Prohledávání stavového prostoru

Aleš Horák

E-mail: hales@fi.muni.cz

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

Obsah:

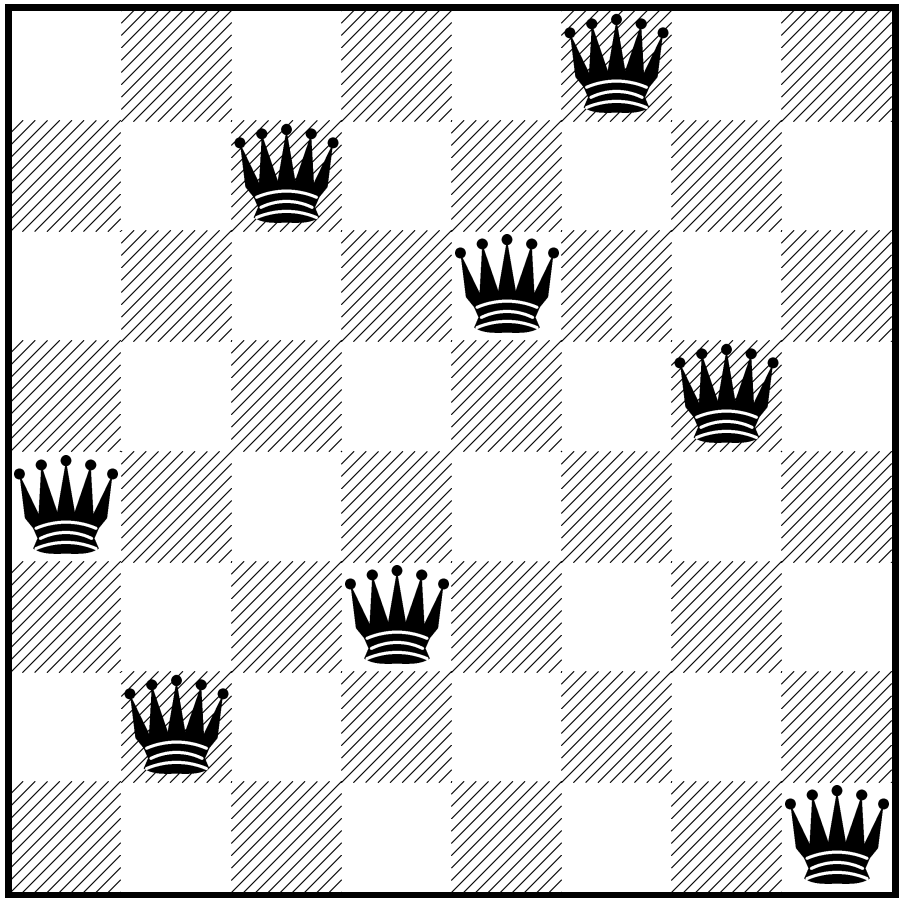
- Problém osmi dam
- Prohledávání stavového prostoru
- Prohledávání do hloubky
- Prohledávání do šířky
- Prohledávání s postupným prohlubováním
- Shrnutí vlastností algoritmů neinformovaného prohledávání

Problém osmi dam

úkol: *Rozestavte po šachovnici 8 dam tak, aby se žádné dvě vzájemně neohrožovaly.*

Problém osmi dam

úkol: *Rozestavte po šachovnici 8 dam tak, aby se žádné dvě vzájemně neohrožovaly.*



celkem pro *8 dam* existuje *92 různých řešení*

Problém osmi dam I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

Solution = [1/4, 2/2, 3/7, 4/3, 5/6, 6/8, 7/5, 8/1]

Problém osmi dam I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

```
Solution = [1/4,  2/2,  3/7,  4/3,  5/6,  6/8,  7/5,  8/1]
```

```
solution(S) :- template(S), sol(S).

sol ([]).
sol([X/Y|Others]) :- sol(Others),
                     member(X,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                     member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                     noattack(X/Y,Others).

noattack(_ ,[]).
noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- X=\=X1, Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,
                                noattack(X/Y,Others).

template([X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]).
```

Problém osmi dam I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

```
Solution = [1/4,  2/2,  3/7,  4/3,  5/6,  6/8,  7/5,  8/1]
```

```
solution(S) :- template(S), sol(S).

sol ([]).
sol([X/Y|Others]) :- sol(Others),
                     member(X,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                     member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                     noattack(X/Y,Others).

noattack(_ ,[]).
noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- X=\=X1, Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,
                                noattack(X/Y,Others).

template([X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]).

?- solution(Solution).
     Solution = [8/4,  7/2,  6/7,  5/3,  4/6,  3/8,  2/5,  1/1] ;
     Solution = [7/2,  8/4,  6/7,  5/3,  4/6,  3/8,  2/5,  1/1] ;
     Yes
```

Problém osmi dam II

počet možností u řešení I $= 64 \cdot 63 \cdot 62 \ldots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

Problém osmi dam II

počet možností u řešení I $= 64 \cdot 63 \cdot 62 \ldots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

omezení stavového prostoru – každá dáma má svůj sloupec

počet možností u řešení II $= 8 \cdot 7 \cdot 6 \ldots \cdot 1 = 40\,320$

Problém osmi dam II

počet možností u řešení I $= 64 \cdot 63 \cdot 62 \ldots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

omezení stavového prostoru – každá dáma má svůj sloupec

počet možností u řešení II $= 8 \cdot 7 \cdot 6 \ldots \cdot 1 = 40\,320$

```
solution(S) :- template(S), sol(S).

sol ([]).
sol([X/Y|Others]) :- sol(Others), member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                     noattack(X/Y,Others).
noattack(_,[]).
noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,
                                noattack(X/Y,Others).

template([1/Y1,2/Y2,3/Y3,4/Y4,5/Y5,6/Y6,7/Y7,8/Y8]).
```

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \longrightarrow D_u = [-7..7]$$
$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \quad \longrightarrow \quad D_u = [-7..7]$$
$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad\quad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \longrightarrow D_u = [-7..7]$$

$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

```
solution(YList) :- sol(YList    ,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],
                       [−7,−6,−5,−4,−3,−2,−1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).
sol  ([],[],  Dy,Du,Dv).
sol([Y|YList],[X|Dx1],Dy,Du,Dv) :- del(Y,Dy,Dy1), U is X−Y, del(U,Du,Du1), V is X+Y,
                                   del(V,Dv,Dv1), sol(YList,Dx1,Dy1,Du1,Dv1).

del(Item,[Item|List], List).
del(Item,[First|List],[First|List1]) :- del(Item,List,List1).
```

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \quad \longrightarrow \quad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad\quad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

```
solution(YList) :- sol(YList    ,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],
                                [−7,−6,−5,−4,−3,−2,−1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                                [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).
sol  ([],[],  Dy,Du,Dv).
sol([Y|YList],[X|Dx1],Dy,Du,Dv) :− del(Y,Dy,Dy1), U is X−Y, del(U,Du,Du1), V is X+Y,
                                   del(V,Dv,Dv1), sol(YList,Dx1,Dy1,Du1,Dv1).

del(Item,[Item|List], List).
del(Item,[First|List],[First|List1]) :− del(Item,List,List1).
```

Problém n dam pro $n = 100$:

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \longrightarrow D_u = [-7..7]$$

$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

```
solution(YList) :- sol(YList    ,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],
                                [−7,−6,−5,−4,−3,−2,−1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                                [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).
sol  ([],[],  Dy,Du,Dv).
sol([Y|YList],[X|Dx1],Dy,Du,Dv) :− del(Y,Dy,Dy1), U is X−Y, del(U,Du,Du1), V is X+Y,
                                   del(V,Dv,Dv1), sol(YList,Dx1,Dy1,Du1,Dv1).

del(Item,[Item|List], List).
del(Item,[First|List],[First|List1]) :− del(Item,List,List1).
```

Problém n dam pro $n = 100$: řešení I $\ldots 10^{400}$

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \longrightarrow D_u = [-7..7]$$

$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

```
solution(YList) :- sol(YList   ,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],
                       [−7,−6,−5,−4,−3,−2,−1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).
sol  ([],[],  Dy,Du,Dv).
sol([Y|YList],[X|Dx1],Dy,Du,Dv) :- del(Y,Dy,Dy1), U is X−Y, del(U,Du,Du1), V is X+Y,
                                   del(V,Dv,Dv1), sol(YList,Dx1,Dy1,Du1,Dv1).

del(Item,[Item|List], List).
del(Item,[First|List],[First|List1]) :- del(Item,List,List1).
```

Problém n dam pro $n = 100$: řešení I $\ldots 10^{400}$ řešení II $\ldots 10^{158}$

Problém osmi dam III

k souřadnicím x a y $\longrightarrow$ přidáme i souřadnice diagonály u a v

$$u = x - v \qquad D_x = [1..8] \longrightarrow D_u = [-7..7]$$

$$v = x + v \qquad D_y = [1..8] \qquad D_v = [2..16]$$

po každém umístění dámy aktualizujeme seznamy volných pozic počet možností u řešení III $= 2\,057$

```
solution(YList) :- sol(YList   ,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],
                       [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).
sol  ([],[],  Dy,Du,Dv).
sol([Y|YList],[X|Dx1],Dy,Du,Dv) :- del(Y,Dy,Dy1), U is X-Y, del(U,Du,Du1), V is X+Y,
                                   del(V,Dv,Dv1), sol(YList,Dx1,Dy1,Du1,Dv1).

del(Item,[Item|List], List).
del(Item,[First|List],[First|List1]) :- del(Item,List,List1).
```

Problém n dam pro $n = 100$: řešení I $\ldots 10^{400}$ řešení II $\ldots 10^{158}$ řešení III $\ldots 10^{52}$

PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

Řešení problému prohledáváním stavového prostoru:

- ➜ předpoklady – statické a deterministické prostředí, diskrétní stavy
- ➜ *stavový prostor*
- ➜ *počáteční stav* **init(State)**
- ➜ *cílová podmínka* **goal(State)**
- ➜ *přechodové akce* **move(State,NewState)**
- ➜ *prohledávací strategie*

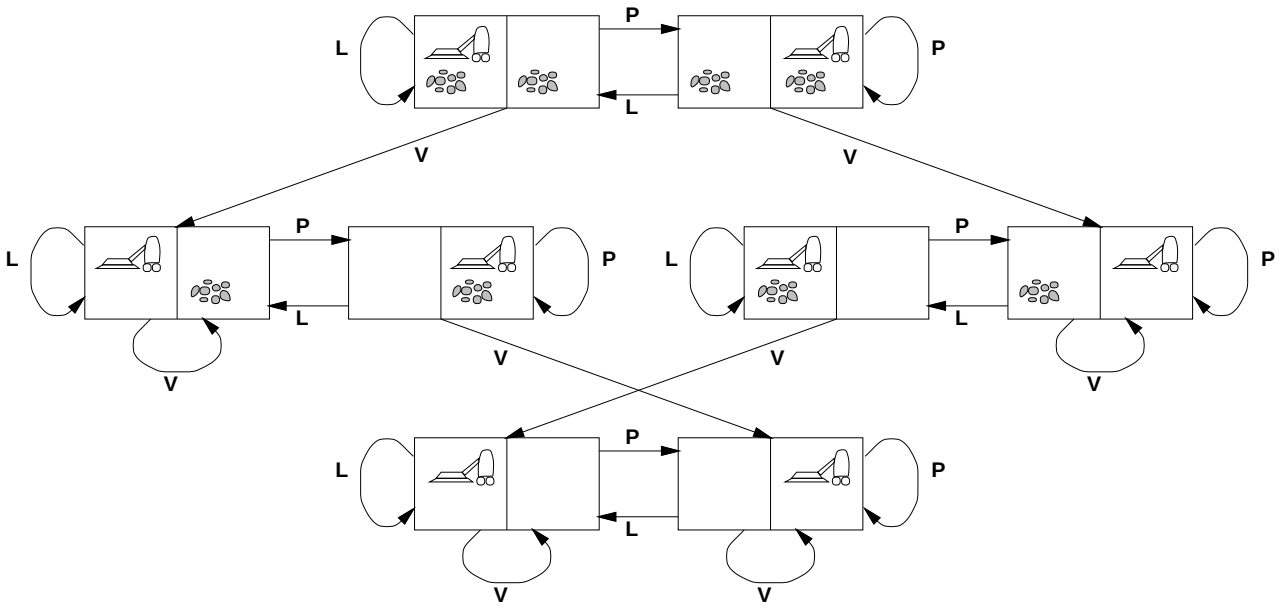
PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

Řešení problému prohledáváním stavového prostoru:

- ➜ předpoklady – statické a deterministické prostředí, diskrétní stavy
- ➜ *stavový prostor*
- ➜ *počáteční stav* **init(State)**
- ➜ *cílová podmínka* **goal(State)**
- ➜ *přechodové akce* **move(State,NewState)**
- ➜ *prohledávací strategie*

Problém agenta Vysavače:

- ➜ máme dvě místnosti (L, P)
- ➜ jeden vysavač (v L nebo P)
- ➜ v každé místnosti je/není špína
- ➜ počet stavů je $2 \times 2^2 = 8$
- ➜ akce $=\{doLeva, doPrava, Vysávej\}$

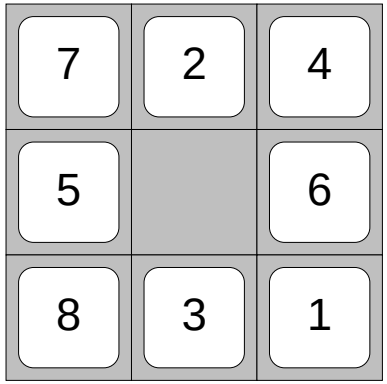


Abstrakce prohledávání stavového prostoru

- ➜ *prohledávací strom*
- ➜ *kořenový uzel*
- ➜ *uzel* prohledávacího stromu:
  - *stav*
  - *rodičovský uzel*
  - *přechodová akce*
  - *hloubka uzlu*
  - *cena* – $g(n)$ cesty, $c(x, a, y)$ přechodu
- ➜ *(optimální) řešení*

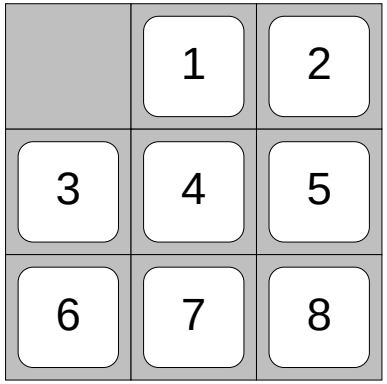
Další příklad – posunovačka

počáteční stav (např.)



$\longrightarrow \quad \ldots \quad \longrightarrow$

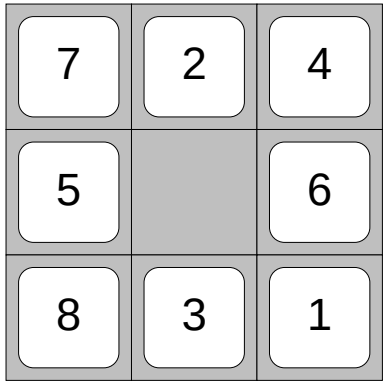
cílový stav



- hra na čtvercové šachovnici $m \times m$ s $n = m^2 - 1$ očíslovanými kameny
- příklad pro šachovnici 3×3, posunování osmi kamenů (8-posunovačka)
- stavy – pozice včech kamenů
- akce – “pohyb” prázdného místa

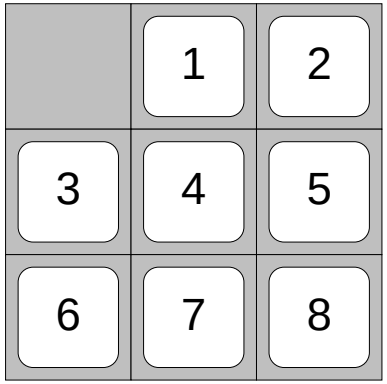
Další příklad – posunovačka

počáteční stav (např.)



$\longrightarrow \quad \ldots \quad \longrightarrow$

cílový stav



- ➜ hra na čtvercové šachovnici $m \times m$ s $n = m^2 - 1$ očíslovanými kameny
- ➜ příklad pro šachovnici 3×3, posunování osmi kamenů (8-posunovačka)
- ➜ stavy – pozice včech kamenů
- ➜ akce – “pohyb” prázdného místa

☞ Optimální řešení obecné n-posunovačky je NP-úplné

Počet stavů	u 8-posunovačky	…	$9!/2 = 181\,440$
	u 15-posunovačky	…	10^{13}
	u 24-posunovačky	…	10^{25}

Reálné problémy řešitelné prohledáváním

- hledání cesty z města A do města B
- hledání itineráře
- problém obchodního cestujícího
- návrh VLSI čipu
- navigace auta, robota, ...
- postup práce automatické výrobní linky
- návrh proteinů – 3D-sekvence aminokyselin
- Internetové vyhledávání informací

Řešení problému prohledáváním

Kostra algoritmu:

```
solution(Solution) :- init(State),solve(State,Solution).

solve(State,[State]) :- goal(State).
solve(State,[State|Sol]) :- move(State,NewState),solve(NewState,Sol).
```

move(State,NewState) – definuje prohledávací strategii

Řešení problému prohledáváním

Kostra algoritmu:

```
solution(Solution) :- init(State),solve(State,Solution).

solve(State,[State]) :- goal(State).
solve(State,[State|Sol]) :- move(State,NewState),solve(NewState,Sol).
```

move(State,NewState) – definuje prohledávací strategii

Porovnání strategií:

- ➜ úplnost
- ➜ optimálnost
- ➜ časová složitost
- ➜ prostorová složitost

Řešení problému prohledáváním

Kostra algoritmu:

```
solution(Solution) :- init(State),solve(State,Solution).

solve(State,[State]) :- goal(State).
solve(State,[State|Sol]) :- move(State,NewState),solve(NewState,Sol).
```

move(State,NewState) – definuje prohledávací strategii

Porovnání strategií:

- ➜ úplnost
- ➜ optimálnost
- ➜ časová složitost
- ➜ prostorová složitost

složitost závisí na:

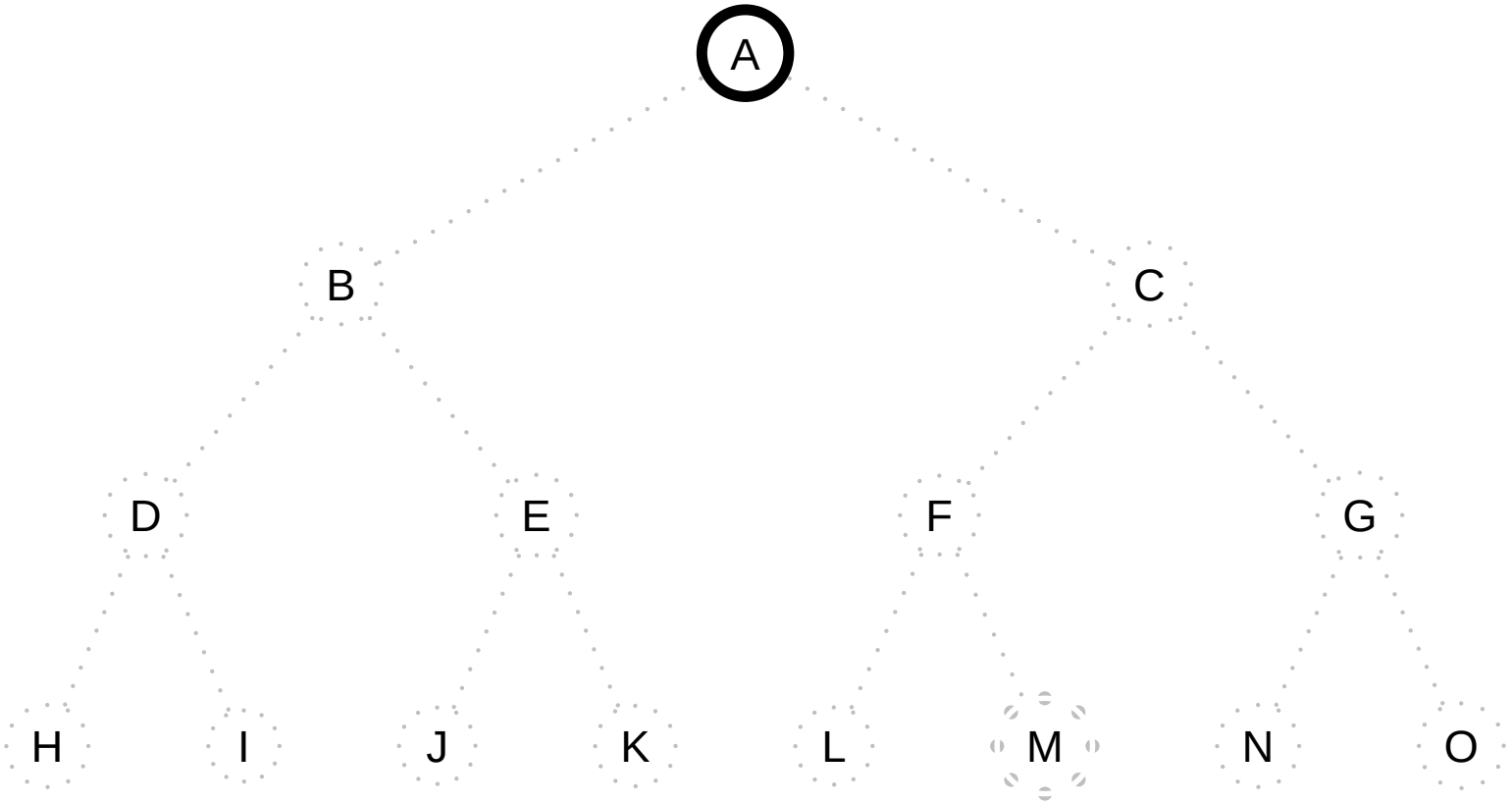
- ➜ b – faktor větvení (branching factor)
- ➜ d – hloubka cíle (goal depth)
- ➜ m – maximální hloubka větve/délka cesty (maximum depth/path)

Neinformované prohledávání

- prohledávání do hloubky
- prohledávání do hloubky s limitem
- prohledávání do šířky
- prohledávání podle ceny
- prohledávání s postupným prohlubováním

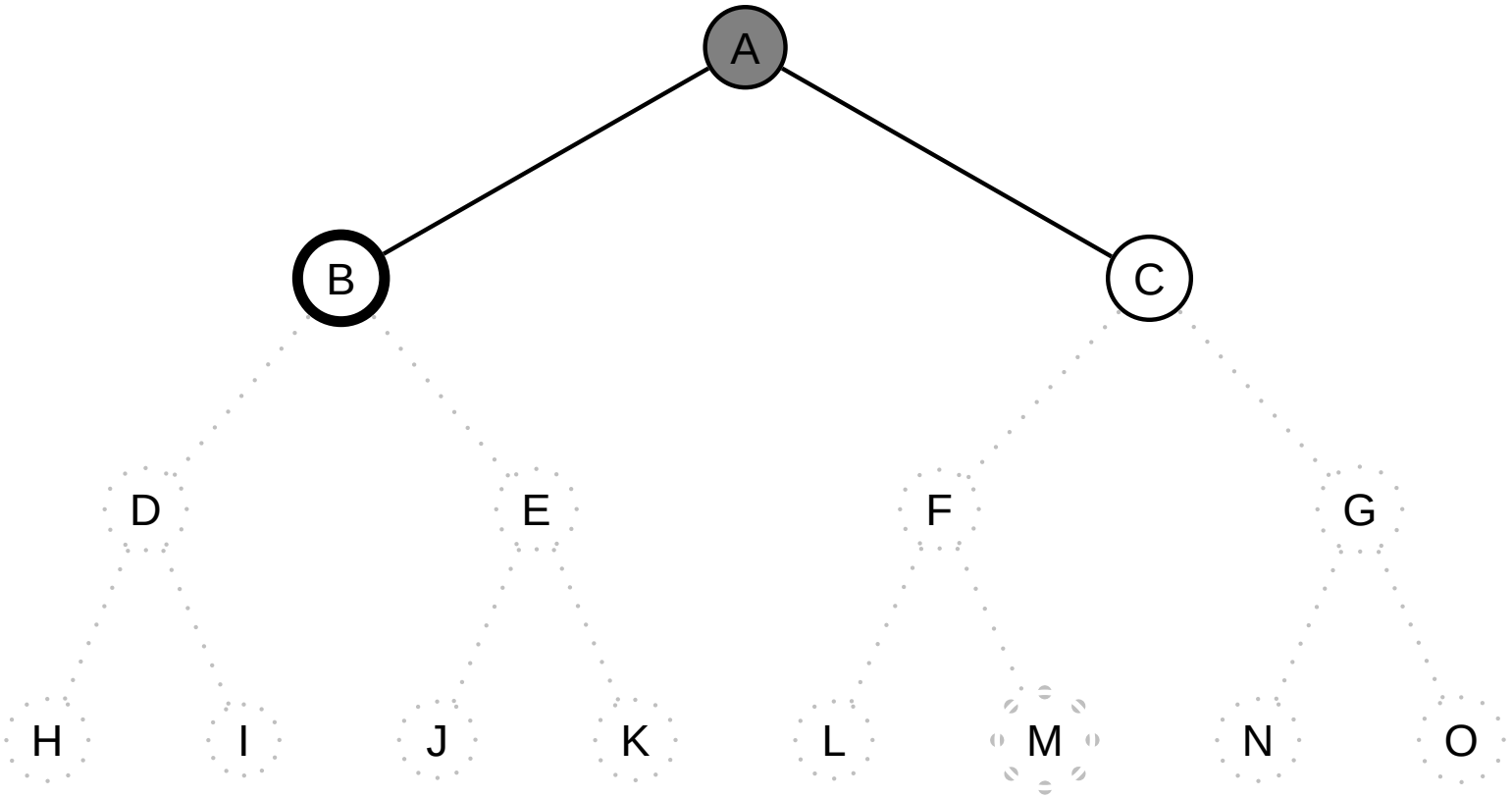
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



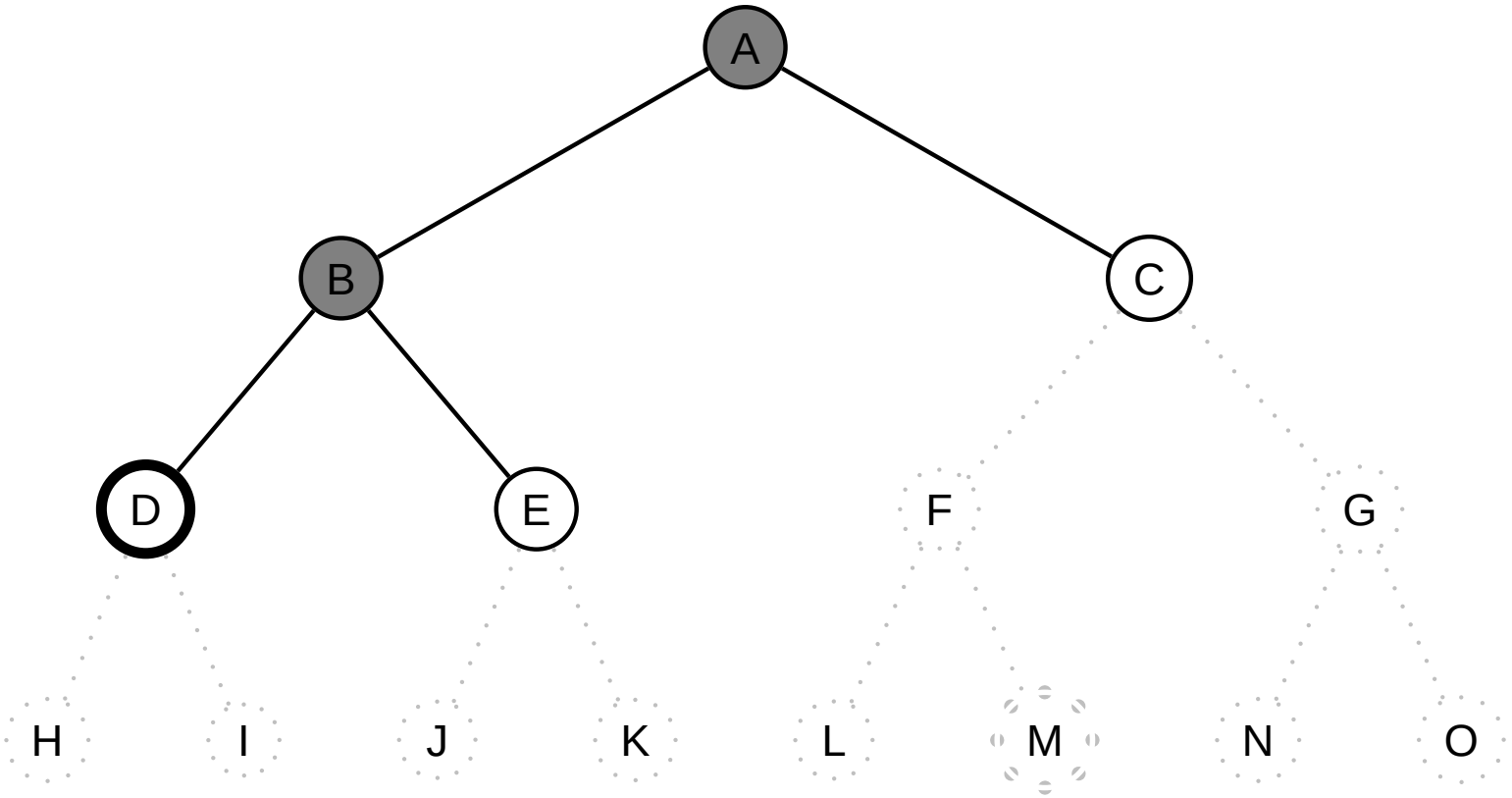
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



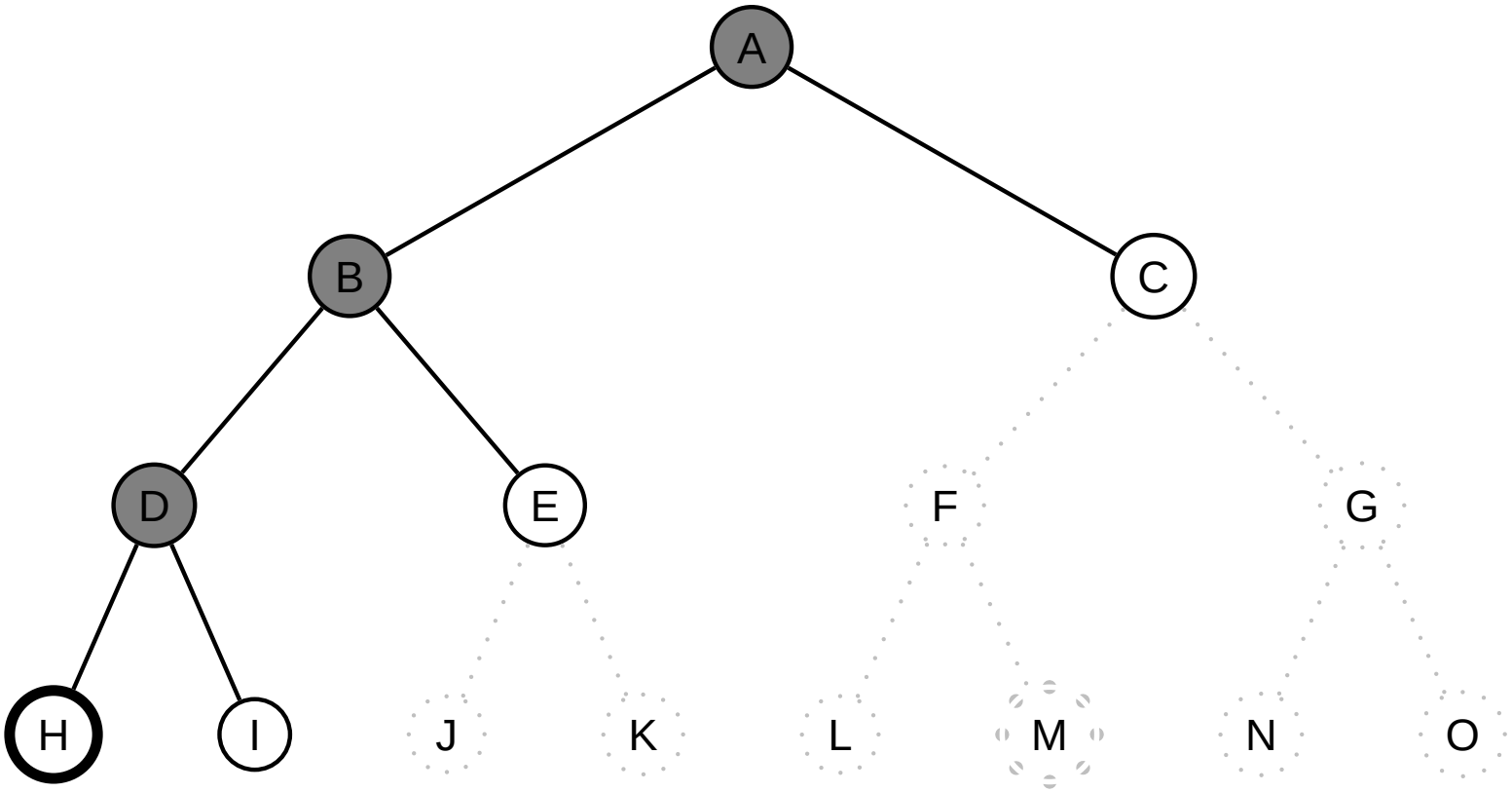
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



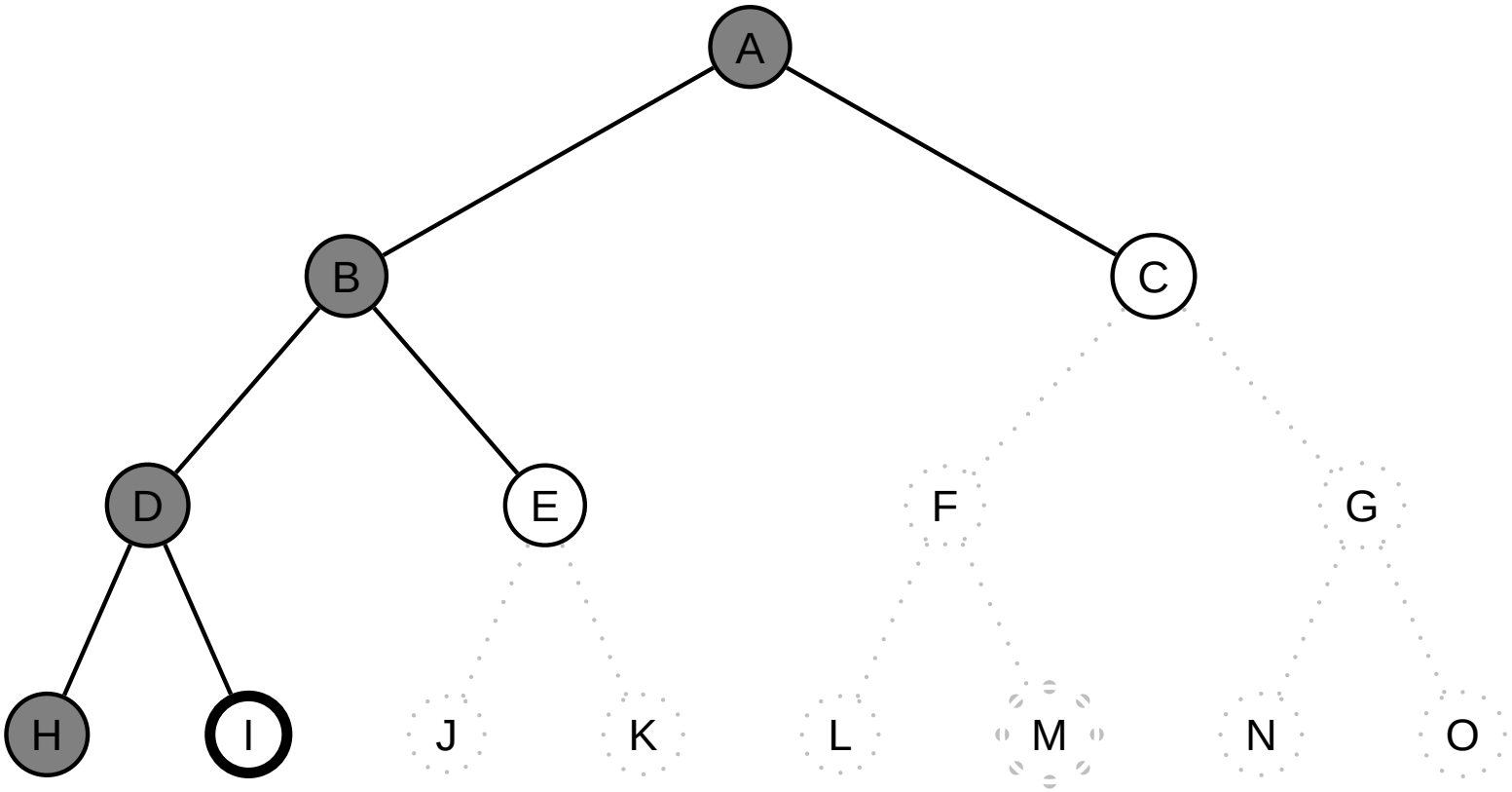
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



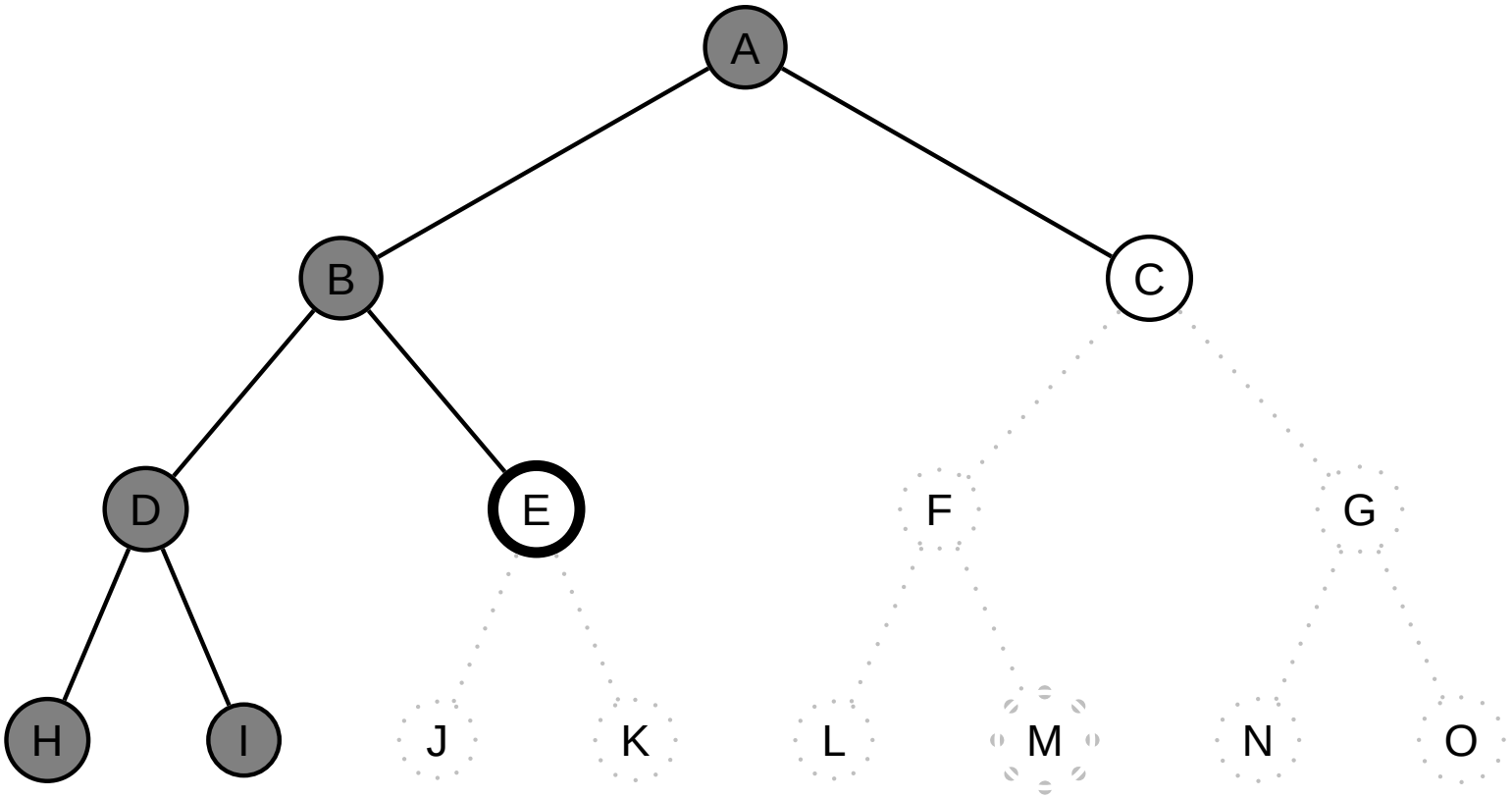
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



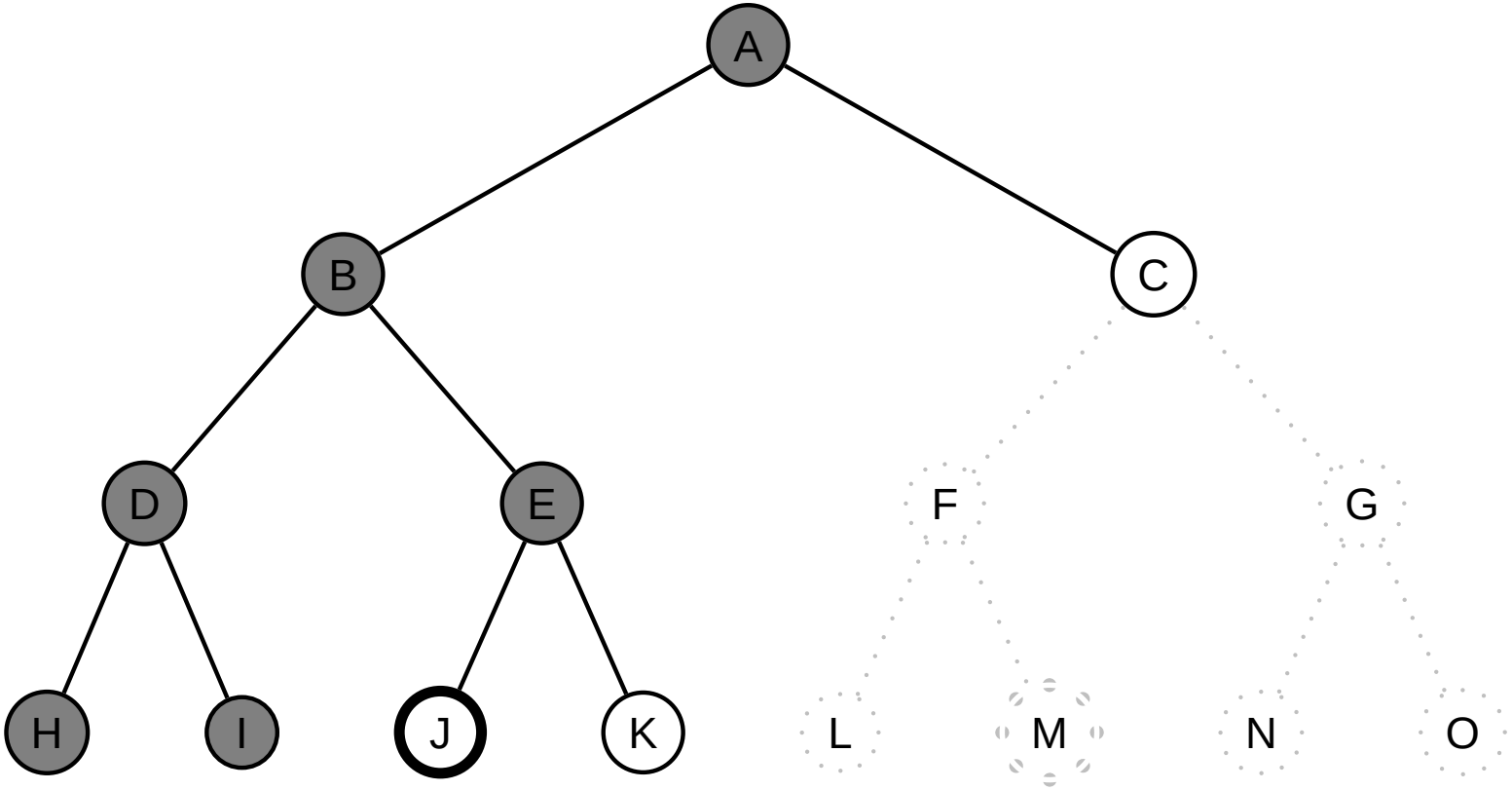
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



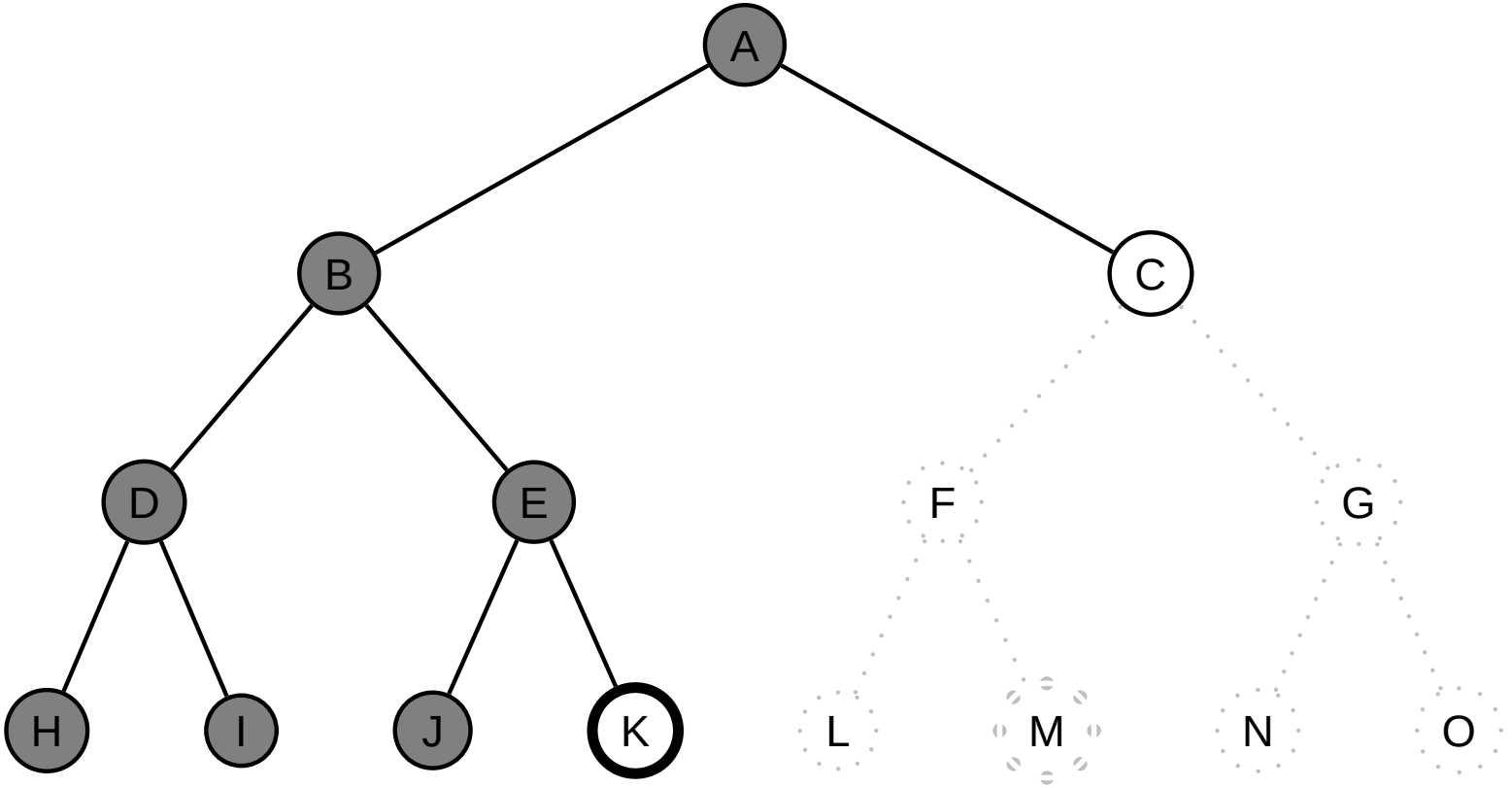
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



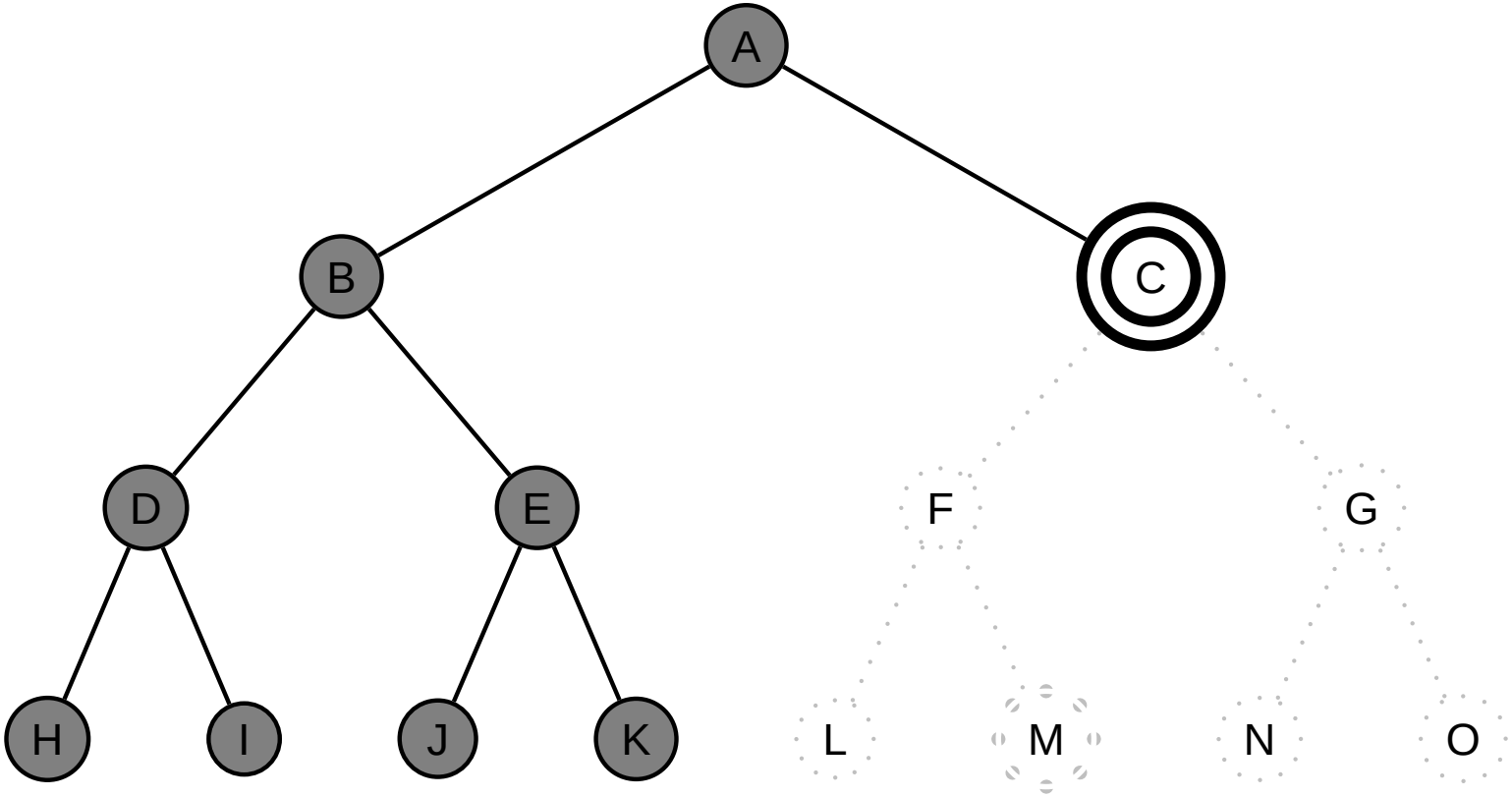
PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



Prohledávání do hloubky

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do zásobníku (fronty LIFO) $\times$ Prolog – využití rekurze

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do zásobníku (fronty LIFO) $\times$ Prolog – využití rekurze

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search ([], Node,Solution).

depth_first_search (Path,Node,[Node|Path]) :- goal(Node).
depth_first_search (Path,Node,Sol) :- move(Node,Node1),
    not(member(Node1,Path)),depth_first_search([Node|Path],Node1,Sol).
```

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

úplnost

optimálnost

časová složitost

prostorová složitost

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

úplnost	není úplný (nekonečná větev, cykly)
optimálnost	
časová složitost	
prostorová složitost	

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

úplnost	není úplný (nekonečná větev, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	
prostorová složitost	

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

Prohledávání do hloubky – vlastnosti

úplnost	není úplný (nekonečná větev, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	$O(b^m)$
prostorová složitost	

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

Prohledávání do hloubky – vlastnosti

úplnost	není úplný (nekonečná větev, cykly)
optimálnost	není optimální
časová složitost	$O(b^m)$
prostorová složitost	$O(bm)$, lineární

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití “zarážky” = limit hloubky ℓ

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search_limit (Node,Solution,ℓ).

depth_first_search_limit (Node,[Node],_) :- goal(Node).
depth_first_search_limit (Node,[Node|Sol],MaxDepth) :- MaxDepth>0, move(Node,Node1),
    Max1 is MaxDepth−1,depth_first_search_limit(Node1,Sol,Max1).
```

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití “zarážky” = limit hloubky ℓ

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search_limit (Node,Solution,ℓ).

depth_first_search_limit (Node,[Node],_) :- goal(Node).
depth_first_search_limit (Node,[Node|Sol],MaxDepth) :- MaxDepth>0, move(Node,Node1),
    Max1 is MaxDepth−1,depth_first_search_limit(Node1,Sol,Max1).
```

neúspěch (**fail**) má dvě možné interpretace – vyčerpání limitu nebo neexistenci řešení

PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití "zarážky" = limit hloubky ℓ

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search_limit (Node,Solution,ℓ).

depth_first_search_limit (Node,[Node],_) :- goal(Node).
depth_first_search_limit (Node,[Node|Sol],MaxDepth) :- MaxDepth>0, move(Node,Node1),
    Max1 is MaxDepth−1,depth_first_search_limit(Node1,Sol,Max1).
```

neúspěch (**fail**) má dvě možné interpretace – vyčerpání limitu nebo neexistenci řešení

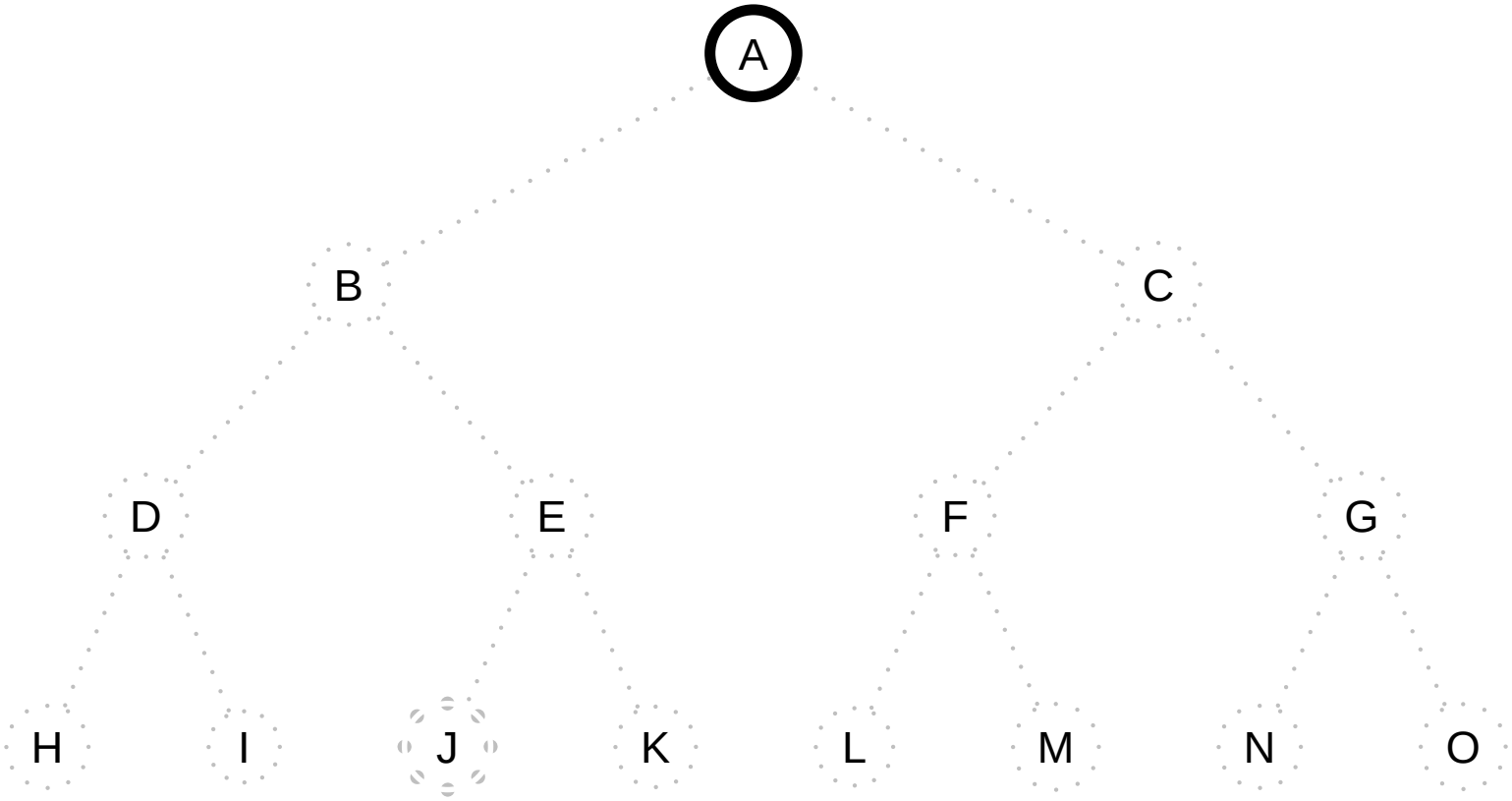
Vlastnosti:

úplnost	není úplný (pro $\ell < d$)
optimálnost	není optimální (pro $\ell > d$)
časová složitost	$O(b^\ell)$
prostorová složitost	$O(b\ell)$

dobrá volba limitu ℓ – podle znalosti problému

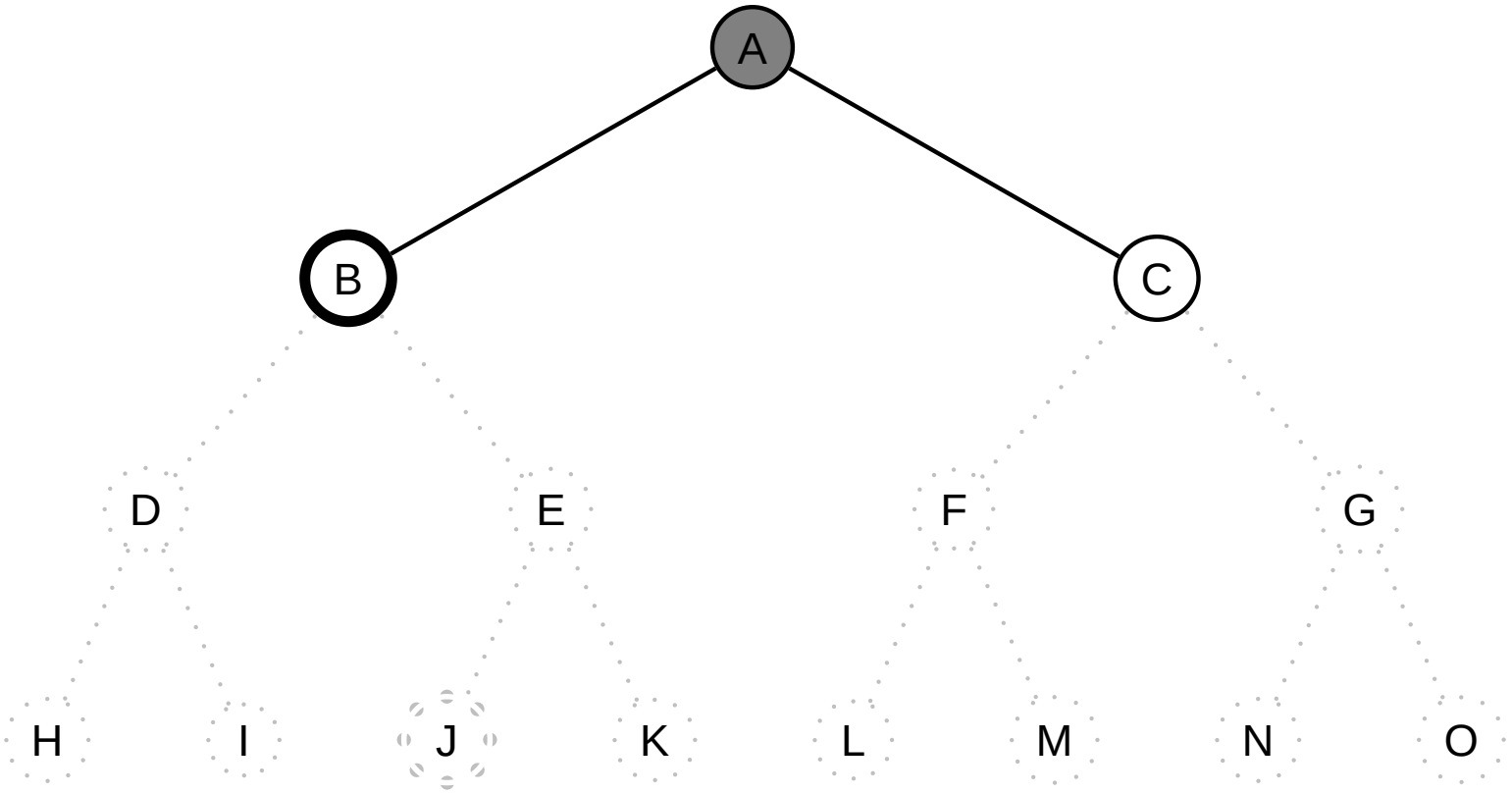
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



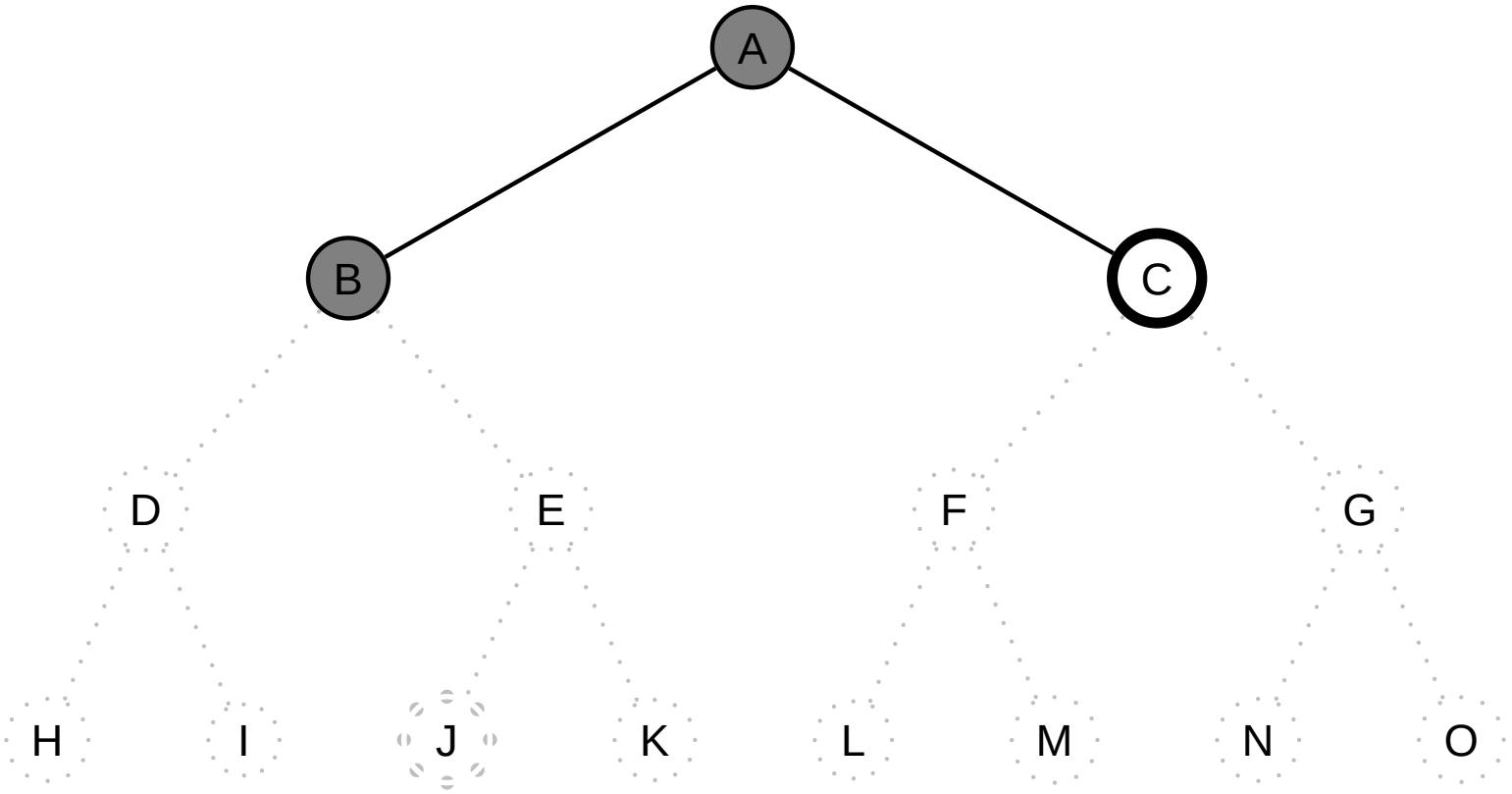
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



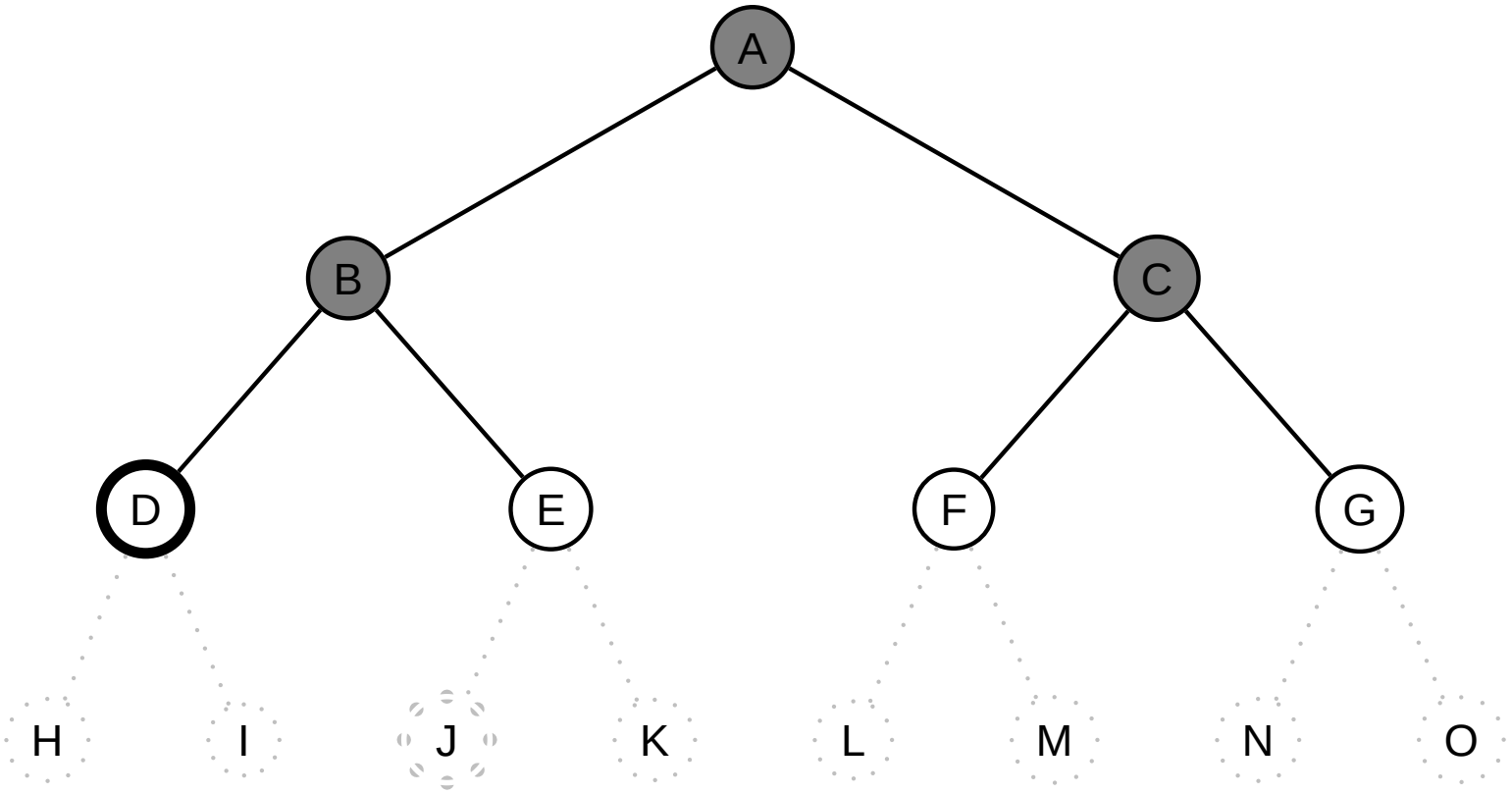
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



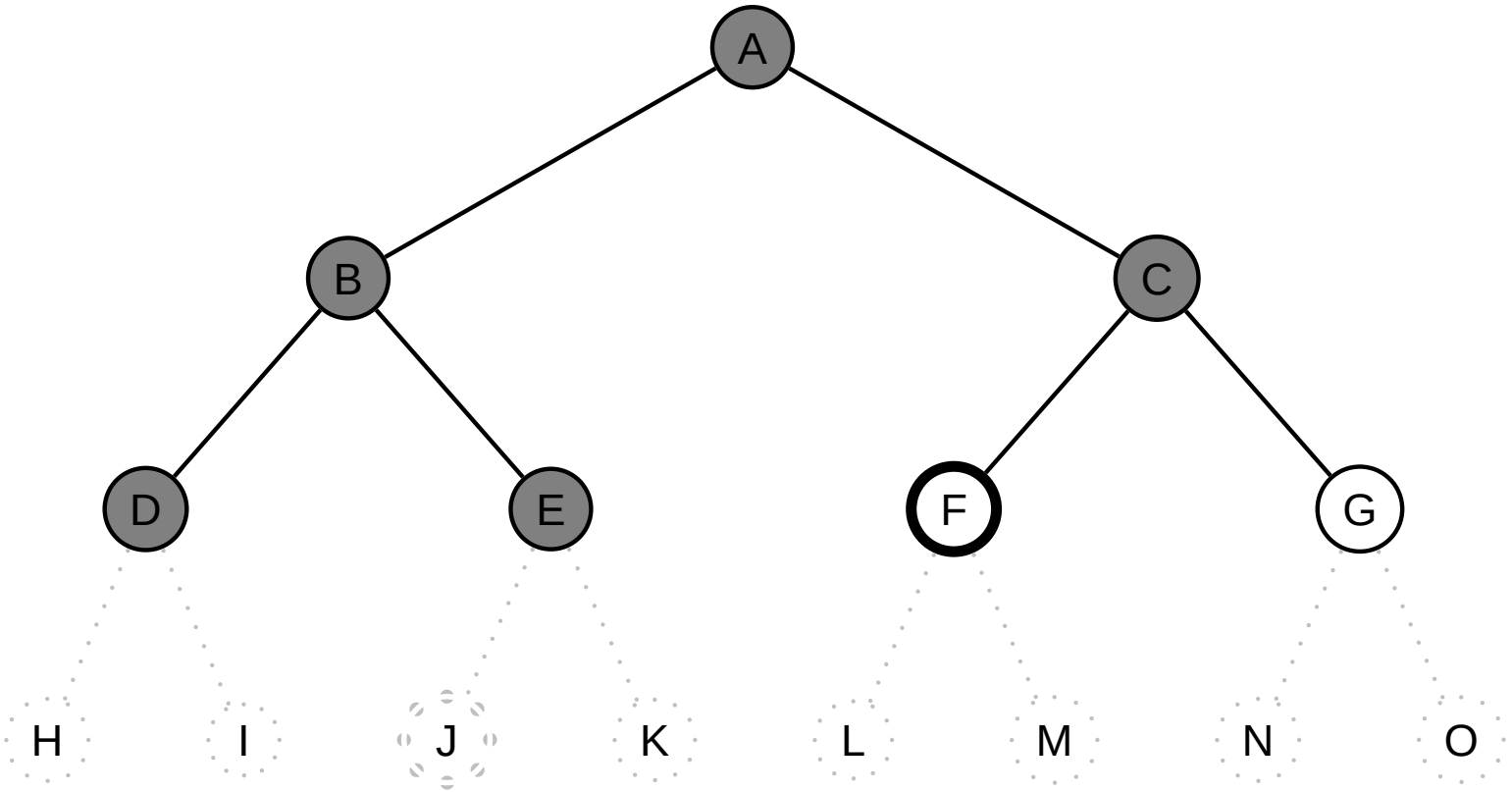
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



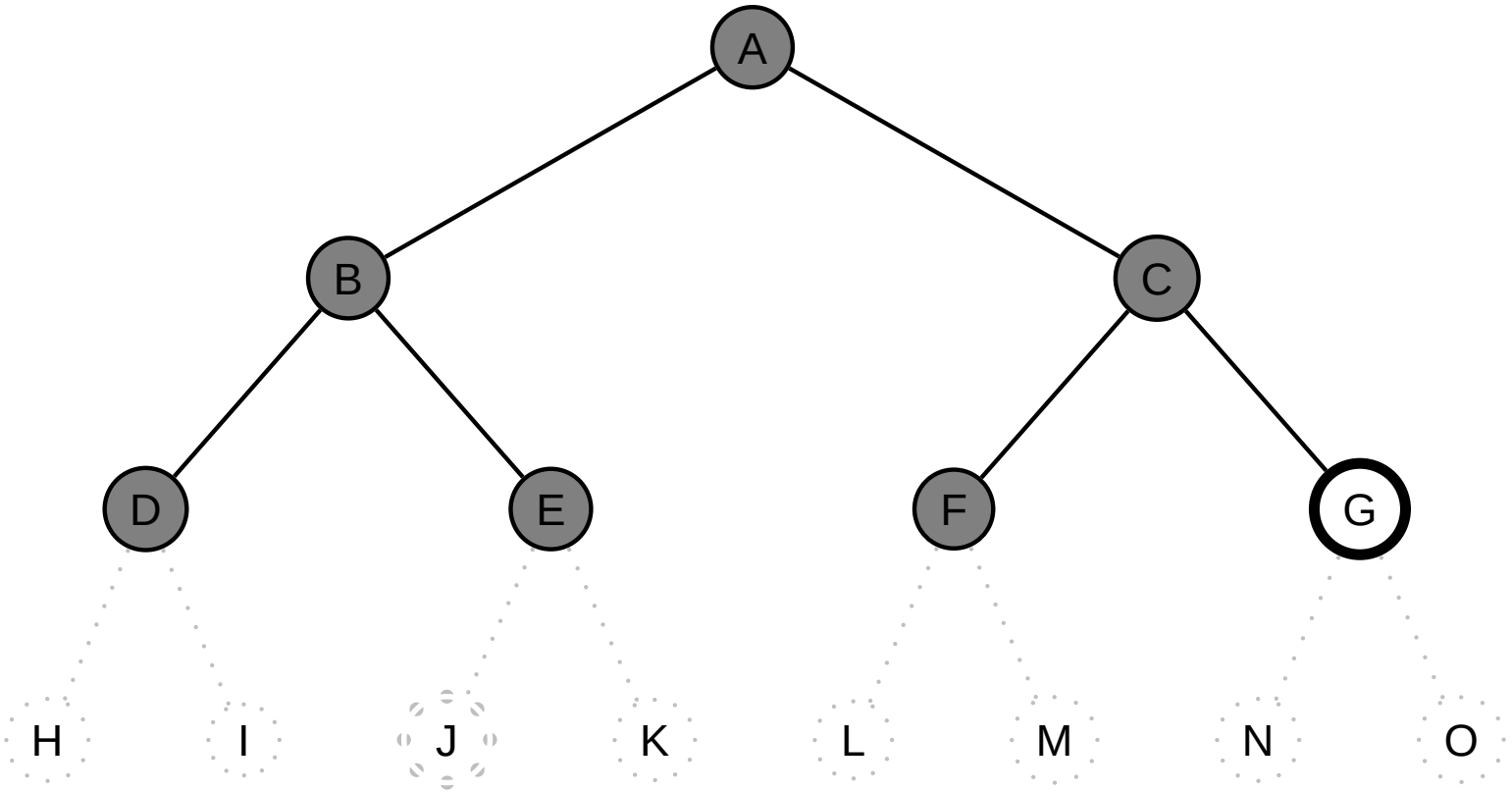
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



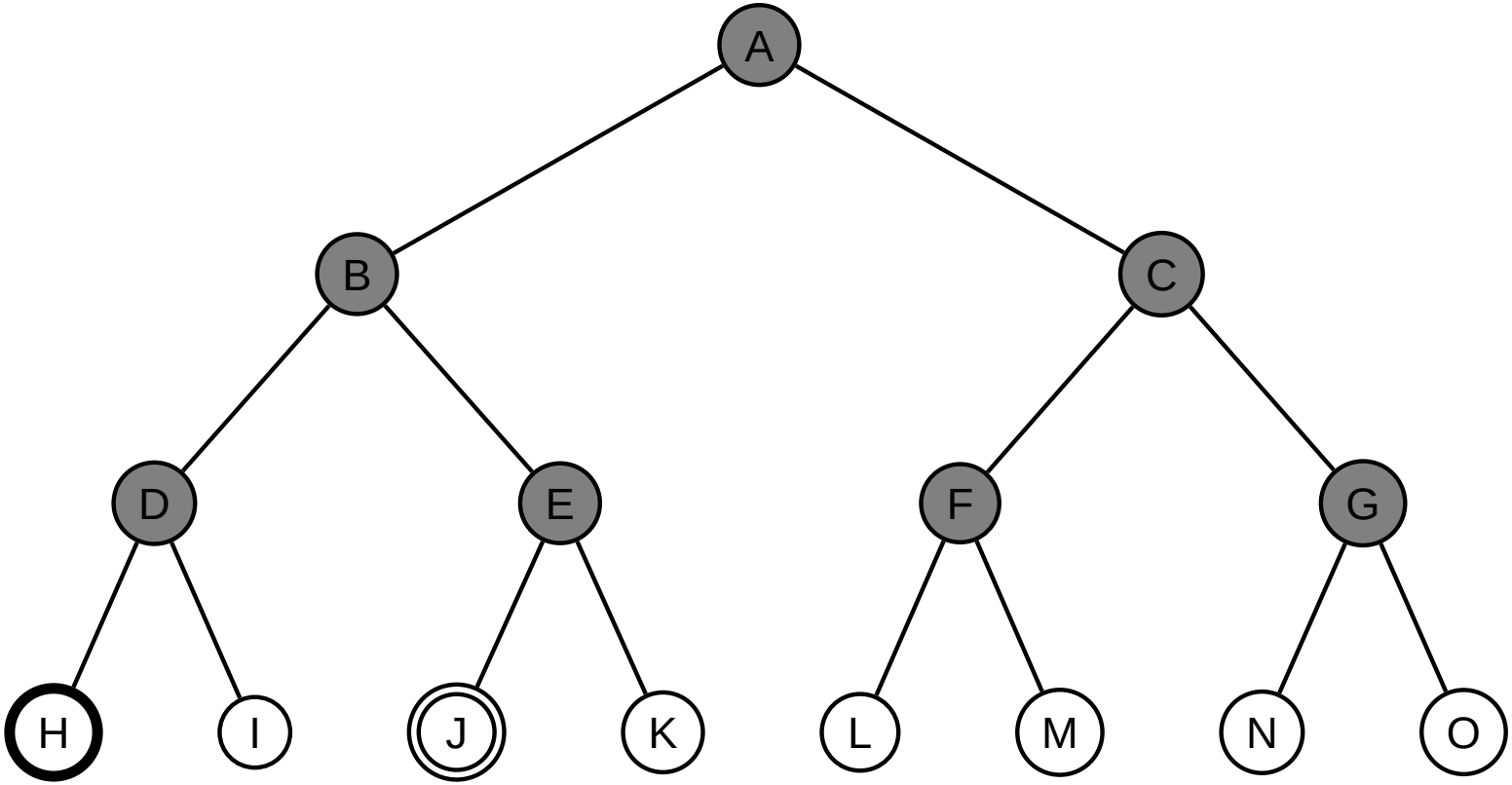
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



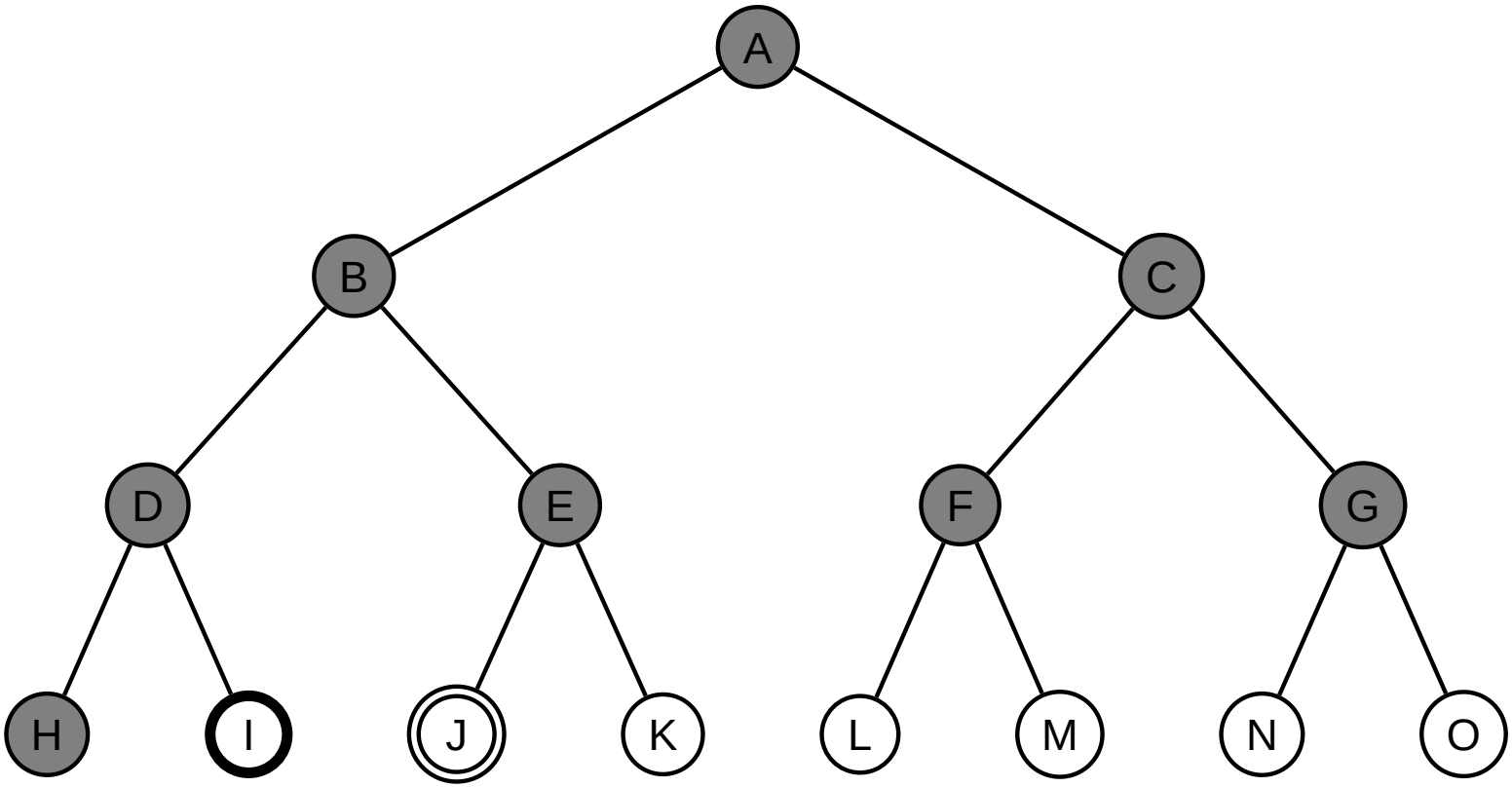
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



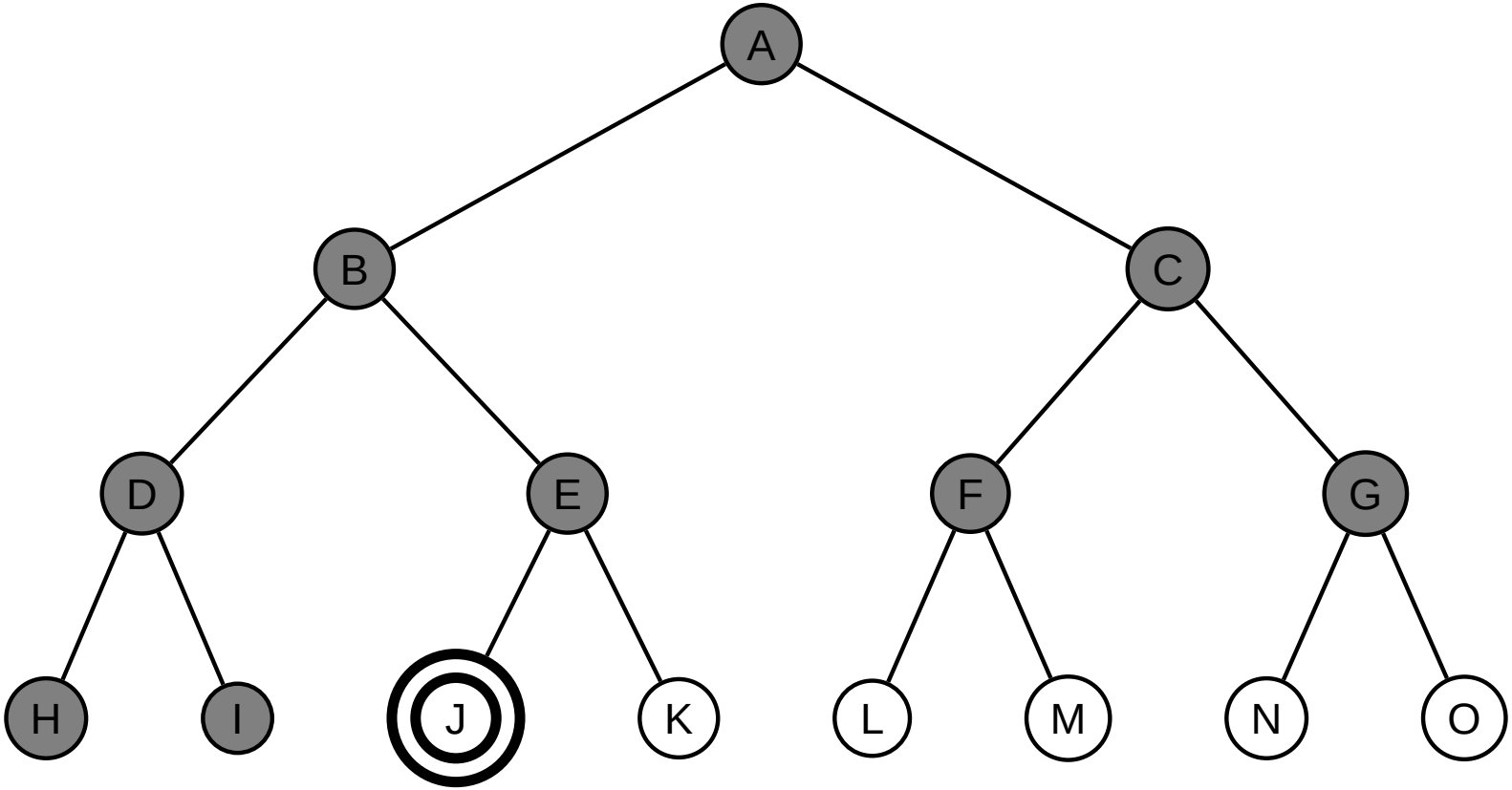
PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



Prohledávání do šířky

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do fronty (FIFO) × Prolog – udržuje seznam cest

```
solution(Start,Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths],Solution) :-
    bagof([M,N|Path],   (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
     breadth_first_search (Path1,Solution);  breadth_first_search (Paths,Solution).
```

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do fronty (FIFO) × Prolog – udržuje seznam cest

```
solution(Start,Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths],Solution) :-
    bagof([M,N|Path],   (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
     breadth_first_search (Path1,Solution);  breadth_first_search (Paths,Solution).
```

bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)
postupně vyhodnocuje **Cíl** *a všechny vyhovující instance* **Prom** *řadí do seznamu* **Sezn**

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do fronty (FIFO) × Prolog – udržuje seznam cest

```
solution(Start,Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths],Solution) :-
    bagof([M,N|Path],  (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
     breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
```

bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)
postupně vyhodnocuje **Cíl** *a všechny vyhovující instance* **Prom** *řadí do seznamu* **Sezn**

p :- a,b;c. ⇔ **p :- (a,b);c.**

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do fronty (FIFO) × Prolog – udržuje seznam cest

```
solution(Start,Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths],Solution) :-
    bagof([M,N|Path],  (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
     breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
```

bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)
postupně vyhodnocuje **Cíl** *a všechny vyhovující instance* **Prom** *řadí do seznamu* **Sezn**

p :- a,b;c. ⇔ **p :- (a,b);c.**

Vylepšení:

➜ **append** ⟶ **append_dl**

➜ seznam cest:

[[a]]	**l(a)**
[[b,a],[c,a]]	**t(a,[l(b),l(c)])**
[[c,a],[d,b,a],[e,b,a]]	**t(a,[t(b,[l(d),l(e)]),l(c)])**
[[d,b,a],[e,b,a],[f,c,a],[g,c,a]]	**t(a,[t(b,[l(d),l(e)]),t(c,[l(f),l(g)])])**

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

úplnost

optimálnost

časová složitost

prostorová složitost

Prohledávání do šířky – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	
časová složitost	
prostorová složitost	

Prohledávání do šířky – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
časová složitost	
prostorová složitost	

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
časová složitost	$1 + b + b^2 + b^3 + \ldots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$, exponenciální v d
prostorová složitost	

PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
časová složitost	$1 + b + b^2 + b^3 + \ldots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$, exponenciální v d
prostorová složitost	$O(b^{d+1})$ (každý uzel v paměti)

Prohledávání do šířky – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
časová složitost	$1 + b + b^2 + b^3 + \ldots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$, exponenciální v d
prostorová složitost	$O(b^{d+1})$ (každý uzel v paměti)

Největší problém – paměť:

Hloubka	Uzlů	Čas	Paměť
2	1100	0.11 sek	1 MB
4	111 100	11 sek	106 MB
6	10^7	19 min	10 GB
8	10^9	31 hod	1 TB
10	10^{11}	129 dnů	101 TB
12	10^{13}	35 let	10 PB
14	10^{15}	3 523 let	1 EB

Ani čas není dobrý $\longrightarrow$ potřebujeme informované strategie prohledávání.

Prohledávání podle ceny

- ➜ BFS je optimální pro rovnoměrně ohodnocené stromy × prohledávání podle ceny (Uniform-cost Search) je optimální pro obecné ohodnocení
- ➜ fronta uzlů se udržuje uspořádaná podle ceny cesty

Prohledávání podle ceny

➜ BFS je optimální pro rovnoměrně ohodnocené stromy × prohledávání podle ceny (Uniform-cost Search) je optimální pro obecné ohodnocení

➜ fronta uzlů se udržuje uspořádaná podle ceny cesty

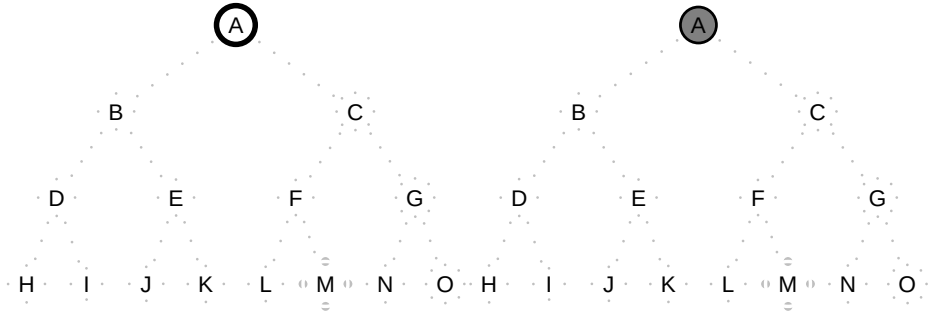
Vlastnosti:

úplnost	je úplný (pro cena $\geq \epsilon$)	
optimálnost	je optimální (pro cena $\geq \epsilon$, $g(n)$ roste)	
časová složitost	počet uzlů s $g \leq C^*$, $O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$,	kde $C^*\ldots$ cena optimálního řešení
prostorová složitost	počet uzlů s $g \leq C^*$, $O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	

PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

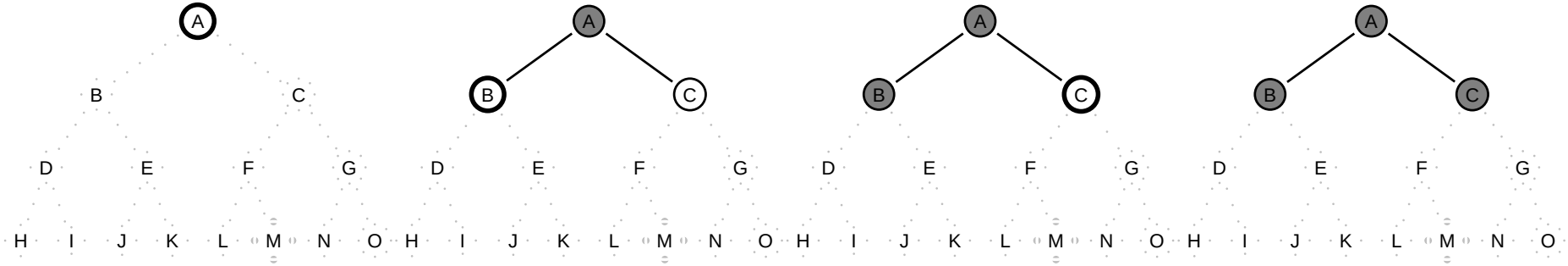
limit=0



PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

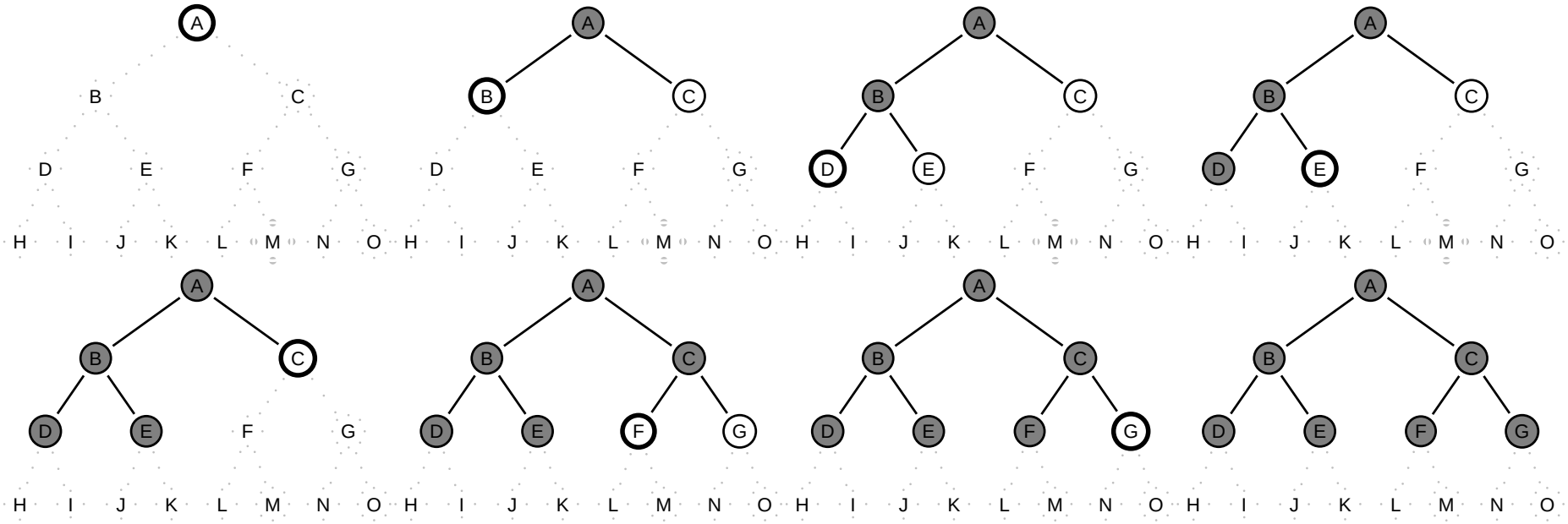
limit=1



PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

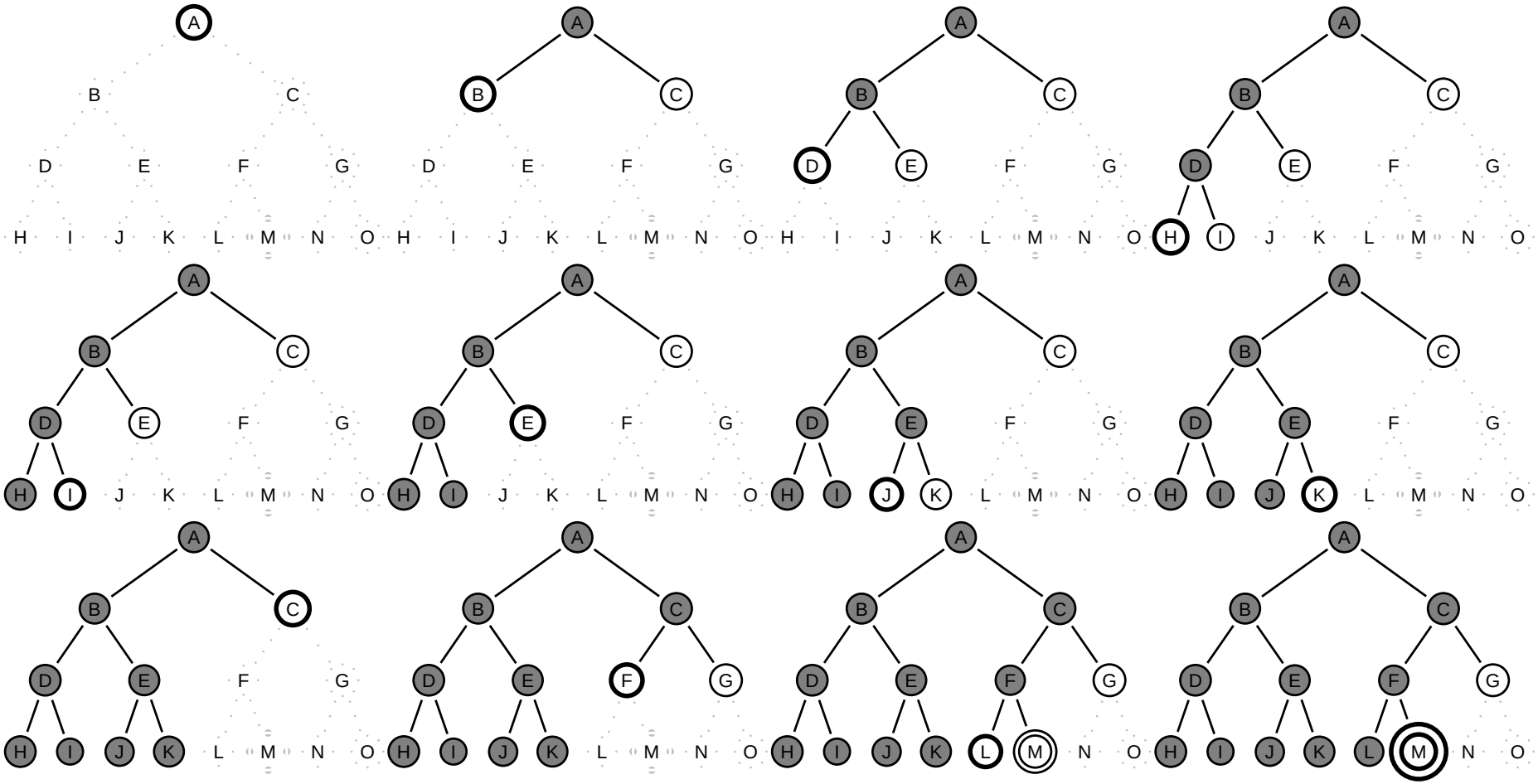
limit=2



PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

limit=3



Prohledávání s postupným prohlubováním – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
časová složitost	$d(b) + (d-1)b^2 + \ldots + 1(b^d) = O(b^d)$
prostorová složitost	$O(bd)$

PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM – VLASTNOSTI

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
časová složitost	$d(b) + (d-1)b^2 + \ldots + 1(b^d) = O(b^d)$
prostorová složitost	$O(bd)$

➜ kombinuje výhody BFS a DFS:

- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

Prohledávání s postupným prohlubováním – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
časová složitost	$d(b) + (d-1)b^2 + \ldots + 1(b^d) = O(b^d)$
prostorová složitost	$O(bd)$

➜ kombinuje výhody BFS a DFS:

- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

➜ zdánlivé plýtvání opakovaným generováním

ALE generuje o jednu úroveň míň, např. pro $b = 10, d = 5$:

$$\begin{aligned} N(\mathrm{IDS}) &= 50 + 400 + 3\,000 + 20\,000 + 100\,000 &&= 123\,450 \\ N(\mathrm{BFS}) &= 10 + 100 + 1\,000 + 10\,000 + 100\,000 + 999\,990 &&= 1\,111\,100 \end{aligned}$$

Prohledávání s postupným prohlubováním – vlastnosti

úplnost	je úplný (pro konečné b)
optimálnost	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
časová složitost	$d(b) + (d-1)b^2 + \ldots + 1(b^d) = O(b^d)$
prostorová složitost	$O(bd)$

➜ kombinuje výhody BFS a DFS:
- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

➜ zdánlivé plýtvání opakovaným generováním
ALE generuje o jednu úroveň míň, např. pro $b = 10, d = 5$:

$$\begin{aligned} N(\mathrm{IDS}) &= 50 + 400 + 3\,000 + 20\,000 + 100\,000 &&= 123\,450 \\ N(\mathrm{BFS}) &= 10 + 100 + 1\,000 + 10\,000 + 100\,000 + 999\,990 &&= 1\,111\,100 \end{aligned}$$

IDS je nejvhodnější neinformovaná strategie pro velké prostory a neznámou hloubku řešení.

SHRNUTÍ VLASTNOSTÍ ALGORITMŮ NEINFORMOVANÉHO PROHLEDÁVÁNÍ

Vlastnost	*do hloubky*	*do hloubky s limitem*	*do šířky*	*podle ceny*	*s postupným prohlubováním*
úplnost	ne	ano, pro $l \geq d$	ano*	ano*	ano*
optimálnost	ne	ne	ano*	ano*	ano*
časová složitost	$O(b^m)$	$O(b^\ell)$	$O(b^{d+1})$	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	$O(b^d)$
prostorová složitost	$O(bm)$	$O(b\ell)$	$O(b^{d+1})$	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	$O(bd)$