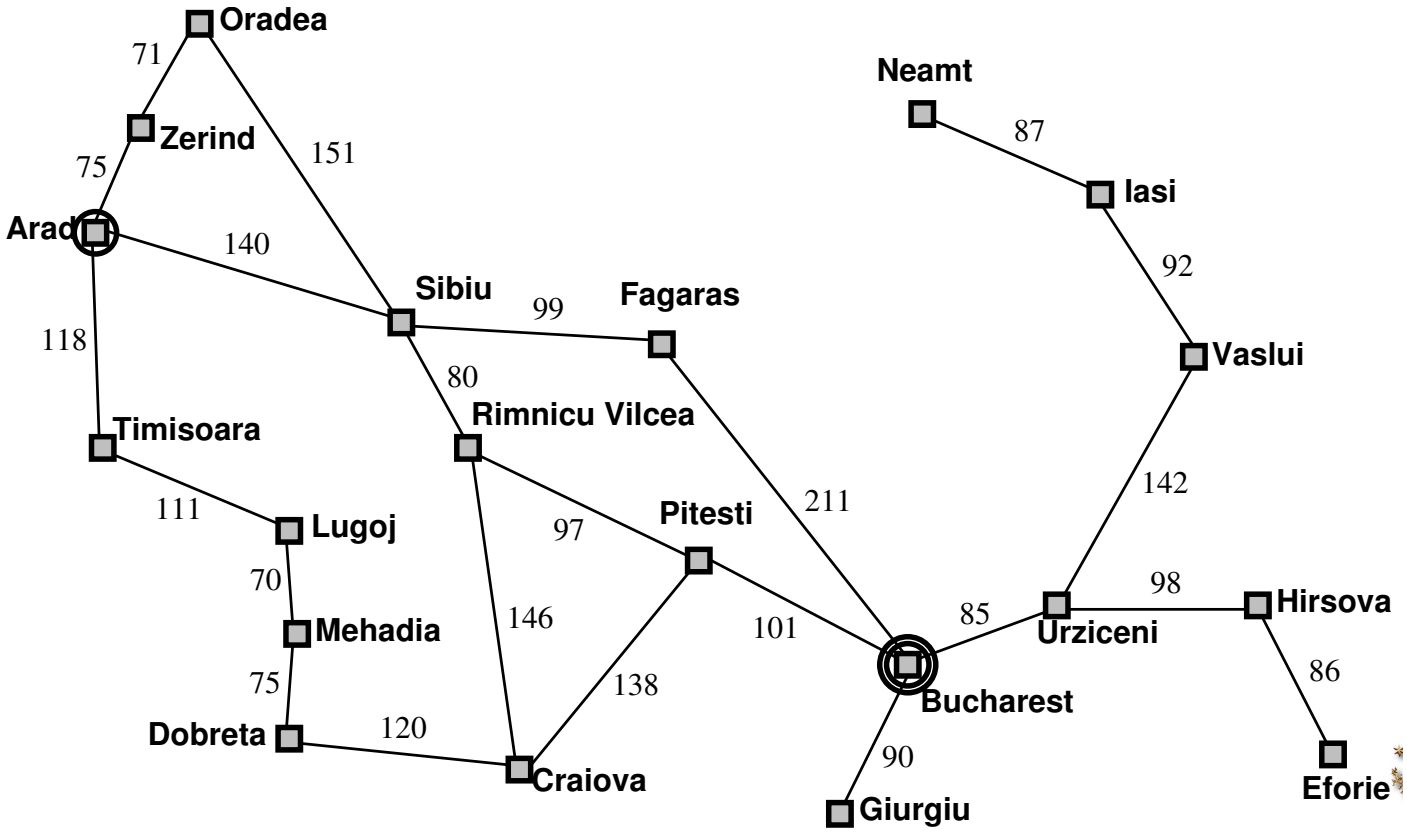
- Załóżmy, że musimy przechowywać 'frontier' w taki sposób, aby algorytmy przeszukiwania mogły łatwo wybrać następny węzeł do rozszerzenia zgodnie z preferowaną strategią
- Różne warianty kolejki są używane bazując na preferowanej strategii
  - FIFO (First In First Out): zwraca najstarszy element w kolejce
  - LIFO (Last In First Out): zwraca najnowszy element w kolejce
  - PRIORITY QUEUE: element o najwyższym priorytecie pojawia się w określonej kolejności przy tej strategii
- Możemy korzystać ze standardowych funkcji z dowolnej kolejki. Np.
  - Empty(queue)?: zwraca prawdę tylko wtedy, gdy w kolejce nie ma więcej elementów
  - Pop(queue): usuwa pierwszy element kolejki i zwraca go
  - Insert(element, queue): wstawia element i zwraca nową kolejkę

Aby śledzić eksplorowany zbiór

- Eksplorowany zbiór może być zaimplementowany przez ‘hash table’, która może skutecznie sprawdzać powtarzalność stanów

Różne aspekty pomiaru wydajności

- Wydajność (jakość) algorytmu można mierzyć na cztery sposoby:
  - Kompletność (Completeness): Czy algorytm gwarantuje znalezienie rozwiązania, o ile istnieje rozwiązanie?
  - Optymalność (Optimality): Czy algorytm znajduje optymalne rozwiązanie?
  - Złożoność czasowa (Time complexity): Ile czasu zajmuje znalezienie rozwiązania?
  - Złożoność pamięciowa (Space complexity): Ile pamięci potrzeba przy przeszukiwaniu?
- Złożoności czasowa i pamięciowa zależą od następujących czynników:
  - Czynnik rozgałęziający (Branching factor): b - maksymalna liczba następników dowolnego węzła
  - Głębokość (Depth): d - głębokość najbardziej płytkiego węzła docelowego
  - Maksymalna długość (Maximum length): m - maksymalna długość dowolnej ścieżki w przestrzeni stanów


Oradea
71
Neamt
Zerind
87
151
75
Iasi
Arad
140
92
Sibiu
99
Fagaras
118
Vaslui
80
Rimnicu Vilcea
Timisoara
142
111
Pitesti
211
Lugoj
97
98
70
Hirsova
146
85
Mehadia
101
Urziceni
75
86
138
Bucharest
Dobreta
120
90
Craiova
Eforie
Giurgiu

- b = 4
- d = 3
- m = 11 !

Koszt przeszukiwania

- Aby ocenić jakość algorytmu przeszukiwania, możemy wziąć pod uwagę koszt przeszukiwania.
- Koszt przeszukiwania może obejmować złożoność czasową i pamięciową.
- Można również rozważać całkowity koszt, który obejmuje koszt przeszukiwania i koszt ścieżki rozwiązania.

Podział strategii przeszukiwania

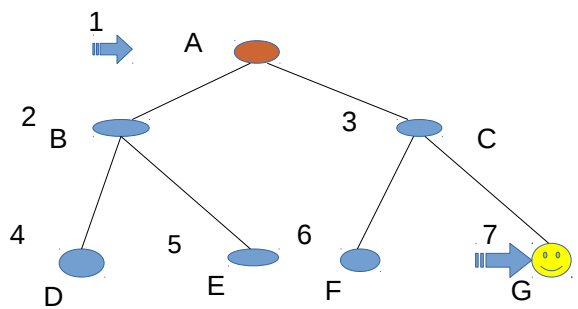
- Ślepe (Brutalne) strategie przeszukiwania (Uninformed/blind search strategies):
  - W tych strategiach nie są dostępne żadne dodatkowe informacje oprócz definicji problemu
  - Mogą generować następniki i odróżniać stan docelowy od innych stanów
- Heurystyczne strategie przeszukiwania (Informed/heuristic search strategies):
  - W tych strategiach poża definicją problemu wiadomo, czy jeden stan celu jest bardziej obiecujący niż drugi stan celu
  - Ponieważ heurystyki te mogą mieć zakodowaną wiedzę na temat konkretnego problemu, mogą skuteczniej znajdować rozwiązania

Brutalne (Ślepe) strategie przeszukiwania

- Breadth-first search (Przeszukiwanie wrzerz) przeszukiwania grafowego
  - najpierw rozwijany jest węzeł główny
  - następnie rozwijane są wszystkie następniki węzła głównego
  - ogólnie wszystkie węzły na danej głębokości są rozszerzane przed dowolnym węzłem na następnym poziomie
  - wykorzystywana jest kolejka FIFO
  - zawsze wybiera najkrótszą ścieżkę do każdego węzła należącego do zbioru wierzchołków bezpośrednio osiągalncyh z danego wierzchołka granicy (frontier)
- Pomiar wydajności (Miary jakości)
  - Kompletny: Jeśli najbliższy węzeł celu znajduje się na skończonej głębokości d, algorytm w końcu go znajdzie
  - Nieoptymalny: Najbliższy (do danego wierzchołka) węzeł docelowy niekoniecznie musi być optymalny. Jest optymalny, gdy koszt ścieżki nie jest funkcją malejącą (np. wszystkie działania mają taki sam koszt)

- Złożoność czasowa: $b + b^2 + \ldots + b^d = O(b^d)$
- Złożoność pamięciowa: $O(b^{d-1})$ ponieważ każdy węzeł wygenerowany dla ostatniego poziomu jest przechowywany w pamięci jako zbiór eksplorowany

```
function BREADTH-FIRST-SEARCH(problem) returns solution or faliure
node ← a node with STATE = problem.INITIAL-STATE, PATH-COST = 0
if problem.GOAL-TEST(node.STATE) then return SOLUTION(node)
frontier ← a FIFO queue with node as the only element
explored ← an empty set
loop do
  if EMPTY?(frontier) then return faliure
  node ← POP(frontier)    /* chooses the shallowest node */
  add node.STATE to explored
  for each action in problem.ACTIONs(node.STATE) do
    child ← CHILD-NODE(problem, node, action)
    if child.STATE is not in frontier or explored then
      if problem.GOAL-TEST(child.STATE) then return SOLUTION(child)
      frontier ← INSERT(child, frontier)
```

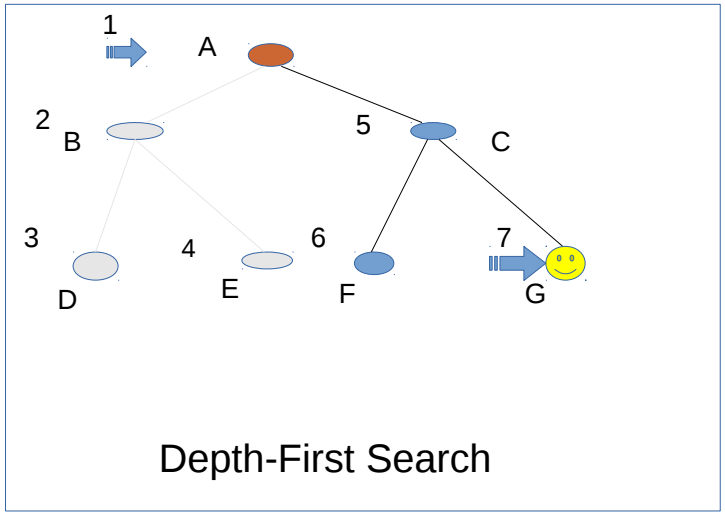


Brutalne strategie przeszukiwania

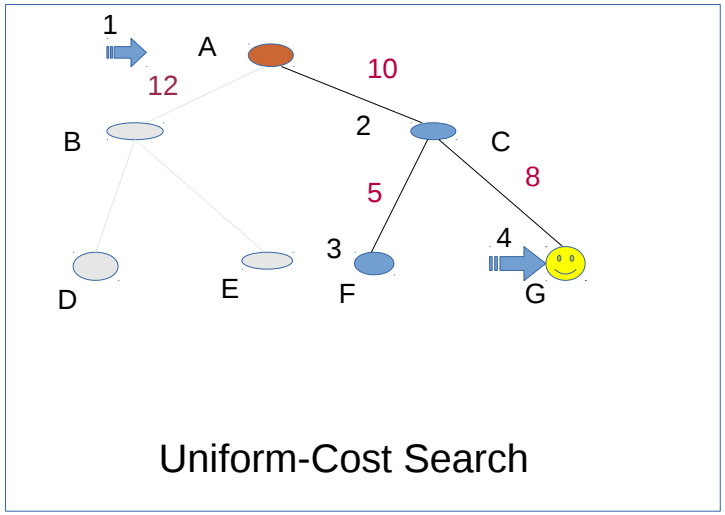
- Uniform cost search:
  - Zamiast rozszerzać ścieżkę do najpłytszego węzła, rozszerza węzeł n o ścieżkę o najniższym koszcie $g(n)$
  - Odbywa się to poprzez przechowywanie 'frontiers' jako kolejki priorytetowej (PRIORITY QUEUE) uporządkowanej według g
  - Test celu jest dodawany do węzła, gdy jest on wybierany do rozwinięcia, a nie kiedy jest generowany po raz pierwszy
  - Dodawany jest test, aby sprawdzić, czy istnieje lepsza ścieżka do węzła znajdującego się obecnie na 'frontier'
- Pomiar wydajności
  - Optymalny
  - Niekompletny: Ponieważ nie ma znaczenia liczba kroków na ścieżce, jeśli istnieje nieskończona pętla z działaniami o zerowym koszcie, program może utknąć
  - Złożoność czasowa i pamięciowa: Jeśli C jest kosztem optymalnego rozwiązania, a ϵ najmniejszym kosztem dla każdego działania, to złożoność czasowa i pamięciowa jest $O(b^{1+\lfloor \frac{C}{\epsilon} \rfloor})$.

Brutalne strategie przeszukiwania

- Depth-first search (Przeszukiwanie w głąb)
  - Rozszerza najgłębszy węzeł na bieżącej 'frontier'.
  - Natychmiast przechodzi do najgłębszego poziomu, w którym węzły nie mają następników, a potem przechodzi do następnego najgłębszego węzła, który wciąż nie został odwiedzony.
  - Używa kolejkę LIFO.



Depth-First Search



Uniform-Cost Search

Pomiar wydajności

- Kompletny: Kompletny gdy jest używany do przeszukiwania grafów w skończonej przestrzeni, i niekompletny gdy używana jest wersja przeszukiwania drzewa. W nieskończonej przestrzeni stanów, jeśli napotkamy nieskończoną ścieżkę nieposiadającą węzła celu, wówczas algorytm przeszukiwania nie byłby kompletny.
- Nieoptymalny
- Złożoność czasowa: Może wygenerować wszystkie węzły $O(b^m)$, co może być znacznie większe niż rozmiar przestrzeni stanów. Również m może być znacznie większe niż d.
- Złożoność pamięciowa: Przechowuje tylko jedną ścieżkę od korzenia do liścia i innego nieodwiedzonego 'syna'. Wymaga tylko przechowywania $O(bm)$ węzłów.

Brutalne strategie przeszukiwania

- Depth-limited search: Dodano wstępnie zdefiniowane ograniczenia na głębokość l
  - Niekompletny: Gdy $l < d$
  - Nieoptymalny: Gdy $l > d$
  - Złożoność czasowa: $O(b^l)$.
  - Złożoność pamięciowa: $O(bl)$.
- Iterative deepening search: Określa ograniczenie l poprzez iteracyjne poszukiwanie najlepszego ograniczenia, zaczynając od $l = 0$, aż do osiągnięcia celu gdy $l = d$.

- Kompletny: Gdy b jest skończone.
- Nieoptymalny: Gdy koszt ścieżki jest niemalejącą funkcją węzła głębokości.
- Złożoność czasowa: $O(b^d)$.
- Złożoność pamięciowa: $O(bd)$.

Brutalne strategie przeszukiwania

- Bidirectional search (Przeszukiwanie dwukierunkowe)
  - Wprowadza dwa jednoczesne przeszukiwania - jedno w przód od stanu początkowego, a drugie w tył z jednego z węzłów docelowych.
  - Kiedy 'frontiers' dwóch przeszukiwań przecinają się, osiągany jest węzeł celu.
  - Złożoność czasowa jest znacznie mniejsza - $2b^{\frac{d}{2}}$.

Dziękuję za uwagę