Sztuczna inteligencja. Przestrzeń przekonań. Przeszukiwanie z wiedzą o problemie

Paweł Rychlikowski

Instytut Informatyki UWr

13 marca 2024

Część 1

Przestrzeń przekonań (agent ma wiedzę o świecie, jest ona elementem stanu)

Problemy bezczujnikowe (sensorless)

- Czujniki są drogie. Czasem wolimy na przykład znaleźć sekwencje akcji, która doprowadzi do celu niezależnie od stanu.

Problemy bezczujnikowe (sensorless)

- Czujniki są drogie. Czasem wolimy na przykład znaleźć sekwencje akcji, która doprowadzi do celu niezależnie od stanu.
- Przykład 1 Szeroko działający antybiotyk
- Przykład 2 Robot w linii produkcyjnej, który składa jakieś części wykonując akcje niezależne od tego, jak te części się ułożyły.

Problemy bezczujnikowe (sensorless)

- Czujniki są drogie. Czasem wolimy na przykład znaleźć sekwencje akcji, która doprowadzi do celu niezależnie od stanu.
- Przykład 1 Szeroko działający antybiotyk
- Przykład 2 Robot w linii produkcyjnej, który składa jakieś części wykonując akcje niezależne od tego, jak te części się ułożyły.

Uwaga

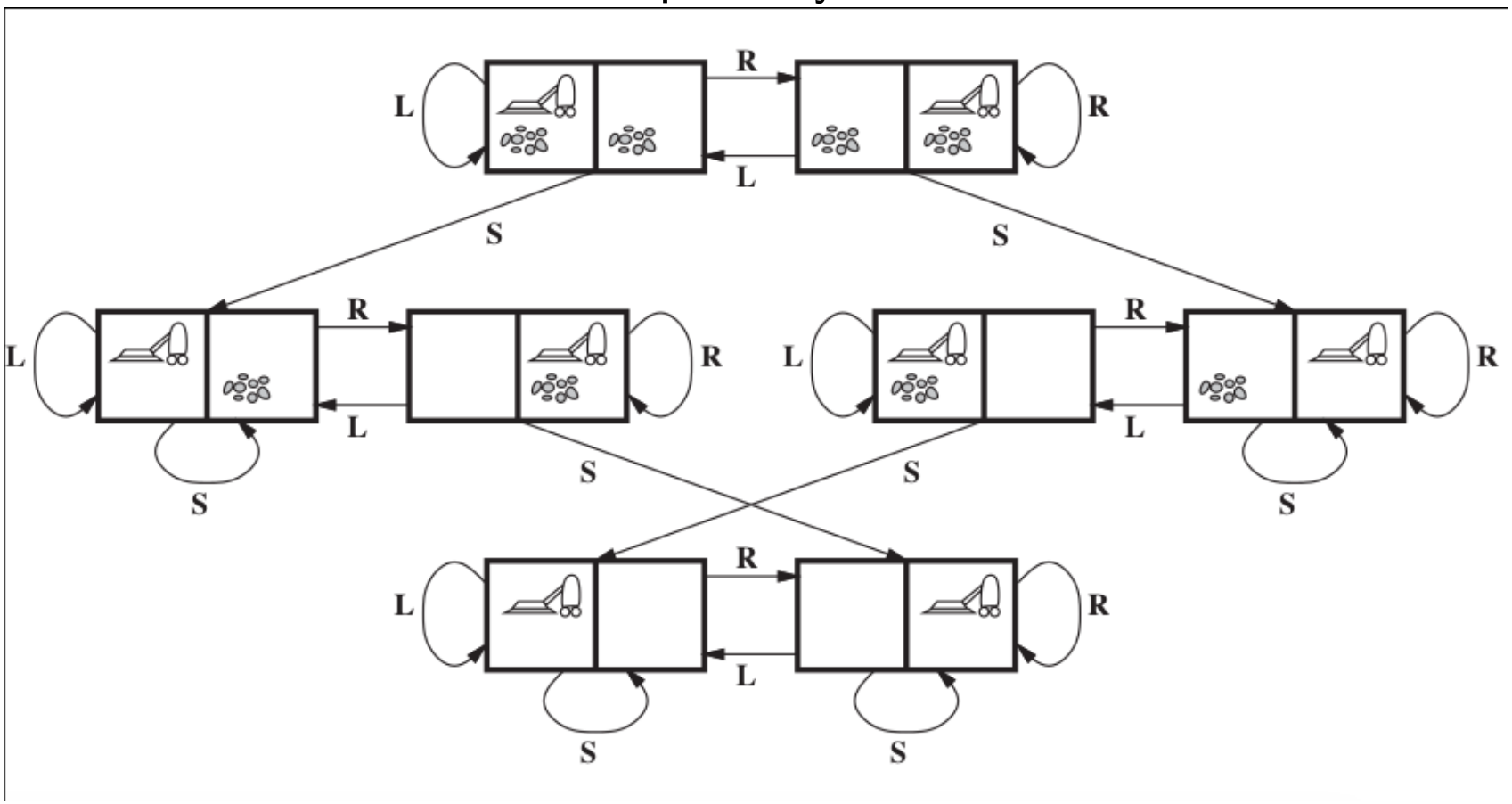
Oczywiście rozwiązanie problemu bezczujkowego nie jest optymalne w środowisku z dostępem do sensorów. Zakładamy na przykład, że pewne akcje będą „puste".

Problemy bezczujnikowe (przykładowy odkurzacz)

Wszyscy wiemy o inteligentych odkurzaczach. Ten będzie trochę prostszy:

Problemy bezczujnikowe (przykładowy odkurzacz)

Wszyscy wiemy o inteligentych odkurzaczach. Ten będzie trochę prostszy:



Przestrzeń przekonań

Definicja

Stanem przekonań jest zbiór stanów oryginalnego problemu, w których agent (być może) się znajduje.

Przestrzeń przekonań

Definicja

Stanem przekonań jest zbiór stanów oryginalnego problemu, w których agent (być może) się znajduje.

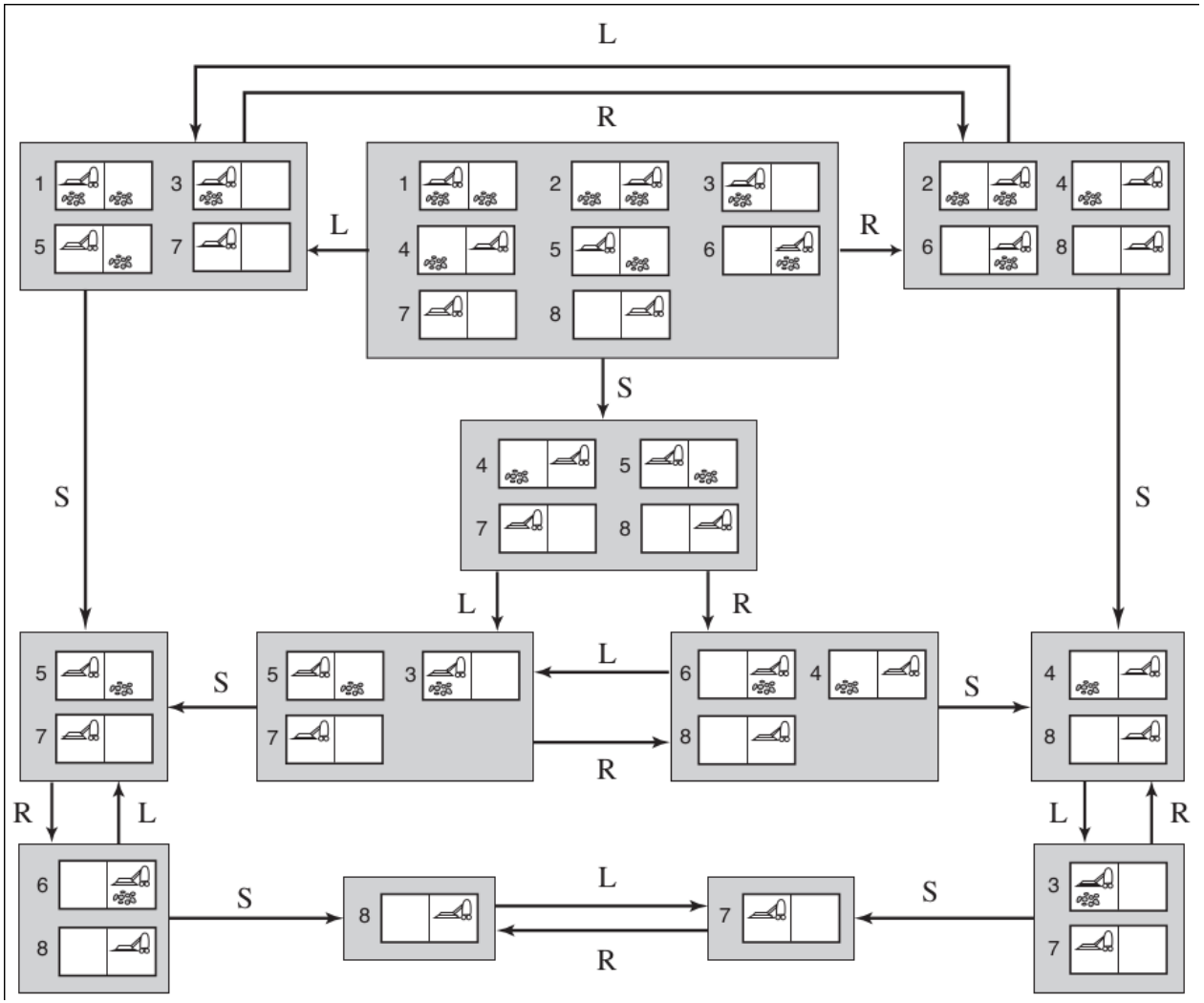
Pytanie 1

Jak się poruszać w takiej przestrzeni?

Pytanie 2

Jaka sekwencja akcji jest rozwiązaniem problemu bezczujnikowego (napiszmy ją na tablicy).

Przestrzeń przekonań odkurzacza. Przykład



(pętle dla wszystkich stanów usunięte ze względu na czytelność.)

Graf przestrzeni przekonań

1. Przejścia w przestrzeni przekonań powstają przez zaaplikowanie funkcji przejścia do stanu (obliczenia obrazu funkcji)

Graf przestrzeni przekonań

1. Przejścia w przestrzeni przekonań powstają przez zaaplikowanie funkcji przejścia do stanu (obliczenia obrazu funkcji)
2. Stan jest końcowy jeżeli **wszystkie** stany w nim zawarte są końcowe.

Graf przestrzeni przekonań

1. Przejścia w przestrzeni przekonań powstają przez zaaplikowanie funkcji przejścia do stanu (obliczenia obrazu funkcji)
2. Stan jest końcowy jeżeli **wszystkie** stany w nim zawarte są końcowe.
3. Koszt jednostkowy (jeżeli oryginalny był jednostkowy)

Graf przestrzeni przekonań

1. Przejścia w przestrzeni przekonań powstają przez zaaplikowanie funkcji przejścia do stanu (obliczenia obrazu funkcji)
2. Stan jest końcowy jeżeli **wszystkie** stany w nim zawarte są końcowe.
3. Koszt jednostkowy (jeżeli oryginalny był jednostkowy)
4. Stan startowy: zbiór wszystkich stanów.

Komandos z mapą. Mniej trywialny przykład

- Rozważmy zadanie, w którym do labiryntu wrzucony zostaje komandos z mapą...
- ale zrzut jest w nocy i nie wiadomo, gdzie trafił.

Komandos z mapą. Mniej trywialny przykład

- Rozważmy zadanie, w którym do labiryntu wrzucony zostaje komandos z mapą...
- ale zrzut jest w nocy i nie wiadomo, gdzie trafił.
- Problem:

  znajdź sekwencję akcji, która ***na pewno*** *doprowadzi do jednego z celów (akcje niedozwolone nie przesuwają komandosa).*

Komandos. Jak go rozwiązać

- Zadanie z komandosem będzie na liście P2.
- Zbadajmy, jak działa taka przestrzeń przekonań.

Komandos. Jak go rozwiązać

- Zadanie z komandosem będzie na liście P2.
- Zbadajmy, jak działa taka przestrzeń przekonań.

Zmniejszanie niepewności

Zobaczmy, jakie są możliwości zmniejszania niepewności w tym zadaniu (program `commando_z_wykladu.py`).

Część 2

Przeszukiwanie z z wiedzą o problemie (informed search)

Część 2

Przeszukiwanie z z wiedzą o problemie (informed search)

Przypomnienie: przeszukiwanie bez (?) wiedzy o problemie

- BFS, DFS (klasyczne grafowe przeszukiwanie)
- DLS, Iterative Deepening (to ostatnie, to warta rozważenia opcja)
- UCS/Dijskstra („lepszy BFS", modelujący różne wagi)
- Przeszukiwanie dwukierunkowe

Dodatkowa wiedza o problemie

- Opłaca się iść w kierunku rozwiązania.
- Co to oznacza?

Dodatkowa wiedza o problemie

- Opłaca się iść w kierunku rozwiązania.
- Co to oznacza?

Zakładamy, że umiemy szacować odległość od rozwiązania.

Dodatkowa wiedza o problemie

- Opłaca się iść w kierunku rozwiązania.
- Co to oznacza?

Zakładamy, że umiemy szacować odległość od rozwiązania.

Przykłady

Dodatkowa wiedza o problemie

- Opłaca się iść w kierunku rozwiązania.
- Co to oznacza?

Zakładamy, że umiemy szacować odległość od rozwiązania.

Przykłady

1. Odległość w linii prostej w zadaniu szukania drogi.
2. Odległość taksówkowa (Manhattan distance) w labiryncie.

Przeszukiwanie zachłanne

- Rozwijamy ten węzeł, który wydaje się najbliższu rozwiązania.

Przeszukiwanie zachłanne

- Rozwijamy ten węzeł, który wydaje się najbliższu rozwiązania.
- Proste, intuicyjne, ale są problemy. Jakie?

Przeszukiwanie zachłanne

- Rozwijamy ten węzeł, który wydaje się najbliższu rozwiązania.
- Proste, intuicyjne, ale są problemy. Jakie?

Można ten algorytm „oszukiwać”, w skrajnym przypadku sprawić, żeby rozwiązanie w ogóle nie zostało znalezione

Algorytm A*

Definicje

- $g(n)$ – koszt dotarcia do węzła n
- $h(n)$ – szacowany koszt dotarcia od n do (najbliższego) punktu docelowego ($h(s) \geq 0$)
- f(n) = g(n) + h(n)

Algorytm A*

Definicje

- $g(n)$ – koszt dotarcia do węzła n
- $h(n)$ – szacowany koszt dotarcia od n do (najbliższego) punktu docelowego ($h(s) \geq 0$)
- f(n) = g(n) + h(n)

Algorytm

Przeprowadź przeszukanie, wykorzystując $f(n)$ jako priorytet węzła (czyli rozwijamy węzły od tego, który ma najmniejszy f).

Algorytm A*. Uwagi

- Zwróćmy uwagę, że algorytm przypomina BFS (w którym, jak pamiętamy, używamy kolejki FIFO) oraz algorytm UCS (uniform cost search, Dijkstry).

Algorytm A*. Uwagi

- Zwróćmy uwagę, że algorytm przypomina BFS (w którym, jak pamiętamy, używamy kolejki FIFO) oraz algorytm UCS (uniform cost search, Dijkstry).
- Jedyną różnicą między A* i UCS jest użycie funkcji f, a nie funkcji g jako priorytetu w kolejce priotytetowej.

Wymagania dla heurystyki

Oczywiście od wyboru funkcji h (nazywanej heurystyką) zależą właściwości algorytmu A^*

Wymagania dla heurystyki

Oczywiście od wyboru funkcji h (nazywanej heurystyką) zależą właściwości algorytmu A^*

Wymienimy najważniejsze właściwości funkcji h.

1. **Nieujemna**: $h(s) \geq 0$, dla każdego s
2. **Rozsądna**: $h(s_{\text{end}}) = 0$

Wymagania dla heurystyki

Oczywiście od wyboru funkcji h (nazywanej heurystyką) zależą właściwości algorytmu A^*

Wymienimy najważniejsze właściwości funkcji h.

1. **Nieujemna**: $h(s) \geq 0$, dla każdego s
2. **Rozsądna**: $h(s_{\text{end}}) = 0$
3. **Dopuszczalna** (admissible):
   $h(s) \leq$ prawdziwy koszt dotarcia ze stanu s do stanu końcowego

Wymagania dla heurystyki

Oczywiście od wyboru funkcji h (nazywanej heurystyką) zależą właściwości algorytmu A^*

Wymienimy najważniejsze właściwości funkcji h.

1. **Nieujemna**: $h(s) \geq 0$, dla każdego s
2. **Rozsądna**: $h(s_{\text{end}}) = 0$
3. **Dopuszczalna** (admissible):
   $h(s) \leq$ prawdziwy koszt dotarcia ze stanu s do stanu końcowego
   Inaczej: **optymistyczna**

Wymagania dla heurystyki

Oczywiście od wyboru funkcji h (nazywanej heurystyką) zależą właściwości algorytmu A^*

Wymienimy najważniejsze właściwości funkcji h.

1. **Nieujemna**: $h(s) \geq 0$, dla każdego s
2. **Rozsądna**: $h(s_{\text{end}}) = 0$
3. **Dopuszczalna** (admissible):
   $h(s) \leq$ prawdziwy koszt dotarcia ze stanu s do stanu końcowego
   Inaczej: **optymistyczna**
4. **Spójna** (consistent), s_1, s_2 to sąsiednie stany:

$$\text{cost}(s_1, s_2) + h(s_2) \geq h(s_1)$$

Ostatnia własność przypomina własność trójkąta w definicji metryki (na tablicy)

O optymizmie

Pojęcie **optymistyczna** wydaje się dość intuicyjne w kontekście heurystyki.

O optymizmie

Pojęcie **optymistyczna** wydaje się dość intuicyjne w kontekście heurystyki.
Zwróćmy uwagę, że:

- Dla zadania: dojechać z punktu A do B po drogach publicznych, heurystyka szacująca koszt dotarcia do B jako odległość euklidesową z punktu X, w którym jesteśmy, do celu jest optymistyczna:

O optymizmie

Pojęcie **optymistyczna** wydaje się dość intuicyjne w kontekście heurystyki.
Zwróćmy uwagę, że:

- Dla zadania: dojechać z punktu A do B po drogach publicznych, heurystyka szacująca koszt dotarcia do B jako odległość euklidesową z punktu X, w którym jesteśmy, do celu jest optymistyczna:
  zakładamy bowiem optymistycznie, że istnieje prosta, pozbawiona zakrętów droga prościutko do B

O optymizmie

Pojęcie **optymistyczna** wydaje się dość intuicyjne w kontekście heurystyki.
Zwróćmy uwagę, że:

- Dla zadania: dojechać z punktu A do B po drogach publicznych, heurystyka szacująca koszt dotarcia do B jako odległość euklidesową z punktu X, w którym jesteśmy, do celu jest optymistyczna:
  zakładamy bowiem optymistycznie, że istnieje prosta, pozbawiona zakrętów droga prościutko do B
- Jeżeli podróżujemy po Manhattanie (czyli w miejscu, gdzie wszystkie drogi przecinają się pod kontem prostym), poprzednia heurystyka nadal będzie optymistyczna. Ale bardziej realistyczne będzie liczenie tzw. odległości taksówkowej, która jest po prostu sumą różnic na współrzędnych x oraz y.

O optymizmie

Pojęcie **optymistyczna** wydaje się dość intuicyjne w kontekście heurystyki.
Zwróćmy uwagę, że:

- Dla zadania: dojechać z punktu A do B po drogach publicznych, heurystyka szacująca koszt dotarcia do B jako odległość euklidesową z punktu X, w którym jesteśmy, do celu jest optymistyczna:
  zakładamy bowiem optymistycznie, że istnieje prosta, pozbawiona zakrętów droga prościutko do B
- Jeżeli podróżujemy po Manhattanie (czyli w miejscu, gdzie wszystkie drogi przecinają się pod kontem prostym), poprzednia heurystyka nadal będzie optymistyczna. Ale bardziej realistyczne będzie liczenie tzw. odległości taksówkowej, która jest po prostu sumą różnic na współrzędnych x oraz y.

O optymizmie

Jak wkrótce zobaczymy, wybór bardziej realistycznej (ale ciągle optymistycznej) heurystyki zaowocuje lepszym działaniem algorytmu A*.

Konwencja

- Ponieważ h ma być szacowaną odległością od celu, umówimy się, że własność **nieujemności** i **rozsądności** funkcji h są konieczne, żeby mówić o algorytmie $A*$
- Pozostałe dwie własności z poprzedniego slajdu (optymistyczna i spójna) są „mile widziane”, ale niekonieczne.

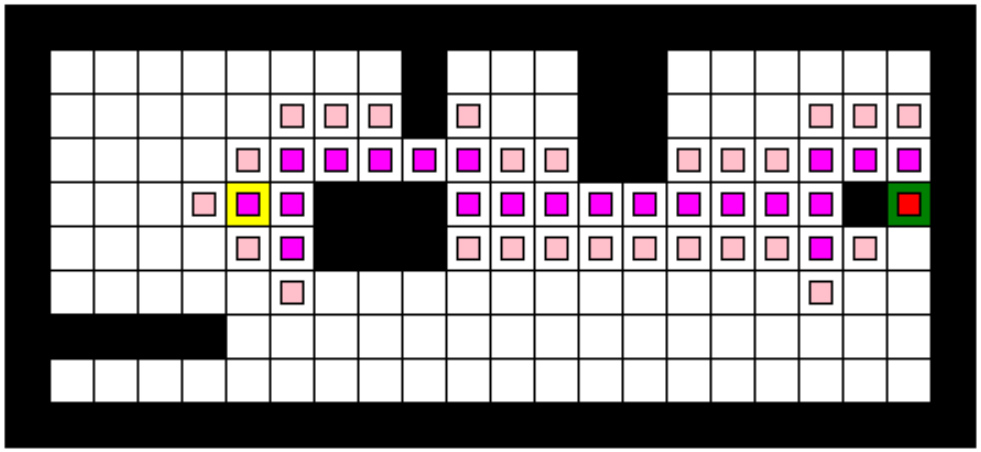
Kilka prostych faktów

1. UCS to A^* z super-optymistyczną heurystyką ($h(s) = 0$)

Kilka prostych faktów

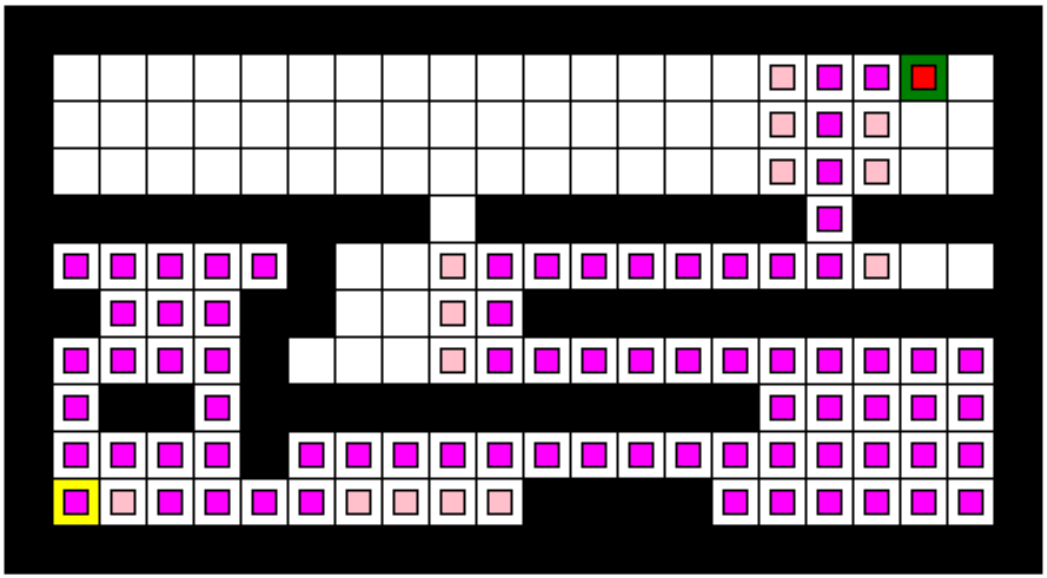
1. UCS to A^* z super-optymistyczną heurystyką (h(s) = 0)
2. Spójna heurystyka jest optymistyczna
   Dowód: Indukcja po węzłach (na ćwiczeniach, okolice C2)

A^* w labiryncie (1)



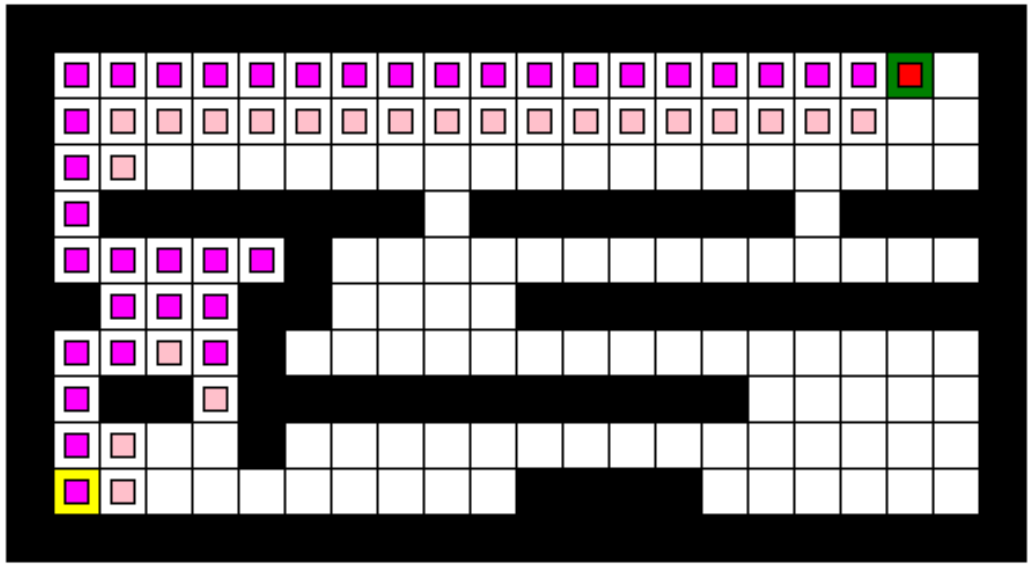
Używamy odległości taksówkowej między bieżącą kratką a celem jako heurystyki (czyli **optymistycznie** zakładamy, że nie spotkamy po drodze żadnej ściany).
Kolor różowy: węzy w kolejce, kolor purpurowy – węzły rozwinięte. Jedynie dwa rozwinięte węzły są poza optymalną ścieżka. Na tym rysunku (i kolejnych) widzimy stan algorytmu w momencie osiągnięcia węzła końcowego.

A^* w labiryncie (2)



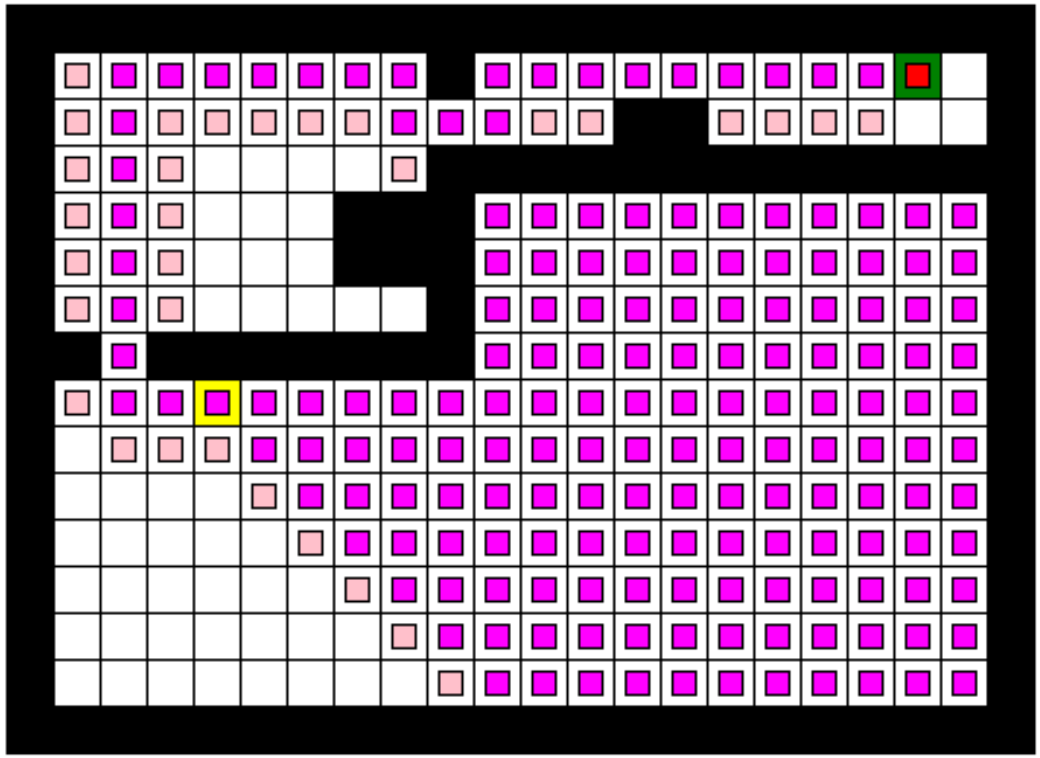
W dolnej części labiryntu heurystyka trochę prowadzi na manowce

A^* w labiryncie (3)



... ale jeżeli w poprzednim labiryncie przebić drzwi, to wówczas znowu jest prawie idealnie.

A^* w labiryncie (4)



Heurystyka mocno „oszukana” przebiegiem labiryntu.

Kontury A*

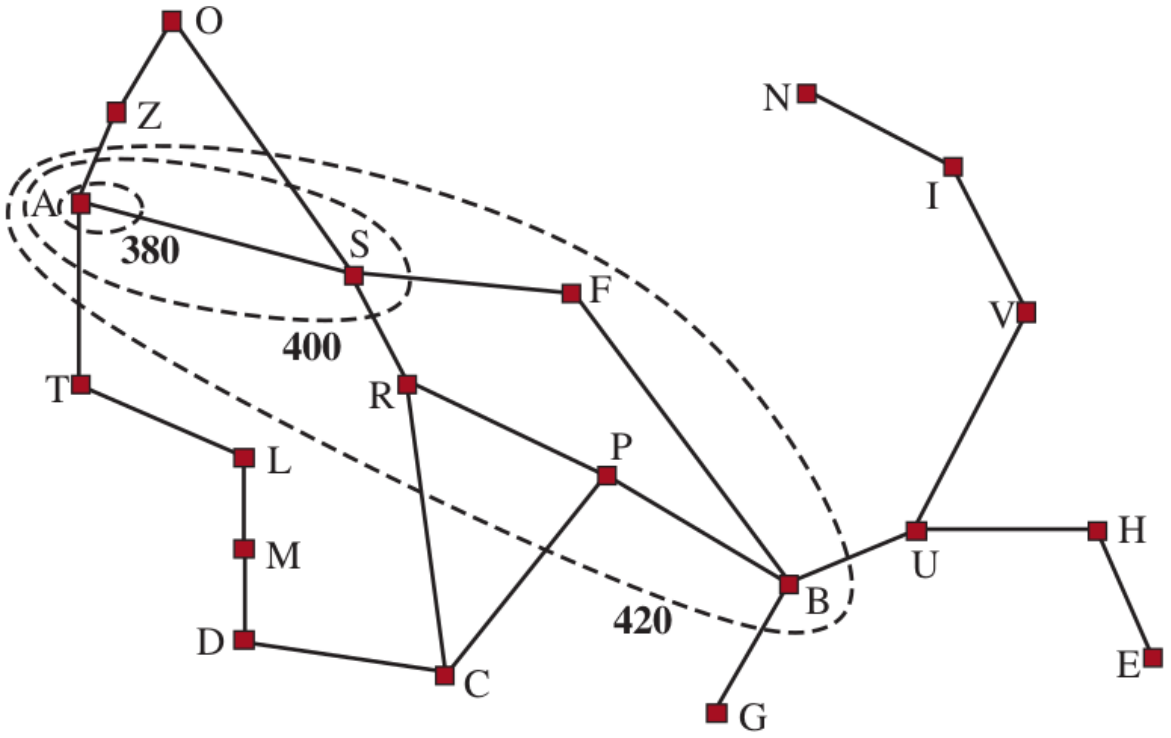


Figure 3.20 Map of Romania showing contours at $f = 380$, $f = 400$, and $f = 420$, with Arad as the start state. Nodes inside a given contour have $f = g + h$ costs less than or equal to the contour value.

(jedziemy z A do B)

Właściwości A^*

Twierdzenie 1

A^* jest zupełny (warunki jak dla UCS).

Właściwości A^*

Twierdzenie 1

A^* jest zupełny (warunki jak dla UCS).

Twierdzenie 2

Jeżeli h jest spójna, to A^* zwraca optymalną ścieżkę (wersja grafowa)

Właściwości A^*

Twierdzenie 1

A^* jest zupełny (warunki jak dla UCS).

Twierdzenie 2

Jeżeli h jest spójna, to A^* zwraca optymalną ścieżkę (wersja grafowa)

Twierdzenie 3

Jeżeli h jest optymistyczna, to A^* w drzewie zwraca optymalną ścieżkę.

Właściwości A^*

Twierdzenie 1

A^* jest zupełny (warunki jak dla UCS).

Twierdzenie 2

Jeżeli h jest spójna, to A^* zwraca optymalną ścieżkę (wersja grafowa)

Twierdzenie 3

Jeżeli h jest optymistyczna, to A^* w drzewie zwraca optymalną ścieżkę.

Dowody: będą, ale najpierw jeszcze trochę praktyki.

Drobna uwaga

$A*$ oczywiście nie daje gwarancji znalezienia rozwiązania dla grafów nieskończonych, w których istnieją nieskończone ścieżki o skończonej sumie wag krawędzi

Heurystyki dla ósemki

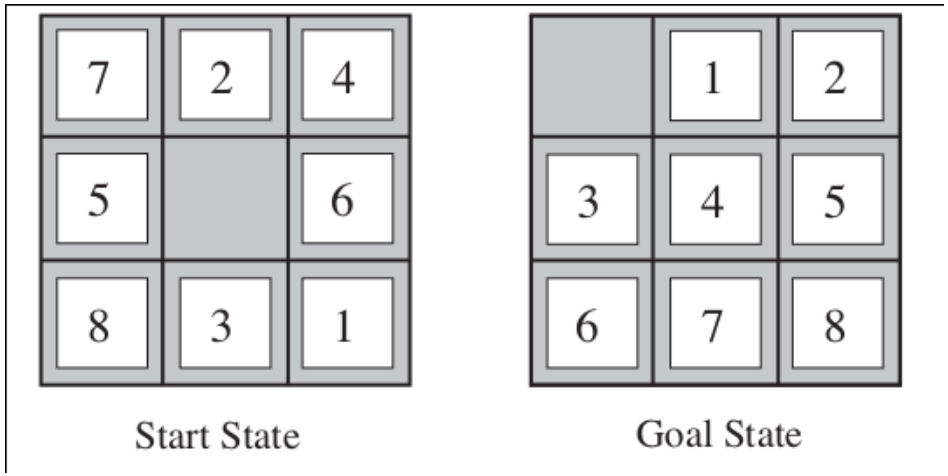
Uwaga

Pewne aspekty tworzenia heurystyk można dość dobrze prześledzić na przykładzie ósemki

Heurystyki dla ósemki

Uwaga

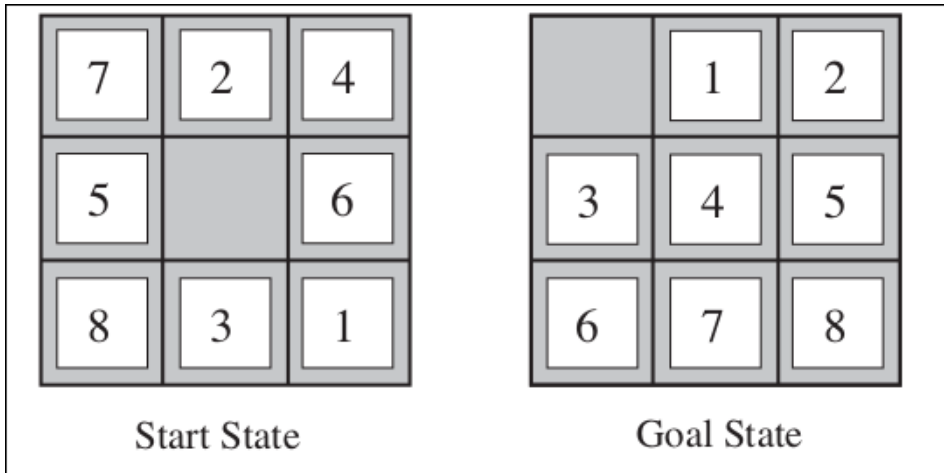
Pewne aspekty tworzenia heurystyk można dość dobrze prześledzić na przykładzie ósemki



Heurystyki dla ósemki

Uwaga

Pewne aspekty tworzenia heurystyk można dość dobrze prześledzić na przykładzie ósemki



Pytanie

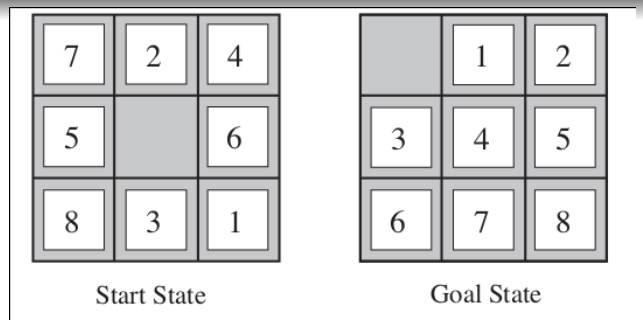
Jak (optymistycznie) oszacować odległość tych dwóch stanów?

- Heurystyka musi być prosta do policzenia.

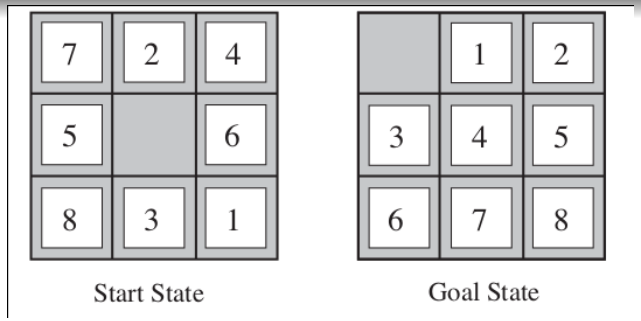
- Heurystyka musi być prosta do policzenia.
- Przy projektowaniu heurystyki kluczowe jest pilnowanie **optymizmu** (czyli że niedoszacujemy odległości).

- Heurystyka musi być prosta do policzenia.
- Przy projektowaniu heurystyki kluczowe jest pilnowanie **optymizmu** (czyli że niedoszacujemy odległości).
- Choć teoretycznie wymagany jest silniejszy warunek (spójności), ale w praktyce naturalne optymistyczne heurystyki są spójne...
- ... a o optymizm łatwiej zadbać (i łatwiej przypomnieć sobie definicję)

Heurystyki dla ósemki (2)



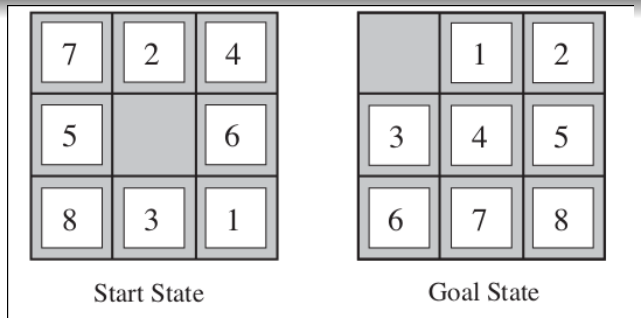
Heurystyki dla ósemki (2)



Pomysł 1

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi się ruszyć o co najmniej 1 krok. Zliczajmy zatem, ile kafelków jest poza punktem docelowym ($h_1(s) = 8$)

Heurystyki dla ósemki (2)

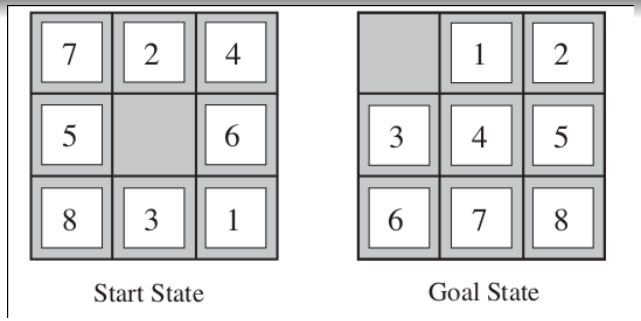


Pomysł 1

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi się ruszyć o co najmniej 1 krok. Zliczajmy zatem, ile kafelków jest poza punktem docelowym ($h_1(s) = 8$)

Pomysł 2

Heurystyki dla ósemki (2)



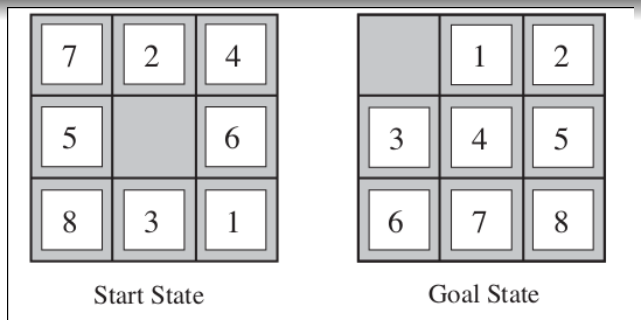
Pomysł 1

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi się ruszyć o co najmniej 1 krok. Zliczajmy zatem, ile kafelków jest poza punktem docelowym ($h_1(s) = 8$)

Pomysł 2

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi pokonać cały dystans do punktu docelowego. Zliczajmy zatem, ile kroków od celu jest każdy z kafelków ($h_2(s) = 3 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2 = 18$)

Heurystyki dla ósemki (2)



Pomysł 1

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi się ruszyć o co najmniej 1 krok. Zliczajmy zatem, ile kafelków jest poza punktem docelowym ($h_1(s) = 8$)

Pomysł 2

Jak coś jest nie na swoim miejscu, to musi pokonać cały dystans do punktu docelowego. Zliczajmy zatem, ile kroków od celu jest każdy z kafelków ($h_2(s) = 3 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2 = 18$)

Pytanie

Która intuicyjnie jest lepsza?

- Intuicja mówi, że jeżeli coś **dokładniej** szacujemy, to algorytm bazujący na tych dokładniejszych szacunkach będzie działał lepiej
- Z dwóch optymistycznych heurystyk ta, która daje większe wartości, jest dokładniejsza.

Efektywność w praktyce

- Dla h_2 efektywność A^* jest 50000 razy większa niż IDS.

Efektywność w praktyce

- Dla h_2 efektywność A^* jest 50000 razy większa niż IDS.
- Istnieją heurystyki dające jeszcze 10000 krotne przyspieszenie dla 15-ki, a milionowe dla 24-ki (wobec h_2)

Relaksacja

Kiedy możliwy jest ruch w łamigłówce ósemka? Docelowe pole jest: (koniunkcja warunków):

a) sąsiadujące

b) wolne

Relaksacja

Kiedy możliwy jest ruch w łamigłówce ósemka? Docelowe pole jest: (koniunkcja warunków):

a) sąsiadujące

b) wolne

Możemy rezygnować z części (lub wszystkich) warunków, otrzymując łatwiejsze łamigłówki.

Relaksacja

Kiedy możliwy jest ruch w łamigłówce ósemka? Docelowe pole jest: (koniunkcja warunków):

a) sąsiadujące

b) wolne

Możemy rezygnować z części (lub wszystkich) warunków, otrzymując łatwiejsze łamigłówki.

Uwaga

Liczba ruchów w łatwiejszym zadaniu od startu do punktu docelowego jest często sensowną heurystyką w zadaniu orygialnym.

Relaksacja

Heurystyka h_1

Ruch możliwy jest **zawsze**.

Relaksacja

Heurystyka h_1

Ruch możliwy jest **zawsze**.

Heurystyka h_2

Ruch możliwy jest **gdy pole jest obok** (niekoniecznie puste).

Relaksacja

Heurystyka h_1

Ruch możliwy jest **zawsze**.

Heurystyka h_2

Ruch możliwy jest **gdy pole jest obok** (niekoniecznie puste).

Heurystyka h_3

Ruch możliwy jest **gdy pole jest puste** (niekoniecznie obok).

Relaksacja na mapie

Relaksacja w zadaniu poszukiwania w labiryntach lub przy podróży samochodem drogami:

Relaksacja na mapie

Relaksacja w zadaniu poszukiwania w labiryntach lub przy podróży samochodem drogami:

1. W labiryncie: pomijanie ścian, czyli odległość taksówkową

Relaksacja na mapie

Relaksacja w zadaniu poszukiwania w labiryntach lub przy podróży samochodem drogami:

1. W labiryncie: pomijanie ścian, czyli odległość taksówkową
2. W atlasie drogowym: pomijanie dróg, czyli odległość euklidesową (helikopterem)

Operacja maksimum dla heurystyk

- Jak mamy dwie heurystyki h_1 i h_2, obie optymistyczne
- to możemy zdefiniować $h_3(x) = \max(h_1(x), h_2(x))$

Uwaga

h_3 też będzie optymistyczna!

Bazy wzorców

Heurystyki możemy budować korzystając z baz wzorców, zapamiętujących koszty rozwiązań podproblemów danego zadania.

Przykład: