Heuristiky, best-first search, A* search

Aleš Horák

E-mail: hales@fi.muni.cz

http://nlp.fi.muni.cz/uui/

Obsah:

- ➜ Informované prohledávání stavového prostoru
- ➜ Heuristické hledání nejlepší cesty
- ➜ Příklad – řešení posunovačky
- ➜ Příklad – rozvrh práce procesorů

Informované prohledávání stavového prostoru

Neinformované prohledávání:

- ➜ DFS, BFS a varianty
- ➜ nemá (téměř) žádné informace o pozici cíle – slepé prohledávání
- ➜ zná pouze:
  - počáteční/cílový stav
  - přechodovou funkci

INFORMOVANÉ PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

Neinformované prohledávání:

➜ DFS, BFS a varianty

➜ nemá (téměř) žádné informace o pozici cíle – slepé prohledávání

➜ zná pouze:

- počáteční/cílový stav
- přechodovou funkci

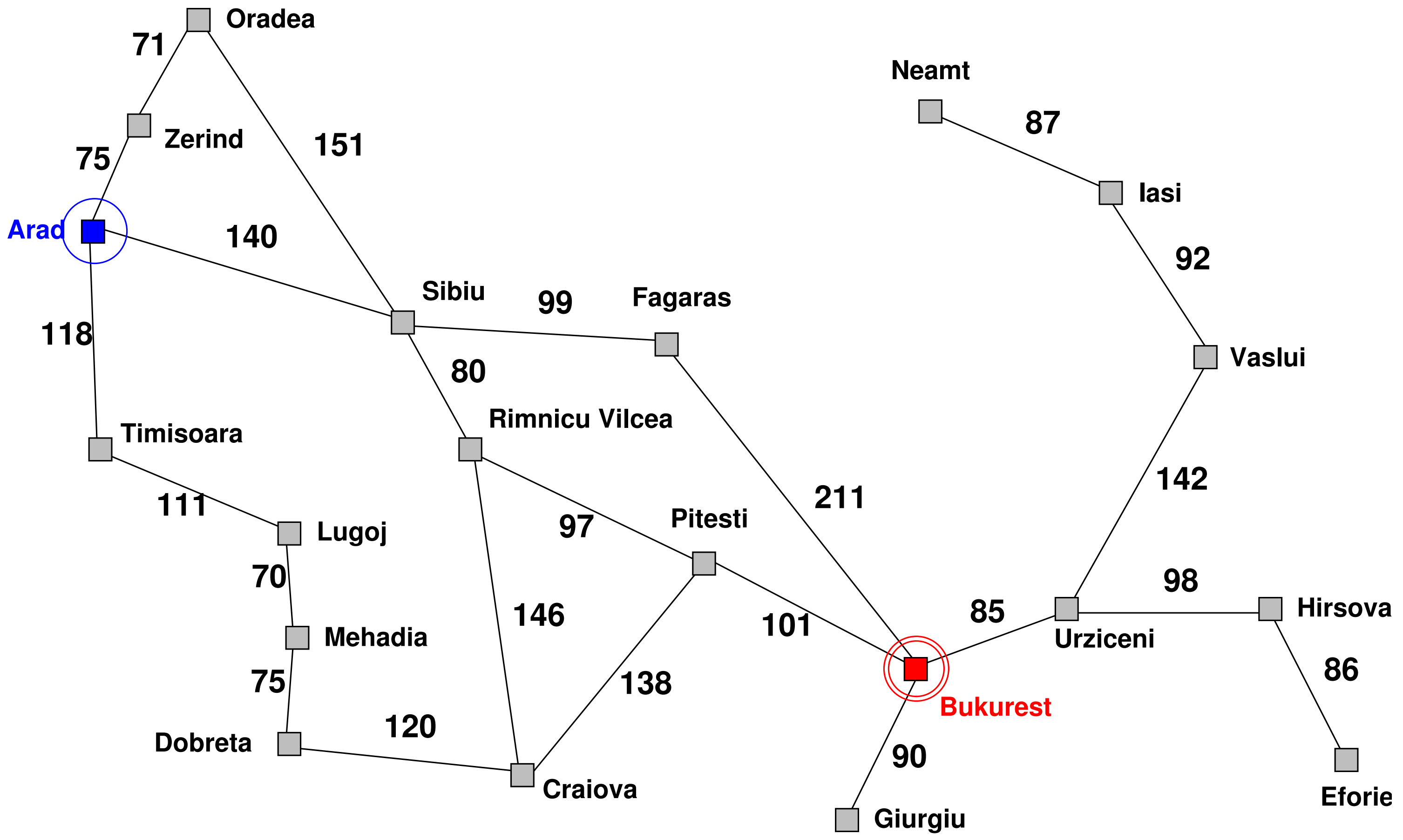
Informované prohledávání:

má navíc informaci o (odhadu) blízkosti stavu k cílovému stavu – heuristická funkce (heuristika)

Heuristické hledání nejlepší cesty

- Best-first Search
- použití ohodnocovací funkce $f(n)$ pro každý uzel – výpočet přínosu daného uzlu
- udržujeme seznam uzlů uspořádaný (vzestupně) vzhledem k $f(n)$
- použití heuristické funkce $h(n)$ pro každý uzel – odhad vzdálenosti daného uzlu od cíle
- čím *menší* $h(n)$, tím blíže k cíli, $h(\mathrm{Goal}) = 0$.
- nejjednodušší varianta – hladové heuristické hledání, *Greedy best-first search*
  $f(n) = h(n)$

Schéma rumunských měst



Arad	366
Bukurest	0
Craiova	160
Dobreta	242
Eforie	161
Fagaras	178
Giurgiu	77
Hirsova	151
Iasi	226
Lugoj	244
Mehadia	241
Neamt	234
Oradea	380
Pitesti	98
Rimnicu Vilcea	193
Sibiu	253
Timisoara	329
Urziceni	80
Vilcea	199
Zerind	374

Hladové heuristické hledání – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

ohodnocovací funkce $f(n) = h(n) = h_{\text{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti

HLADOVÉ HEURISTICKÉ HLEDÁNÍ – PŘÍKLAD

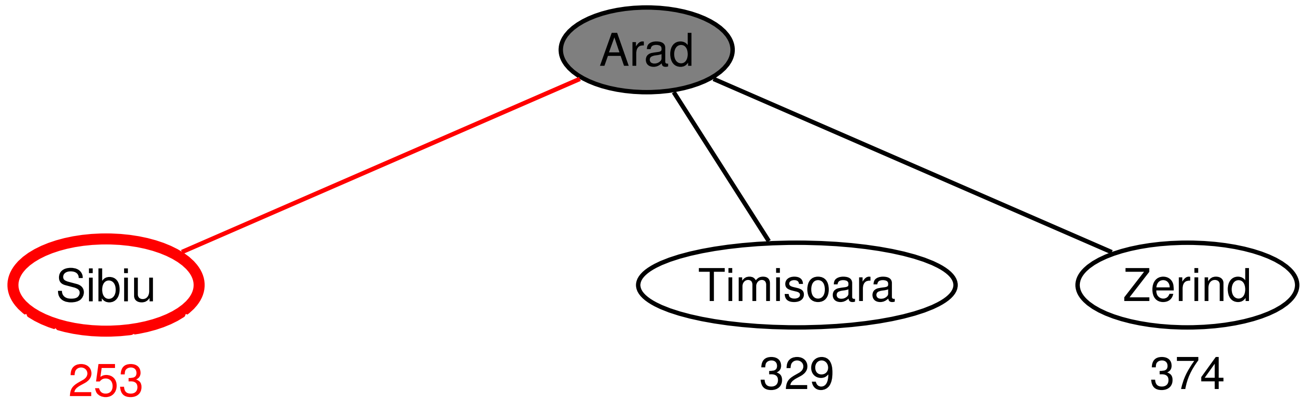
Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

ohodnocovací funkce $f(n) = h(n) = h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti

Hladové heuristické hledání – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

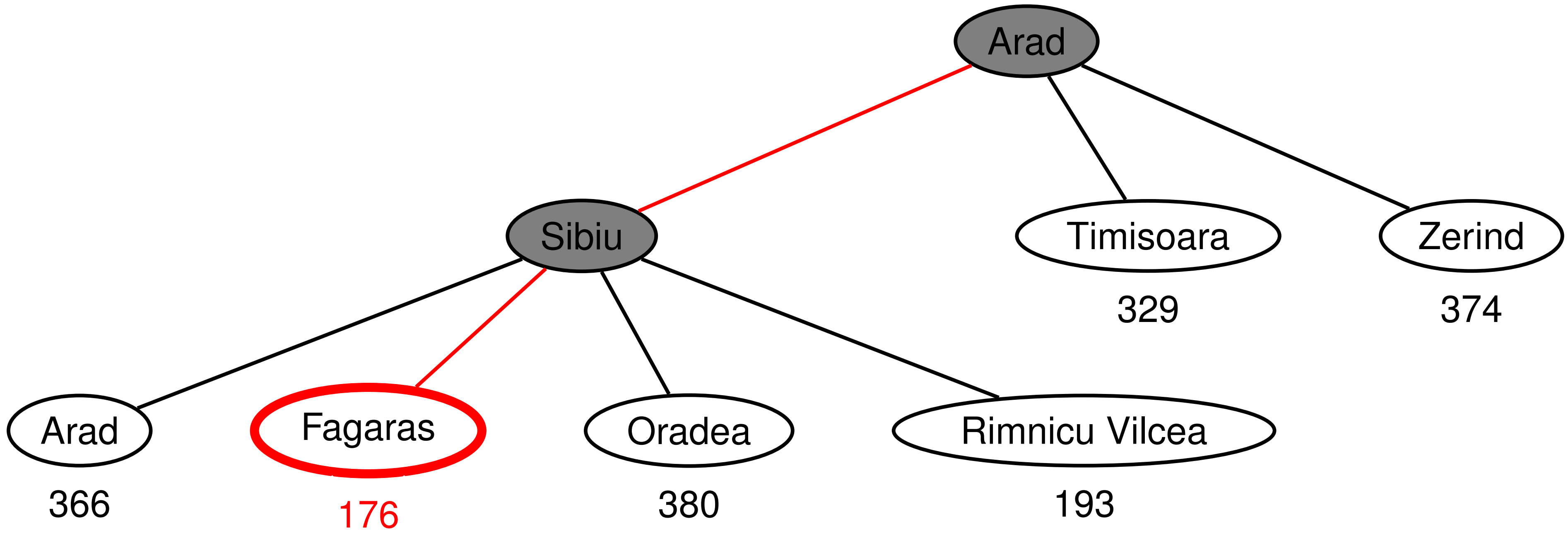
ohodnocovací funkce $f(n) = h(n) = h_{\text{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Hladové heuristické hledání – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

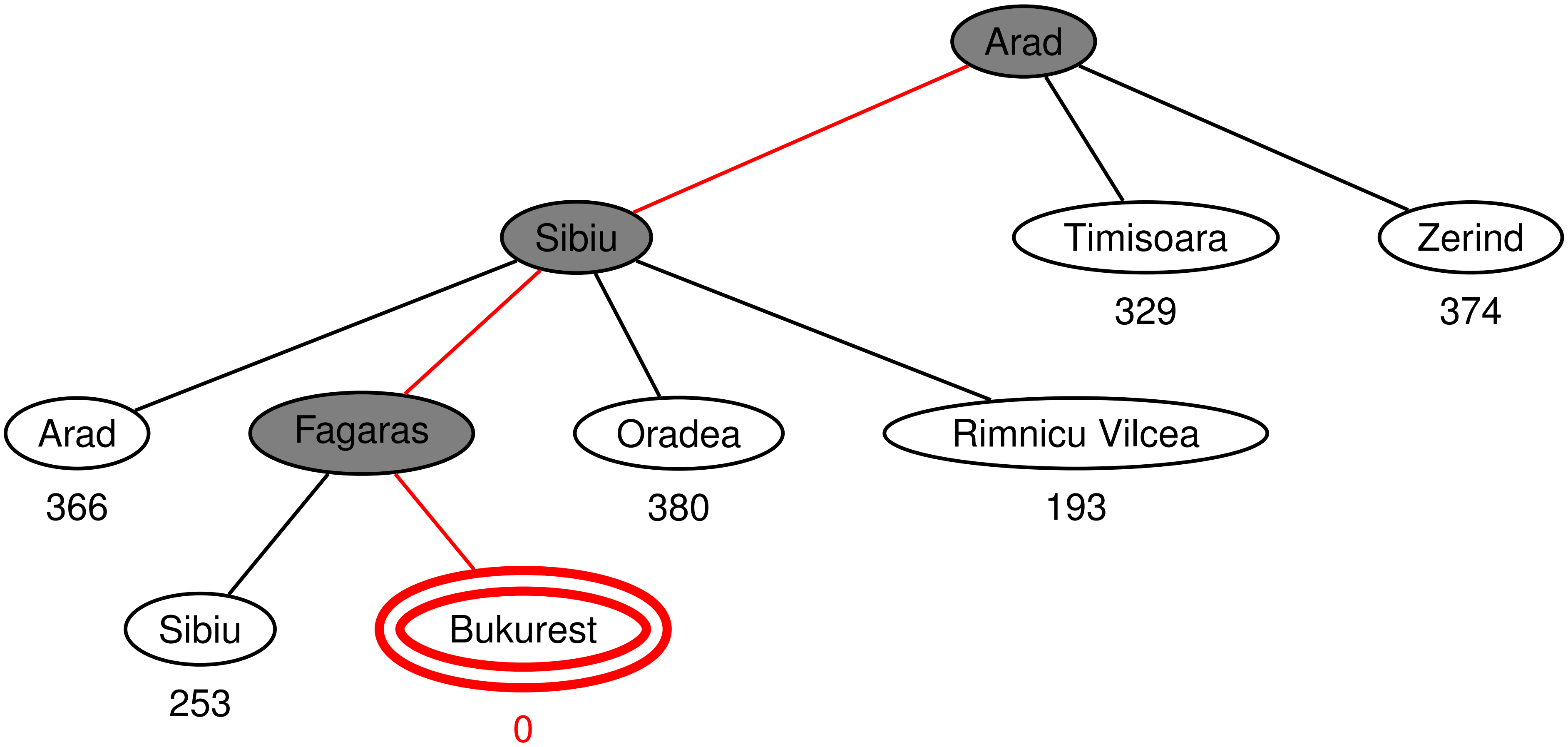
ohodnocovací funkce $f(n) = h(n) = h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Hladové heuristické hledání – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

ohodnocovací funkce $f(n) = h(n) = h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Hladové heuristické hledání – vlastnosti

- expanduje vždy uzel, který se zdá nejblíže k cíli
- cesta nalezená v příkladu ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{Fagaras} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 450$) je sice úspěšná, ale není optimální ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{RimnicuVilcea} \longrightarrow \text{Pitesti} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 418$)
- *úplnost*

  optimálnost

  časová složitost

  prostorová složitost

Hladové heuristické hledání – vlastnosti

- expanduje vždy uzel, který se zdá nejblíže k cíli
- cesta nalezená v příkladu ($g(\mathrm{Arad} \longrightarrow \mathrm{Sibiu} \longrightarrow \mathrm{Fagaras} \longrightarrow \mathrm{Bukurest}) = 450$) je sice úspěšná, ale není optimální ($g(\mathrm{Arad} \longrightarrow \mathrm{Sibiu} \longrightarrow \mathrm{RimnicuVilcea} \longrightarrow \mathrm{Pitesti} \longrightarrow \mathrm{Bukurest}) = 418$)
- *úplnost* obecně není úplný (nekonečný prostor, cykly)

  optimálnost

  časová složitost

  prostorová složitost

HLADOVÉ HEURISTICKÉ HLEDÁNÍ – VLASTNOSTI

- expanduje vždy uzel, který se zdá nejblíže k cíli
- cesta nalezená v příkladu ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{Fagaras} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 450$) je sice úspěšná, ale není optimální ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{RimnicuVilcea} \longrightarrow \text{Pitesti} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 418$)
úplnost	obecně není úplný (nekonečný prostor, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	
prostorová složitost	

HLADOVÉ HEURISTICKÉ HLEDÁNÍ – VLASTNOSTI

- expanduje vždy uzel, který se zdá nejblíže k cíli
- cesta nalezená v příkladu ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{Fagaras} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 450$) je sice úspěšná, ale není optimální ($g(\text{Arad} \longrightarrow \text{Sibiu} \longrightarrow \text{RimnicuVilcea} \longrightarrow \text{Pitesti} \longrightarrow \text{Bukurest}) = 418$)
úplnost	obecně není úplný (nekonečný prostor, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	$O(b^m)$, hodně záleží na h
prostorová složitost	

HLADOVÉ HEURISTICKÉ HLEDÁNÍ – VLASTNOSTI

- expanduje vždy uzel, který se zdá nejblíže k cíli
- cesta nalezená v příkladu ($g(\mathrm{Arad} \longrightarrow \mathrm{Sibiu} \longrightarrow \mathrm{Fagaras} \longrightarrow \mathrm{Bukurest}) = 450$) je sice úspěšná, ale není optimální ($g(\mathrm{Arad} \longrightarrow \mathrm{Sibiu} \longrightarrow \mathrm{RimnicuVilcea} \longrightarrow \mathrm{Pitesti} \longrightarrow \mathrm{Bukurest}) = 418$)
-

úplnost	obecně není úplný (nekonečný prostor, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	$O(b^m)$, hodně záleží na h
prostorová složitost	$O(b^m)$, každý uzel v paměti

HLEDÁNÍ NEJLEPŠÍ CESTY – ALGORITMUS A*

- některé zdroje označují tuto variantu jako Best-first Search
- ohodnocovací funkce – kombinace $g(n)$ a $h(n)$:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

$g(n)$	je cena cesty do n
$h(n)$	je odhad ceny cesty z n do cíle
$f(n)$	je odhad ceny nejlevnější cesty, která vede přes n

- A* algoritmus vyžaduje tzv. přípustnou (*admissible*) heuristiku:

$$0 \leq h(n) \leq h^*(n),\ \text{kde } h^*(n) \text{ je skutečná cena cesty z } n \text{ do cíle}$$

tj. odhad se volí vždycky kratší nebo roven ceně libovolné možné cesty do cíle
Např. přímá vzdálenost $h_{\mathrm{vzd\_Buk}}$ nikdy není delší než (jakákoliv) cesta

Heuristické hledání A* – příklad

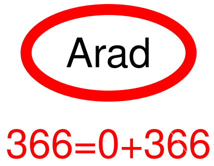
Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti

Heuristické hledání A* – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

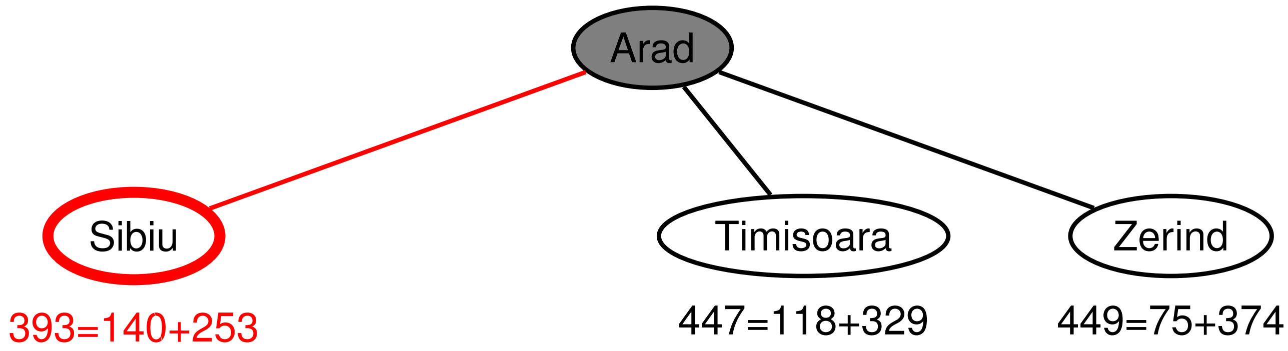
ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Heuristické hledání A* – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

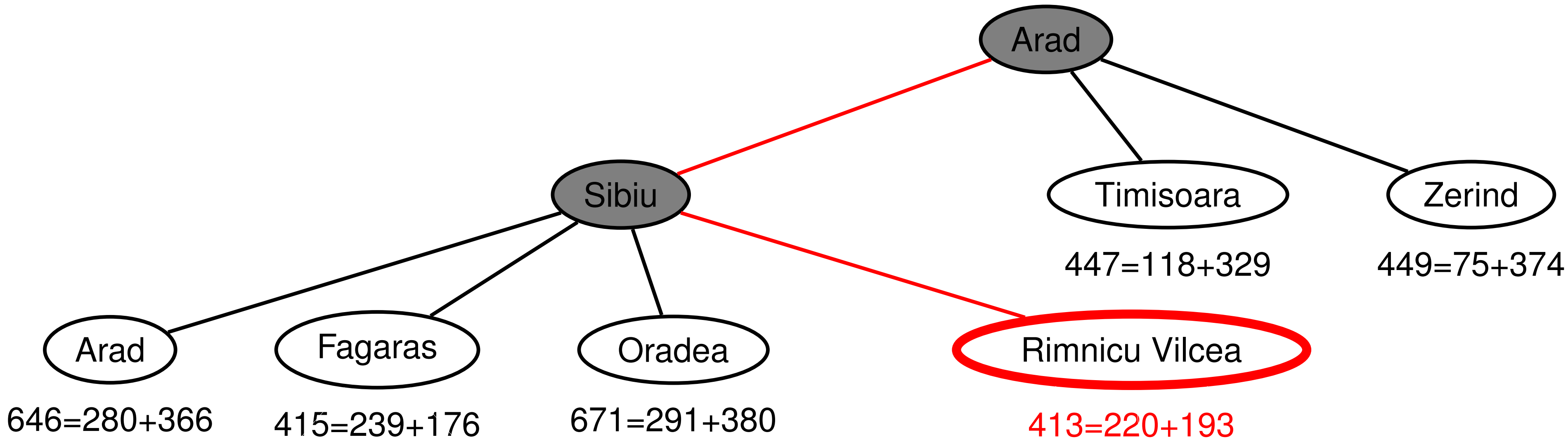
ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Heuristické hledání A* – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

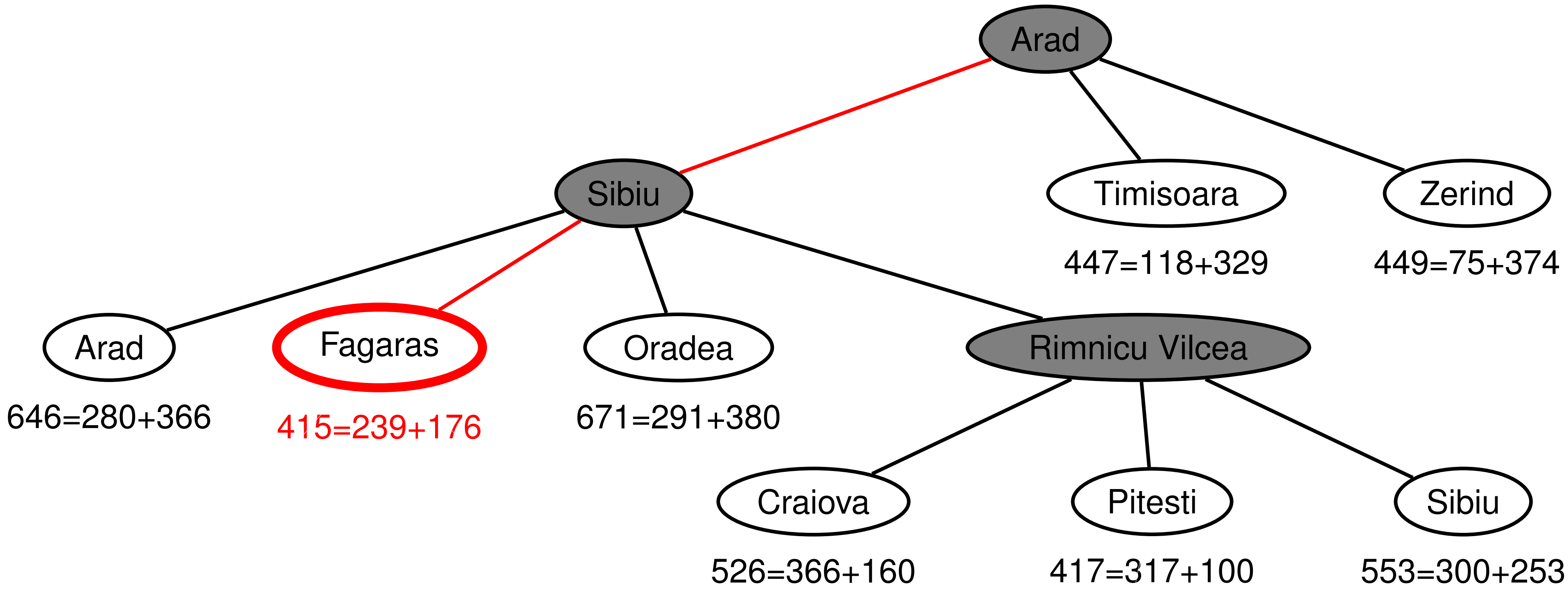
ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



HEURISTICKÉ HLEDÁNÍ A* – PŘÍKLAD

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

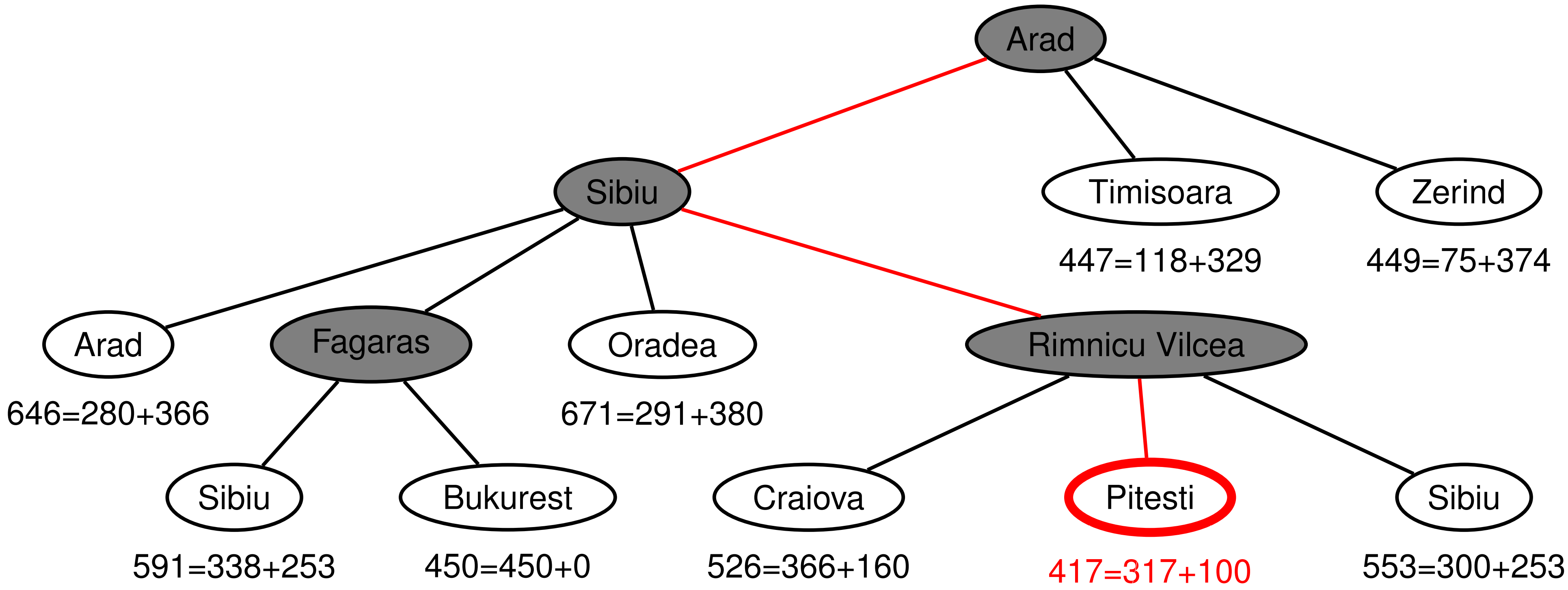
ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\text{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Heuristické hledání A* – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

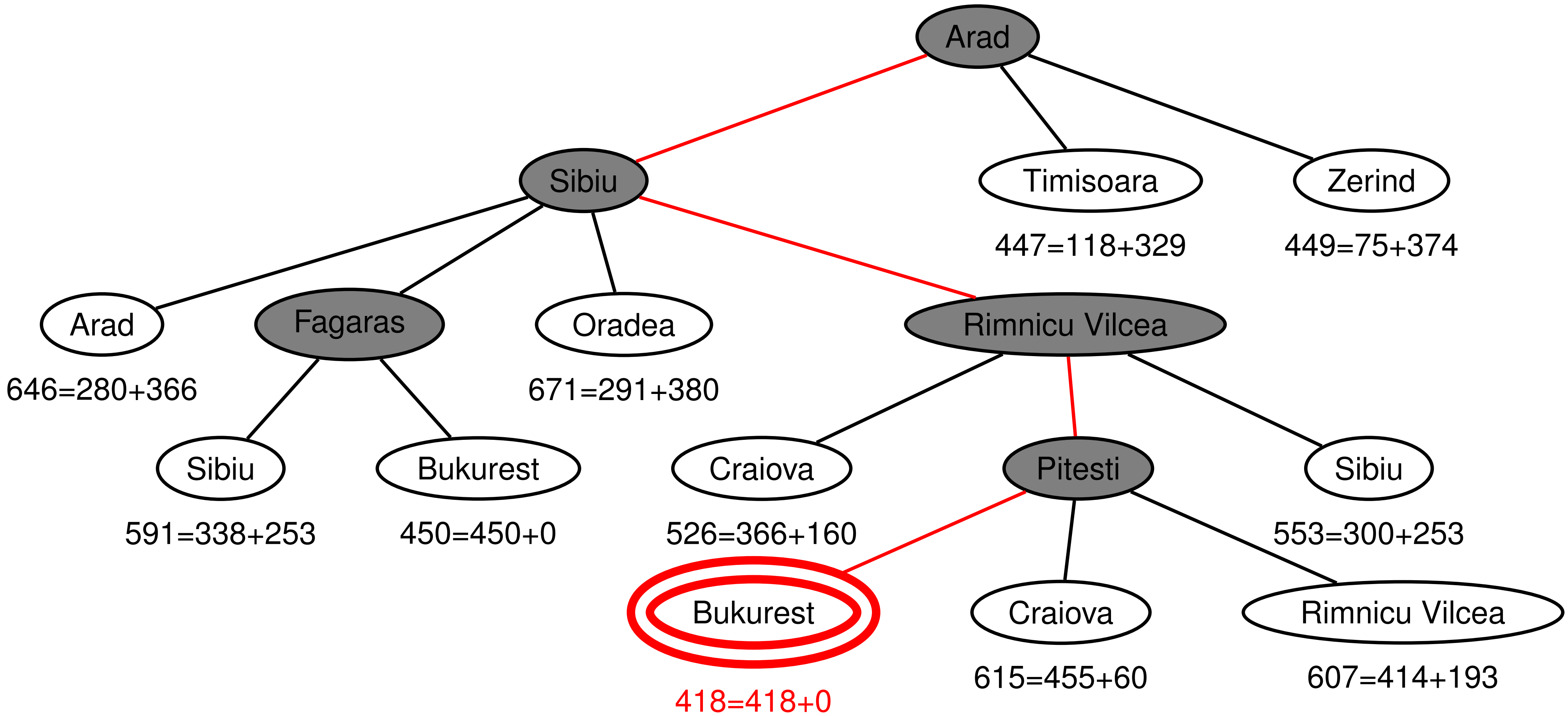
ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\text{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Heuristické hledání A* – příklad

Hledání cesty z města *Arad* do města *Bukurest*

ohodnocovací funkce $f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + h_{\mathrm{vzd\_Buk}}(n)$, přímá vzdálenost z n do Bukuresti



Hledání nejlepší cesty – algoritmus A*

reprezentace uzlů:

- **l(N,F/G)** … listový uzel **N**, **F** $= f(n) =$ **G** $+ h(N)$, **G** $= g(N)$
- **t(N,F/G,Subs)** …podstrom s kořenovým uzlem **N**, **Subs** seznam podstromů seřazených podle f, **G** $= g(N)$ a **F** $=$ f-hodnota nejnadějnějšího následníka uzlu n

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A*

reprezentace uzlů:

- **l(N,F/G)** … listový uzel **N**, **F** $= f(n) =$ **G** $+ h(N)$, **G** $= g(N)$
- **t(N,F/G,Subs)** …podstrom s kořenovým uzlem **N**, **Subs** seznam podstromů seřazených podle f, **G** $= g(N)$ a **F** $=$ f-hodnota nejnadějnějšího následníka uzlu n

```
bestsearch(Start,Solution) :- biggest(Big), expand([],l(Start,0/0), Big,_,yes,Solution).

expand(P,l(N,_),_,_,yes,[N|P]) :- goal(N).
expand(P,l(N,F/G),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound,
    (bagof(M/C,(move(N,M,C),not(member(M,P))),Succ),!,succlist(G,Succ,Ts),
    bestf(Ts,F1), expand(P,t(N,F1/G,Ts),Bound,Tree1,Solved,Sol);Solved=never).
expand(P,t(N,F/G,[T|Ts]),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound, bestf(Ts,BF),
    min(Bound,BF,Bound1),expand([N|P],T,Bound1,T1,Solved1,Sol),
    continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol).
expand(_,t(_,_,[]), _,_,never,_) :- !.
expand(_,Tree,Bound,Tree,no,_) :- f(Tree,F), F>Bound.
...
```

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A*

reprezentace uzlů:

➜ **l(N,F/G)** … listový uzel **N**, **F** $= f(n) =$ **G** $+ h(N)$, **G** $= g(N)$

➜ **t(N,F/G,Subs)** … podstrom s kořenovým uzlem **N**, **Subs** seznam podstromů seřazených podle f, **G** $= g(N)$ a **F** $=$ f-hodnota nejnadějnějšího následníka uzlu n

biggest(-Big) *horní závora pro cenu nejlepší cesty*

```
bestsearch(Start,Solution) :- biggest(Big), expand([], l(Start,0/0), Big, _, yes, Solution).

expand(P,l(N,_),_,_,yes,[N|P]) :- goal(N).
expand(P,l(N,F/G),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound,
     (bagof(M/C,(move(N,M,C),not(member(M,P))),Succ),!,succlist(G,Succ,Ts),
     bestf(Ts,F1), expand(P,t(N,F1/G,Ts),Bound,Tree1,Solved,Sol);Solved=never).
expand(P,t(N,F/G,[T|Ts]),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound, bestf(Ts,BF),
     min(Bound,BF,Bound1),expand([N|P],T,Bound1,T1,Solved1,Sol),
     continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol).
expand(_,t(_,_,[]),_,_,never,_) :- !.
expand(_,Tree,Bound,Tree,no,_) :- f(Tree,F), F>Bound.
...
```

HLEDÁNÍ NEJLEPŠÍ CESTY – ALGORITMUS A*

reprezentace uzlů:

- ➜ **l(N,F/G)** … listový uzel **N**, **F** $= f(n) =$ **G** $+ h(N)$, **G** $= g(N)$
- ➜ **t(N,F/G,Subs)** …podstrom s kořenovým uzlem **N**, **Subs** seznam podstromů seřazených podle f, **G** $= g(N)$ a **F** $=$ f-hodnota nejnadějnějšího následníka uzlu n

biggest(-Big) *horní závora pro cenu nejlepší cesty*

```
bestsearch(Start,Solution) :- biggest(Big), expand([], l(Start,0/0), Big, _,yes,Solution).

expand(P,l(N,_),_,_,yes,[N|P]) :- goal(N).
expand(P,l(N,F/G),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound,
    (bagof(M/C,(move(N,M,C),not(member(M,P))),Succ),!,succlist(G,Succ,Ts),
    bestf(Ts,F1), expand(P,t(N,F1/G,Ts),Bound,Tree1,Solved,Sol);Solved=never).
expand(P,t(N,F/G,[T|Ts]),Bound,Tree1,Solved,Sol) :- F=<Bound, bestf(Ts,BF),
    min(Bound,BF,Bound1),expand([N|P],T,Bound1,T1,Solved1,Sol),
    continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol).
expand(_,t(_,_,[]),_,_,never,_) :- !.
expand(_,Tree,Bound,Tree,no,_) :- f(Tree,F), F>Bound.
...
```

expand(+Path,+Tr,+Bnd,-Tr1,?Solved,-Sol)
Path – *cesta mezi kořenem a* **Tr**
Tr – *prohledávaný podstrom*
Bnd – f*-limita pro expandování* **Tr**
Tr1 – **Tr** *expandovaný až po* **Bnd**
Solved – **yes**, **no**, **never**
Sol – *cesta z kořene do cílového uzlu*

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A* pokrač.

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
    (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
    bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).

succlist(_ ,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
    succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).

insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).

f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).

bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([], Big) :- biggest(Big).

min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A* pokrač.

continue(+Path, +Tree, +Bound, -NewTree, +SubtrSolved, ?TreeSolved, -Solution)
volba způsobu pokračování podle výsledků ***expand***

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
      (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
      bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).

succlist(_ ,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
      succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).

insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).

f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).

bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([], Big) :- biggest(Big).

min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A* pokrač.

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
    (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
    bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).

succlist(_ ,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
    succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).

insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).

f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).

bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([], Big) :- biggest(Big).

min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

continue(+Path, +Tree, +Bound, -NewTree, +SubtrSolved, ?TreeSolved, -Solution)
volba způsobu pokračování podle výsledků **expand**

succlist(+G0, [+Node1/+Cost1, ...], [l(-BestNode,-BestF/-G), ...])
setřídění seznamu listů podle f-hodnot

HLEDÁNÍ NEJLEPŠÍ CESTY – ALGORITMUS A* pokrač.

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
    (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
    bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).
```

continue(+Path, +Tree, +Bound, -NewTree, +SubtrSolved, ?TreeSolved, -Solution)
volba způsobu pokračování podle výsledků **expand**

```
succlist(_,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
    succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).
```

succlist(+G0, [+Node1/+Cost1, ...], [l(-BestNode,-BestF/-G), ...])
setřídění seznamu listů podle f-hodnot

```
insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).
```

vloží **T** *do seznamu stromů* **Ts** *podle f*

```
f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).

bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([],Big) :- biggest(Big).

min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A* pokrač.

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
    (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
    bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).
```

continue(+Path, +Tree, +Bound, -NewTree, +SubtrSolved, ?TreeSolved, -Solution)
volba způsobu pokračování podle výsledků ***expand***

```
succlist(_ ,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
    succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).
```

succlist(+G0, [+Node1/+Cost1, ...], [l(-BestNode,-BestF/-G), ...])
setřídění seznamu listů podle f-hodnot

```
insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).
```

vloží ***T*** *do seznamu stromů* ***Ts*** *podle f*

```
f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).
```

"vytáhne" ***F*** *ze struktury*

```
bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([],Big) :- biggest(Big).

min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

Hledání nejlepší cesty – algoritmus A* pokrač.

```
continue(_,_,_,_,yes,yes,Sol).
continue(P,t(N,F/G,[T1|Ts]),Bound,Tree1,Solved1,Solved,Sol) :-
     (Solved=no,insert(T1,Ts,NTs);Solved=never,NTs=Ts),
     bestf(NTs,F1),expand(P,t(N,F1/G,NTs),Bound,Tree1,Solved,Sol).
```

continue(+Path, +Tree, +Bound, -NewTree, +SubtrSolved, ?TreeSolved, -Solution)
volba způsobu pokračování podle výsledků ***expand***

```
succlist(_ ,[],[]).
succlist(G0,[N/C|NCs],Ts) :- G is G0+C,h(N,H),F is G+H,
     succlist(G0,NCs,Ts1), insert(l(N,F/G),Ts1,Ts).
```

succlist(+G0, [+Node1/+Cost1, ...], [l(-BestNode,-BestF/-G), ...])
setřídění seznamu listů podle f-hodnot

```
insert(T,Ts,[T|Ts]) :- f(T,F),bestf(Ts,F1),F=<F1,!.
insert(T,[T1|Ts],[T1|Ts1]) :- insert(T,Ts,Ts1).
```

vloží ***T*** *do seznamu stromů* ***Ts*** *podle f*

```
f(l(_,F/_),F).
f(t(_,F/_,_),F).
```

"vytáhne" ***F*** *ze struktury*

```
bestf([T|_],F) :- f(T,F).
bestf([], Big) :- biggest(Big).
```

nejlepší f-hodnota ze seznamu stromů

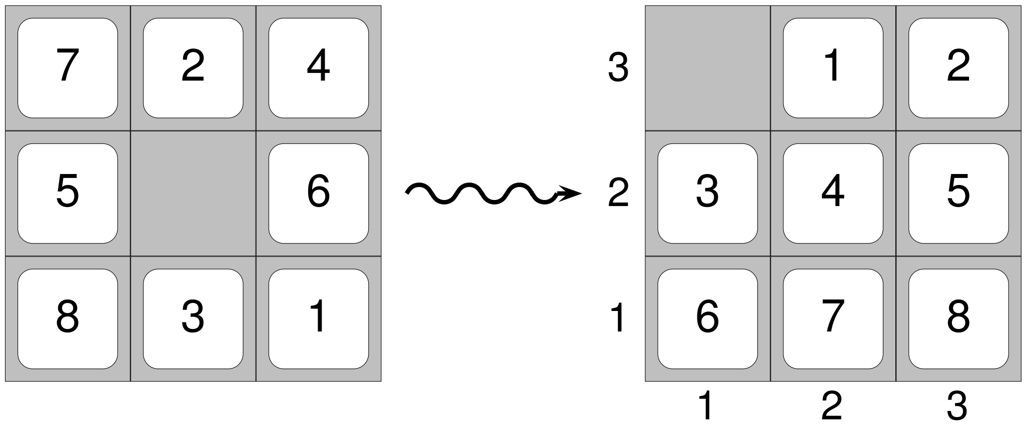
```
min(X,Y,X) :- X=<Y,!.
min(X,Y,Y).
```

PŘÍKLAD – ŘEŠENÍ POSUNOVAČKY

konfigurace = seznam dvojic **X/Y** (sloupec/řádek) = [pozice$_{\text{díry}}$, pozice$_{\text{kámen č.1}}$, . . .]

```
goal ([1/3, 2/3, 3/3, 1/2, 2/2,
      3/2, 1/1, 2/1, 3/1]).
```

S=



PŘÍKLAD – ŘEŠENÍ POSUNOVAČKY

konfigurace = seznam dvojic **X**/**Y** (sloupec/řádek) = [pozice$_{\text{díry}}$, pozice$_{\text{kámen č.1}}$, . . .]

goal ([1/3, 2/3, 3/3, 1/2, 2/2,
3/2, 1/1, 2/1, 3/1]).

S=

7	2	4
5		6
8	3	1

3		1	2
2	3	4	5
1	6	7	8
	1	2	3

Volba přípustné heuristické funkce h:

➜ $h_1(n)$ = počet dlaždiček, které nejsou na svém místě $h_1(\mathbf{S}) = 8$

PŘÍKLAD – ŘEŠENÍ POSUNOVAČKY

konfigurace = seznam dvojic **X**/**Y** (sloupec/řádek) = [pozice$_{\text{díry}}$, pozice$_{\text{kámen č.1}}$, ...]

```
goal ([1/3, 2/3, 3/3, 1/2, 2/2,
       3/2, 1/1, 2/1, 3/1]).
```

S=

7	2	4
5		6
8	3	1

$\rightsquigarrow$

3		1	2
2	3	4	5
1	6	7	8
	1	2	3

Volba přípustné heuristické funkce h:

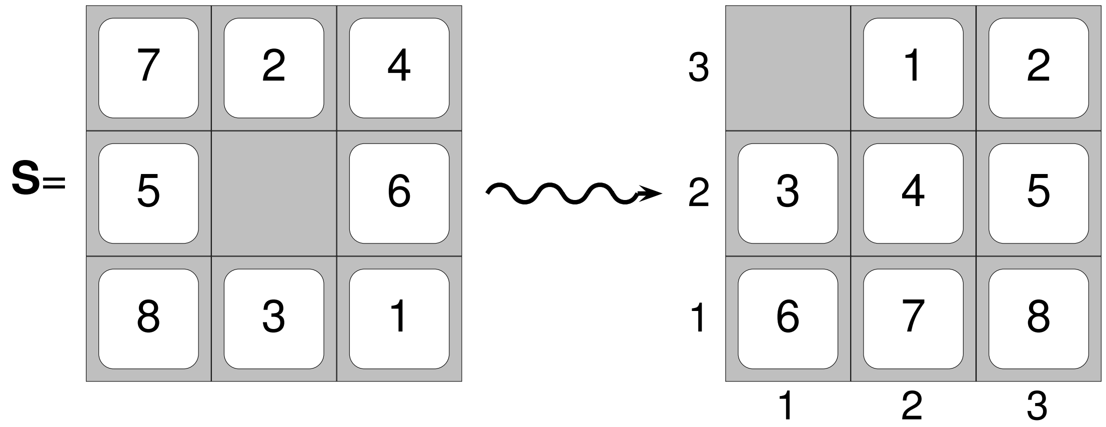
- ➜ $h_1(n)$ = počet dlaždiček, které nejsou na svém místě $h_1(\mathbf{S}) = 8$
- ➜ $h_2(n)$ = součet manhattanských vzdáleností dlaždic od svých správných pozic

$h_2(\mathbf{S}) = 3_7 + 1_2 + 2_4 + 2_5 + 3_6 + 2_8 + 2_3 + 3_1 = 18$

Příklad – řešení posunovačky

konfigurace = seznam dvojic **X**/**Y** (sloupec/řádek) = [pozice$_{\text{díry}}$, pozice$_{\text{kámen č.1}}$, ...]

goal ([1/3, 2/3, 3/3, 1/2, 2/2,
3/2, 1/1, 2/1, 3/1]).



Volba přípustné heuristické funkce h:

➜ $h_1(n)$ = počet dlaždiček, které nejsou na svém místě $h_1(\mathbf{S}) = 8$

➜ $h_2(n)$ = součet manhattanských vzdáleností dlaždic od svých správných pozic

$h_2(\mathbf{S}) = 3_7 + 1_2 + 2_4 + 2_5 + 3_6 + 2_8 + 2_3 + 3_1 = 18$

h_1 i h_2 jsou přípustné ... $h^*(n) = 26$

Určení kvality heuristiky

efektivní faktor větvení b^* – N ... počet vygenerovaných uzlů, d ... hloubka řešení:

$$N + 1 = 1 + b^* + (b^*)^2 + \cdots + (b^*)^d$$

např.: když A* najde řešení po 52 uzlech v hloubce 5 ... $b^* = 1.92$

heuristika je tím lepší, čím blíže je b^* hodnotě 1.

Určení kvality heuristiky

efektivní faktor větvení b^* – $N\ldots$ počet vygenerovaných uzlů, $d\ldots$ hloubka řešení:

$$N + 1 = 1 + b^* + (b^*)^2 + \cdots + (b^*)^d$$

např.: když A* najde řešení po 52 uzlech v hloubce 5 … $b^* = 1.92$

heuristika je tím lepší, čím blíže je b^* hodnotě 1.

☞ měření b^* na malé množině testovacích sad – dobrá představa o přínosu heuristiky

	Průměrný počet uzlů			Efektivní faktor větvení b^*		
d	IDS	A$^*(h_1)$	A$^*(h_2)$	IDS	A$^*(h_1)$	A$^*(h_2)$
2	10	6	6	2.45	1.79	1.79
6	680	20	18	2.73	1.34	1.30
10	47127	93	39	2.79	1.38	1.22
12	3644035	227	73	2.78	1.42	1.24
18	–	3056	363	–	1.46	1.26
24	–	39135	1641	–	1.48	1.26

Určení kvality heuristiky

efektivní faktor větvení b^* – $N\ldots$počet vygenerovaných uzlů, $d\ldots$hloubka řešení:

$$N + 1 = 1 + b^* + (b^*)^2 + \cdots + (b^*)^d$$

např.: když A* najde řešení po 52 uzlech v hloubce 5 … $b^* = 1.92$

heuristika je tím lepší, čím blíže je b^* hodnotě 1.

☞ měření b^* na malé množině testovacích sad – dobrá představa o přínosu heuristiky

	Průměrný počet uzlů			Efektivní faktor větvení b^*		
d	IDS	A$^*(h_1)$	A$^*(h_2)$	IDS	A$^*(h_1)$	A$^*(h_2)$
2	10	6	6	2.45	1.79	1.79
6	680	20	18	2.73	1.34	1.30
10	47127	93	39	2.79	1.38	1.22
12	3644035	227	73	2.78	1.42	1.24
18	–	3056	363	–	1.46	1.26
24	–	39135	1641	–	1.48	1.26

h_2 dominuje h_1 $\big(\forall n : h_2(n) \geq h_1(n)\big)$ … h_2 je lepší ve všech případech než h_1

Hledání nejlepší cesty A* – vlastnosti

➜ expanduje uzly podle $f(n) = g(n) + h(n)$

A* expanduje všechny uzly s $f(n) < C^*$
A* expanduje některé uzly s $f(n) = C^*$
A* neexpanduje žádné uzly s $f(n) > C^*$

➜ *úplnost*

optimálnost

časová složitost

prostorová složitost

Hledání nejlepší cesty A* – vlastnosti

➜ expanduje uzly podle $f(n) = g(n) + h(n)$

A* expanduje všechny uzly s $f(n) < C^*$

A* expanduje některé uzly s $f(n) = C^*$

A* neexpanduje žádné uzly s $f(n) > C^*$

➜ *úplnost* je úplný (pokud $[$počet uzlů s $f < C^*] \neq \infty$)

optimálnost

časová složitost

prostorová složitost

Hledání nejlepší cesty A* – vlastnosti

➜ expanduje uzly podle $f(n) = g(n) + h(n)$

A* expanduje všechny uzly s $f(n) < C^*$
A* expanduje některé uzly s $f(n) = C^*$
A* neexpanduje žádné uzly s $f(n) > C^*$

➜ *úplnost* je úplný (pokud $\left[\text{počet uzlů s } f < C^*\right] \neq \infty$)

optimálnost je optimální

časová složitost

prostorová složitost

Hledání nejlepší cesty A* – vlastnosti

➜ expanduje uzly podle $f(n) = g(n) + h(n)$

A* expanduje všechny uzly s $f(n) < C^*$
A* expanduje některé uzly s $f(n) = C^*$
A* neexpanduje žádné uzly s $f(n) > C^*$

➜ *úplnost* je úplný (pokud $\left[\text{počet uzlů s } f < C^*\right] \neq \infty$)

optimálnost je optimální

časová složitost $O\big((b^*)^d\big)$, exponenciální v délce řešení d

prostorová složitost

Hledání nejlepší cesty A* – vlastnosti

➜ expanduje uzly podle $f(n) = g(n) + h(n)$

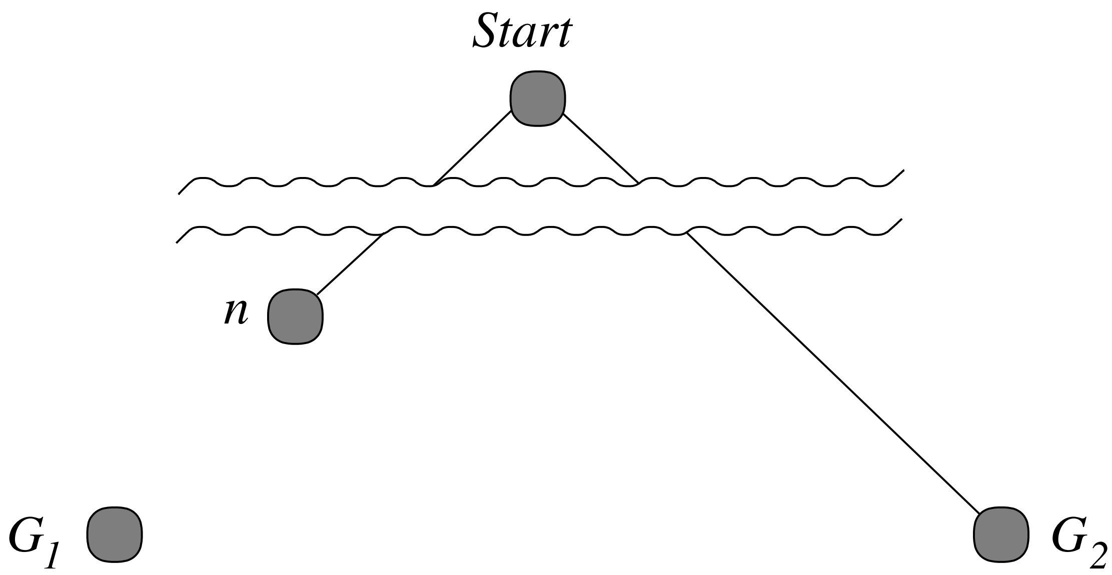
A* expanduje všechny uzly s $f(n) < C^*$
A* expanduje některé uzly s $f(n) = C^*$
A* neexpanduje žádné uzly s $f(n) > C^*$

➜ *úplnost*	je úplný (pokud $\left[\text{počet uzlů s } f < C^*\right] \neq \infty$)
optimálnost	je optimální
časová složitost	$O\big((b^*)^d\big)$, exponenciální v délce řešení d
prostorová složitost	$O\big((b^*)^d\big)$, každý uzel v paměti

Problém s prostorovou složitostí řeší některé nedávné algoritmy (např. *Memory-bounded heuristic search*)

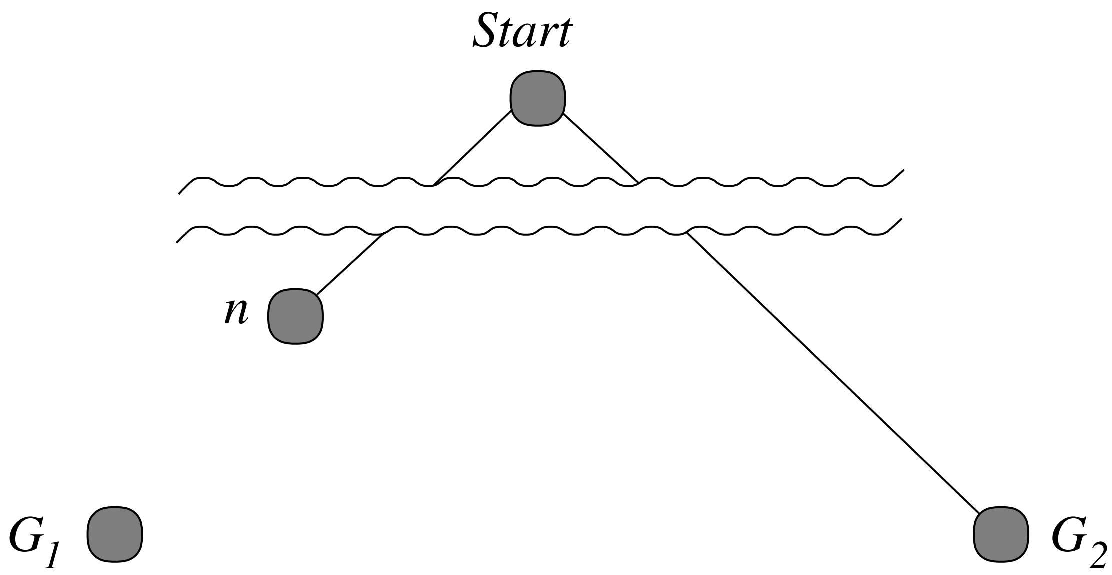
Důkaz optimálnosti algoritmu A*

- ➜ předpokládejme, že byl vygenerován nějaký suboptimální cíl G_2 a je uložen ve frontě.
- ➜ dále nechť n je neexpandovaný uzel na nejkratší cestě k optimálnímu cíli G_1 (tj. *chybně neexpandovaný* uzel ve správném řešení)



Důkaz optimálnosti algoritmu A*

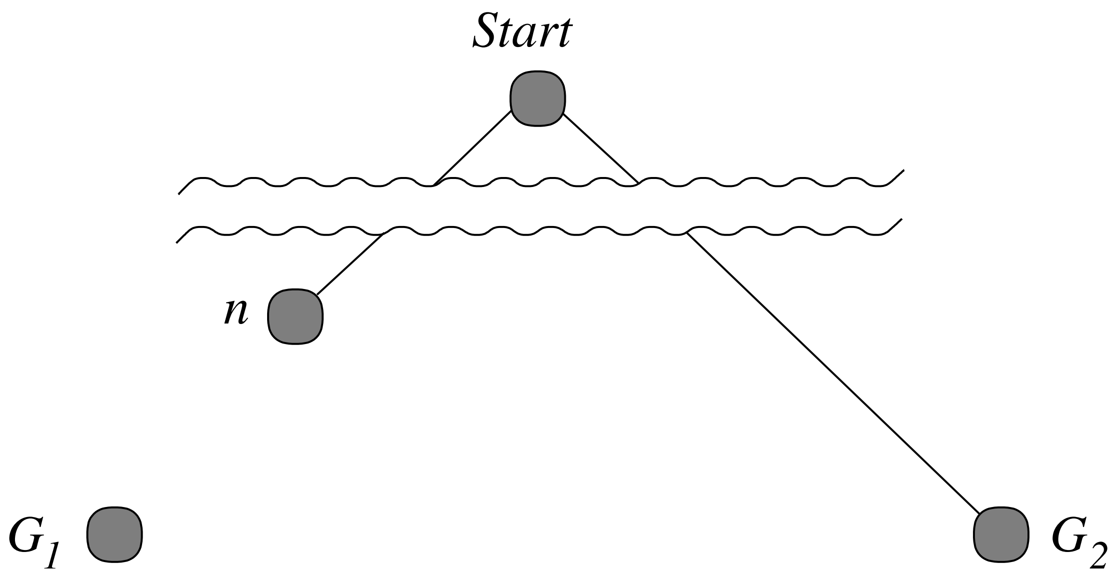
- předpokládejme, že byl vygenerován nějaký suboptimální cíl G_2 a je uložen ve frontě.
- dále nechť n je neexpandovaný uzel na nejkratší cestě k optimálnímu cíli G_1 (tj. *chybně neexpandovaný* uzel ve správném řešení)



Pak

$$\begin{aligned} f(G_2) &= g(G_2) && \text{protože } h(G_2) = 0 \\ &> g(G_1) && \text{protože } G_2 \text{ je suboptimální} \\ &\geq f(n) && \text{protože } h \text{ je přípustná} \end{aligned}$$

Důkaz optimálnosti algoritmu A*



- předpokládejme, že byl vygenerován nějaký suboptimální cíl G_2 a je uložen ve frontě.
- dále nechť n je neexpandovaný uzel na nejkratší cestě k optimálnímu cíli G_1 (tj. *chybně neexpandovaný* uzel ve správném řešení)

Pak

$$\begin{aligned} f(G_2) &= g(G_2) && \text{protože } h(G_2) = 0 \\ &> g(G_1) && \text{protože } G_2 \text{ je suboptimální} \\ &\geq f(n) && \text{protože } h \text{ je přípustná} \end{aligned}$$

A protože $f(G_2) > f(n) \Rightarrow$ A* nikdy nevybere G_2 pro expanzi dřív než se z n dostane do G_1. $\square$

Jak najít přípustnou heuristickou funkci?

➜ je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?

Jak najít přípustnou heuristickou funkci?

- je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?
- h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:
  - při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
  - při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení

Jak najít přípustnou heuristickou funkci?

- je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?
- h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:
  - při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
  - při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení
- relaxovaný problém – méně omezení na akce než původní problém

  Cena optimálního řešení relaxovaného problému je přípustná heuristika pro původní problém.

  optimální řešení původního problému = řešení relaxovaného problému

Jak najít přípustnou heuristickou funkci?

- je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?
- h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:
  - při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
  - při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení
- relaxovaný problém – méně omezení na akce než původní problém

  Cena optimálního řešení relaxovaného problému je přípustná heuristika pro původní problém.

  optimální řešení původního problému = řešení relaxovaného problému

Posunovačka a relaxovaná posunovačka:

- dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B $\wedge$ B je prázdná.
- (a) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B.

  (b) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ B je prázdná.

  (c) dlaždice se může přesunout z A na B.

JAK NAJÍT PŘÍPUSTNOU HEURISTICKOU FUNKCI?

- je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?
- h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:
  - při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
  - při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení
- relaxovaný problém – méně omezení na akce než původní problém

  Cena optimálního řešení relaxovaného problému je přípustná heuristika pro původní problém.

  optimální řešení původního problému = řešení relaxovaného problému

Posunovačka a relaxovaná posunovačka:

- dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B $\wedge$ B je prázdná.
- (a) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B.

  (b) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ B je prázdná.

  (c) dlaždice se může přesunout z A na B. .... h_1

JAK NAJÍT PŘÍPUSTNOU HEURISTICKOU FUNKCI?

➜ je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?

➜ h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:

- při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
- při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení

➜ relaxovaný problém – méně omezení na akce než původní problém

Cena optimálního řešení relaxovaného problému je přípustná heuristika pro původní problém.

optimální řešení původního problému = řešení relaxovaného problému

Posunovačka a relaxovaná posunovačka:

➜ dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B $\wedge$ B je prázdná.

➜ (a) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B. . . . . h_2

(b) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ B je prázdná.

(c) dlaždice se může přesunout z A na B. . . . . h_1

Jak najít přípustnou heuristickou funkci?

- ➜ je možné najít obecné pravidlo, jak objevit heuristiku h_1 nebo h_2?
- ➜ h_1 i h_2 jsou délky cest pro zjednodušené verze problému Posunovačka:
  - při přenášení dlaždice kamkoliv – h_1=počet kroků nejkratšího řešení
  - při posouvání dlaždice kamkoliv o 1 pole (i na plné) – h_2=počet kroků nejkratšího řešení
- ➜ relaxovaný problém – méně omezení na akce než původní problém

  Cena optimálního řešení relaxovaného problému je přípustná heuristika pro původní problém.

  optimální řešení původního problému = řešení relaxovaného problému

Posunovačka a relaxovaná posunovačka:

- ➜ dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B $\wedge$ B je prázdná.
- ➜ (a) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ A sousedí s B. . . . . h_2

  (b) dlaždice se může přesunout z A na B $\Leftrightarrow$ B je prázdná. . . . . Gaschnigova heuristika

  (c) dlaždice se může přesunout z A na B. . . . . h_1

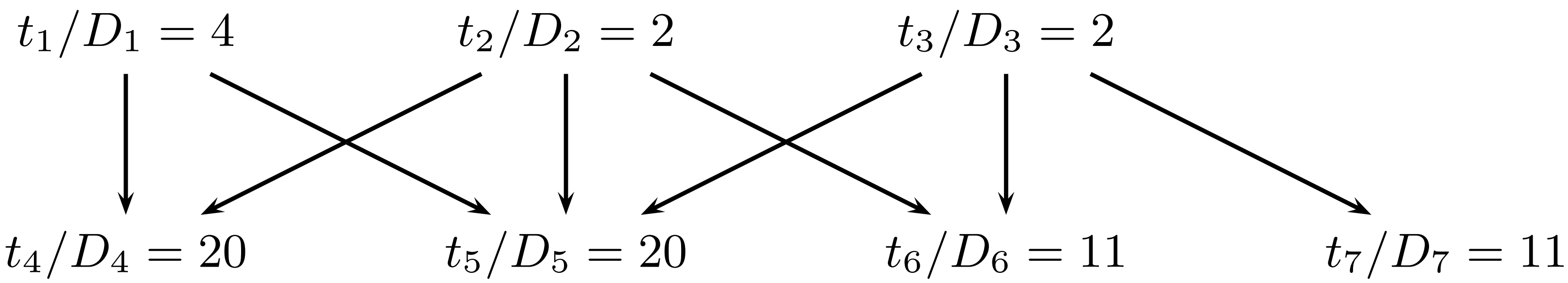
PŘÍKLAD – ROZVRH PRÁCE PROCESORŮ

- úlohy t_i s potřebným časem na zpracování D_i (např.: $i = 1, \ldots, 7$)
- m procesorů (např.: $m = 3$)
- relace precedence mezi úlohami – které úlohy mohou začít až po skončení dané úlohy

$$
\begin{tikzcd}
t_1/D_1 = 4 \arrow[d] \arrow[dr] & t_2/D_2 = 2 \arrow[dl] \arrow[d] \arrow[dr] & t_3/D_3 = 2 \arrow[dl] \arrow[d] \arrow[dr] & \\
t_4/D_4 = 20 & t_5/D_5 = 20 & t_6/D_6 = 11 & t_7/D_7 = 11
\end{tikzcd}
$$

PŘÍKLAD – ROZVRH PRÁCE PROCESORŮ

- úlohy t_i s potřebným časem na zpracování D_i (např.: $i = 1, \ldots, 7$)
- m procesorů (např.: $m = 3$)
- relace precedence mezi úlohami – které úlohy mohou začít až po skončení dané úlohy

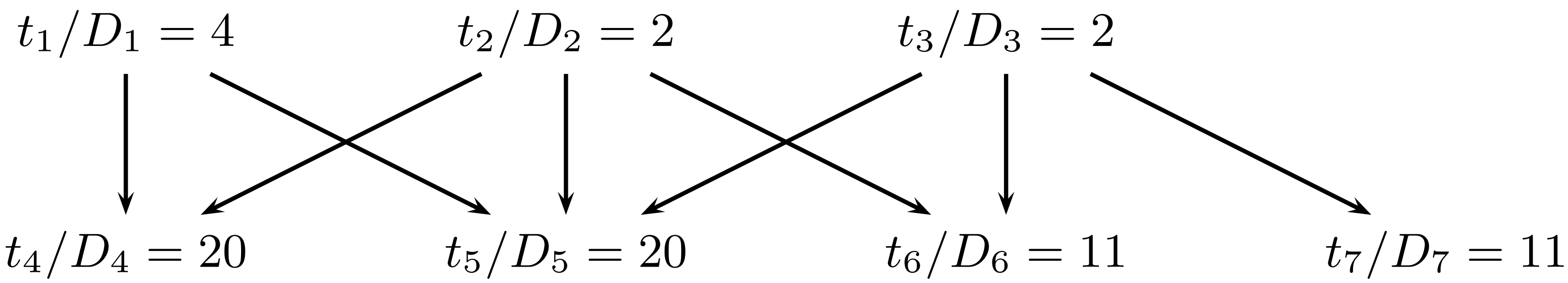


- problém: najít rozvrh práce pro každý procesor s minimalizací celkového času

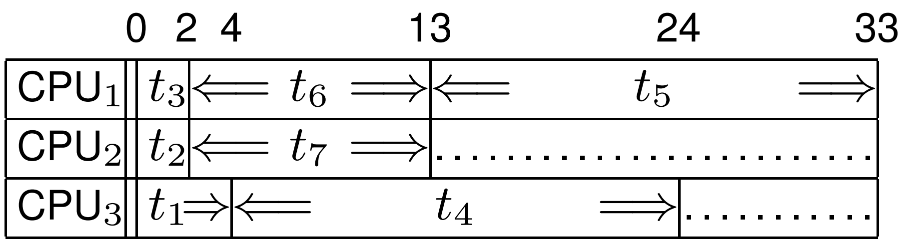
	0	2	4	13	24	33
CPU_1	t_3	$\Leftarrow\ t_6\ \Rightarrow$		$\Leftarrow\ t_5\ \Rightarrow$		
CPU_2	t_2	$\Leftarrow\ t_7\ \Rightarrow$		....		
CPU_3	$t_1 \Rightarrow$		$\Leftarrow\ t_4\ \Rightarrow$		....	

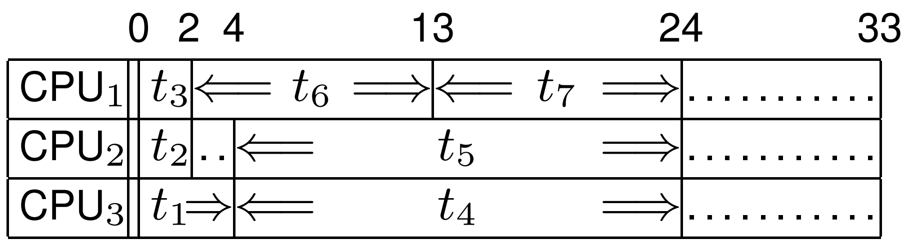
Příklad – rozvrh práce procesorů

- úlohy t_i s potřebným časem na zpracování D_i (např.: $i = 1, \ldots, 7$)
- m procesorů (např.: $m = 3$)
- relace precedence mezi úlohami – které úlohy mohou začít až po skončení dané úlohy



- problém: najít rozvrh práce pro každý procesor s minimalizací celkového času





Příklad – rozvrh práce procesorů pokrač.

➜ stavy: **nezařazené_úlohy*zařazené_úlohy*čas_ukončení**

např.: **[WaitingTask1/D1,WaitingTask2/D2,...]*[Task1/F1,Task2/F2,...]*FinTime**

PŘÍKLAD – ROZVRH PRÁCE PROCESORŮ pokrač.

- stavy: **nezařazené_úlohy*zařazené_úlohy*čas_ukončení**
  např.: **[WaitingTask1/D1,WaitingTask2/D2,...]*[Task1/F1,Task2/F2,...]*FinTime**

- přechodová funkce **move(+Uzel, -NaslUzel, -Cena)**:

```
move(Tasks1*[_/F|Active]*Fin1, Tasks2*Active2*Fin2, Cost) :-
    del1(Task/D,Tasks1,Tasks2), not (member(T/_,Tasks2),before(T,Task)),
    not (member(T1/F1,Active1),F<F1,before(T1,Task)),
    Time is F+D, insert(Task/Time,Active1,Active2,Fin1,Fin2), Cost is Fin2-Fin1.
move(Tasks*[_/F|Active1]*Fin,Tasks*Active2*Fin,0) :- insertidle(F,Active1,Active2).

before(T1,T2) :- precedence(T1,T2).
before(T1,T2) :- precedence(T,T2),before(T1,T).

insert(S/A,[T/B|L],[S/A,T/B|L],F,F) :- A=<B,!.
insert(S/A,[T/B|L],[T/B|L1],F1,F2) :- insert(S/A,L,L1,F1,F2).
insert(S/A,[],[S/A],_,A).

insertidle(A,[T/B|L],[idle/B,T/B|L]) :- A<B,!.
insertidle(A,[T/B|L],[T/B|L1]) :- insertidle(A,L,L1).

goal([]*_*_).
```

Příklad – rozvrh práce procesorů pokrač.

➜ počáteční uzel: start ([t1 /4, t2 /2, t3 /2, t4 /20, t5 /20, t6 /11, t7 /11]∗[idle /0, idle /0, idle /0]∗0).

PŘÍKLAD – ROZVRH PRÁCE PROCESORŮ pokrač.

- počáteční uzel: `start ([t1/4, t2/2, t3/2, t4/20, t5/20, t6/11, t7/11]*[idle/0, idle/0, idle/0]*0).`
- heuristika

```
h(Tasks * Processors * Fin, H) :-
    totaltime(Tasks, Tottime),
    sumnum(Processors, Ftime, N),
    Finall is (Tottime + Ftime)/N,
    (Finall > Fin, !, H is Finall - Fin
      ;
      H = 0).

totaltime([], 0).
totaltime([_/D | Tasks], T) :-
    totaltime(Tasks, T1), T is T1 + D.

sumnum([], 0, 0).
sumnum([_/T | Procs], FT, N) :-
    sumnum(Procs, FT1, N1),
    N is N1 + 1, FT is FT1 + T.

precedence(t1, t4). precedence(t1, t5).
...
```

optimální (nedosažitelný) čas:

$$\textbf{Finall} = \frac{\sum_i D_i + \sum_j F_j}{m}$$

skutečný čas výpočtu: $\textbf{Fin} = \max(F_j)$

heuristická funkce h:

$$\textbf{H} = \begin{cases} \textbf{Finall} - \textbf{Fin}, & \text{když } \textbf{Finall} > \textbf{Fin} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$$