OSNOVE UMETNE INTELIGENCE
2021/22

igranje iger

planiranje

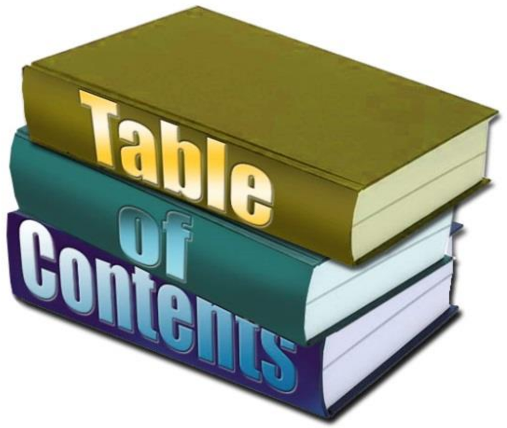
Pridobljeno znanje s prejšnjih predavanj

- **preiskovanje grafov AND/OR**
  - princip deli in vladaj (AND/OR), rešitve so cela rešitvena drevesa
  - algoritem AO*: uporablja lokalne funkcije $F(N) = G(N) + H(N)$, ocenjevanje kakovosti rešitev od spodaj navzgor
  - ločena obravnava vozlišč tipa AND in vozlišč tipa OR
  - preiskovanje v nedeterminističnem okolju (prevedba problema v graf AND/OR)

- **preiskovanje iger brez informacije o stanju**
  - dejanska stanja, verjetna stanja
  - potenčna množica kandidatnih stanj
  - redefinicija problemskega prostora (dilema pri definiciji akcij – unija ali presek)

- **igranje iger med nasprotnikoma**

Pregled

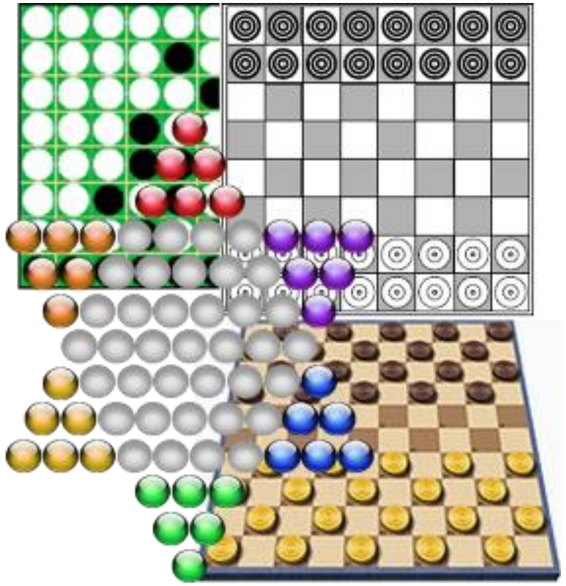


2. **PREISKOVANJE problemskega prostora**
   - neinformirani preiskovalni algoritmi
   - informirani (hevristični) preiskovalni algoritmi
   - lokalni preiskovalni algoritmi
   - preiskovanje AND/OR grafov, prevedba problemov
   - igranje iger
     - predstavitev problema
     - algoritem MINIMAX
     - rezanje alfa-beta

3. **PLANIRANJE in razporejanje opravil**
   - predstavitev problema
   - planiranje s "klasičnim" preiskovanjem prostora stanj
   - planiranje s sredstvi in cilji
   - planiranje z regresiranjem ciljev
   - razporejanje opravil

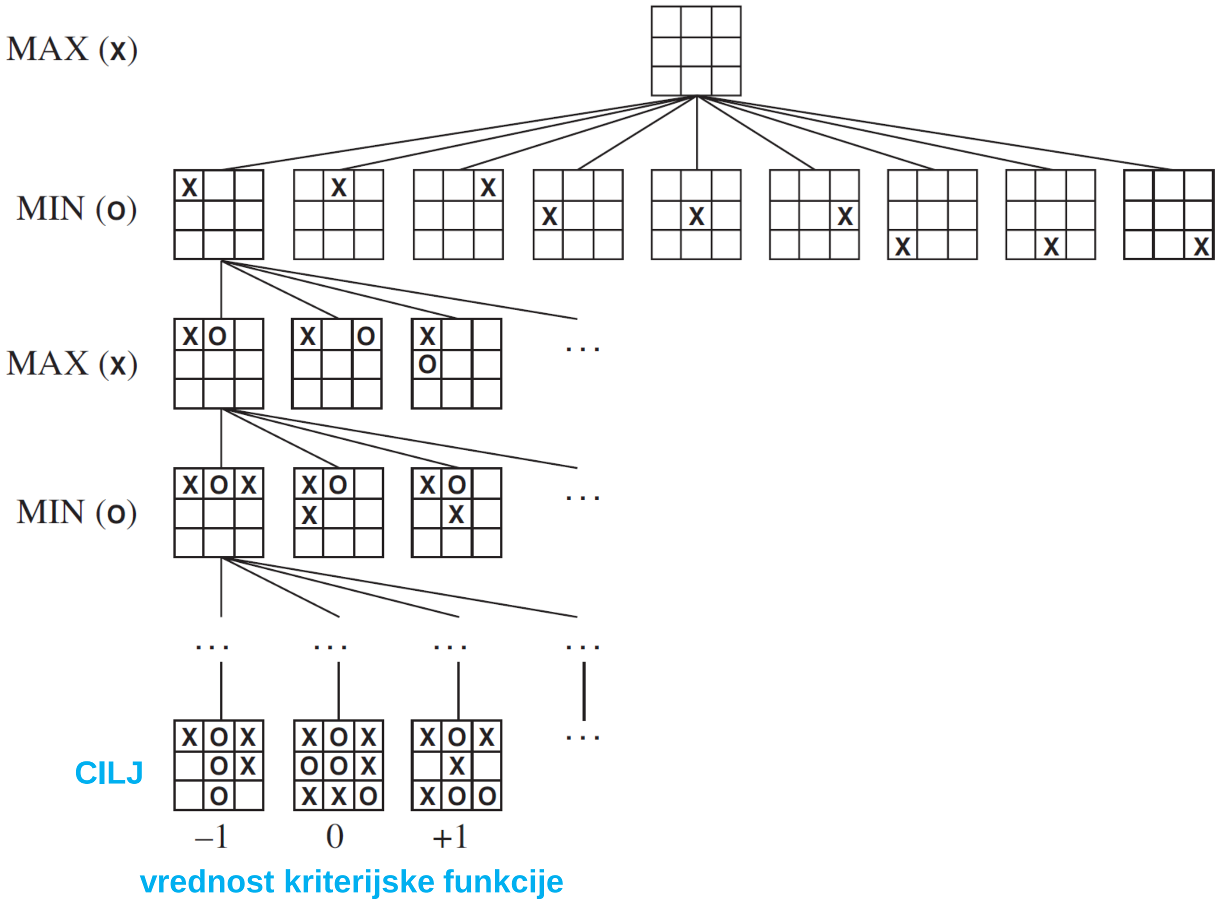
Igranje iger

- preiskovanje prostora med **dvema nasprotnikoma** (angl. *adversarial search*)
- **več-agentno** tekmovalno okolje, kjer mora vsak agent upoštevati vpliv akcij drugega agenta na svojo uspešnost
- večina iger: deterministične, izmenične poteze, dva igralca, transparentne (s popolno informacijo)
  - primeri iger s **popolno informacijo**: šah, dama, go
  - primeri iger z **nepopolno informacijo**: potapljanje ladjic, poker, scrabble
- rešitev igre je **strategija**, ki za vsako možno potezo nasprotnika predvidi akcijo
- izziv:
  - iskanje rešitev je lahko kompleksno, velik prostor stanj
  - primer: šah ima faktor vejanja okoli 35, igra vsebuje okoli 50 potez vsakega igralca → to pomeni 35^{100} $(= 10^{54})$ stanj



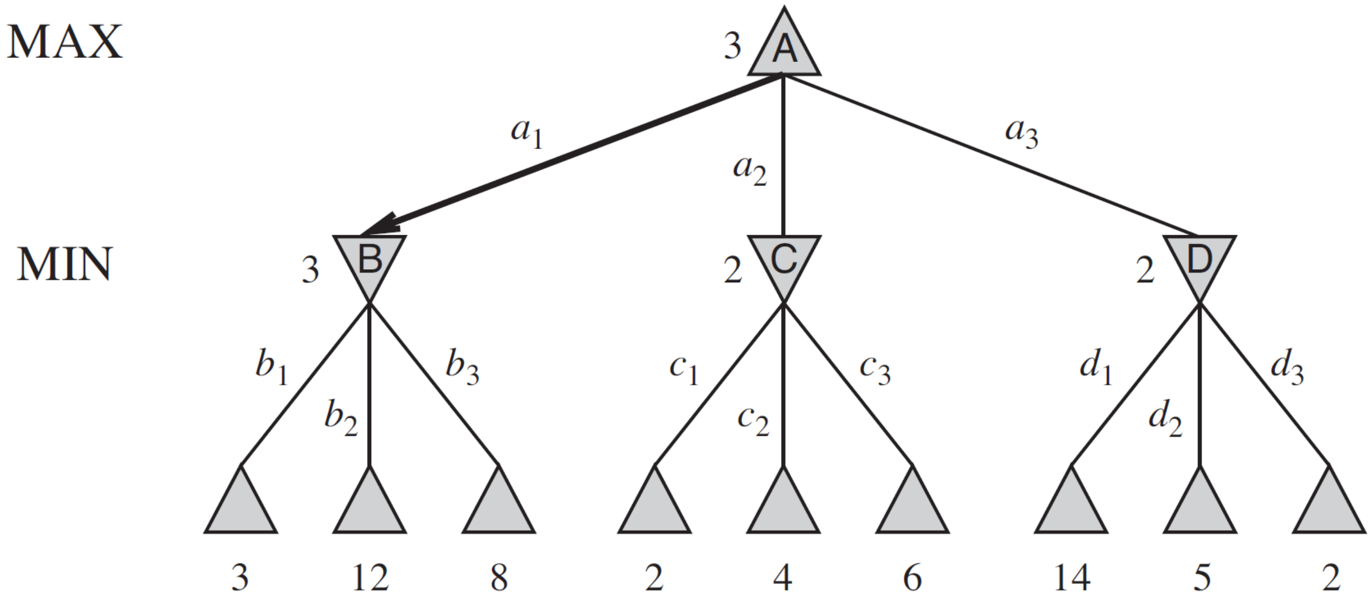
Igranje iger

- potek igre predstavimo z **igralnim drevesom**, v katerem si poteze izmenjujeta igralca **MAX** in **MIN**
- ciljna stanja vrednotimo s **kriterijsko funkcijo** (pozitivne vrednosti so ugodne za MAX, negativne za MIN)
- dve možnosti:
  - igra s **konstantno vsoto kriterijske funkcije** (angl. zero-sum game, pozor na izraz): npr. pri šahu 1+0, 0+1, ½+½ (kompetitivna igra)
  - igra s **spremenljivo vsoto kriterijske funkcije** (angl. non-zero-sum game): kompetitivna ali nekompetitivna



Igranje iger

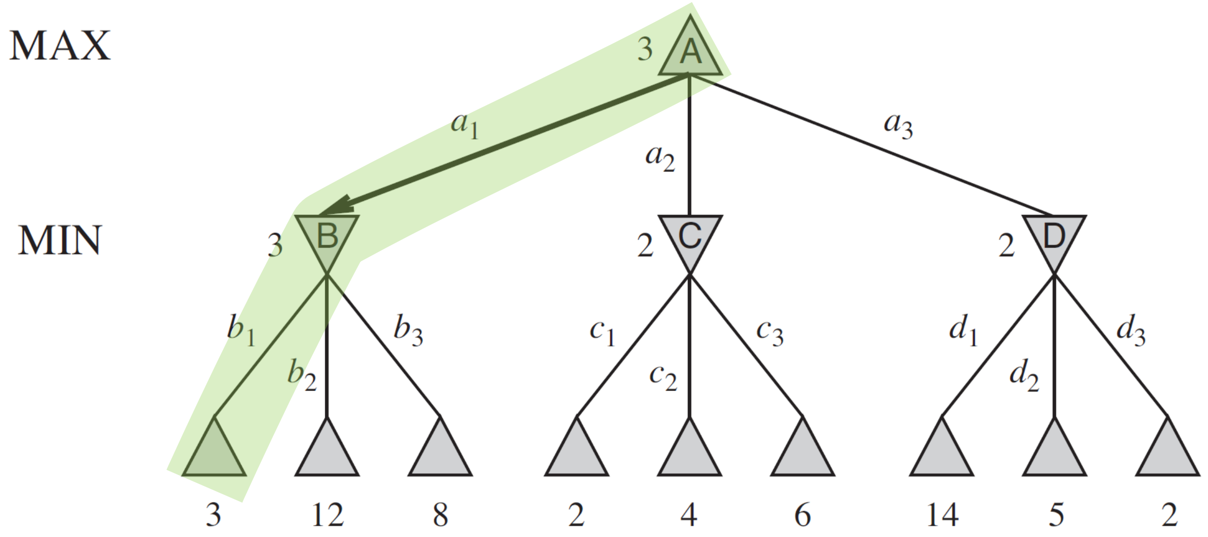
- celotna igralna drevesa so lahko velika (križci in krožci – $9! = 362.880$ ciljnih vozlišč, šah - 10^{40} ciljnih vozlišč)
- iskalno drevo vsebuje podmnožico vseh možnih stanj igralnega drevesa, ki razkriva dovolj informacije za izvedbo poteze
- ne zadošča iskanje končnega vozlišča, ker na pot vpliva nasprotni igralec (MIN)
- podobno predstavitvi z grafi AND/OR
    - OR: izbira poteze s strani igralca MAX
    - AND: predvideti je potrebno vse poteze nasprotnika MIN



Igranje iger

- optimalno strategijo določa ***MINIMAX* vrednost vozlišča**, ki je enaka vrednosti kriterijske funkcije (za MAX), če **oba igralca igrata optimalno**
  - **MAX** preferira **zvišanje** vrednosti kriterijske funkcije (najboljša lastna poteza)
  - **MIN** preferira **znižanje** vrednosti kriterijske funkcije (najboljša protipoteza)
  - predpostavimo, da MIN igra optimalno

$$MINIMAX(v) = \begin{cases} kriterijska\_funkcija(v) & \text{če je } v \text{ končno stanje} \\ \max_{a \in akcija(v)} MINIMAX(rezultat(v,a)) & \text{če je igralec } MAX \\ \min_{a \in akcija(v)} MINIMAX(rezultat(v,a)) & \text{če je igralec } MIN \end{cases}$$

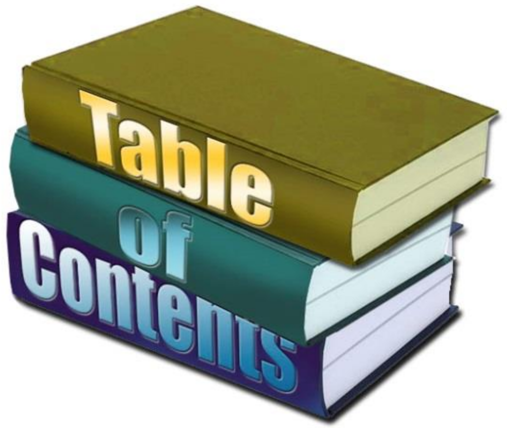


Algoritem *MINIMAX*

- **popolnost algoritma:**
  - da, če je prostor stanj končen (ta je definiran s pravili igre)
- **optimalnost algoritma**: da, če nasprotnik igra optimalno strategijo
  - kaj, če ne?
- **časovna zahtevnost**: $O(b^m)$
- **prostorska zahtevnost**: $O(bm)$ ali $O(m)$
  - od česa je zgornje odvisno?

- ali je potrebno preiskati celoten prostor stanj?
  - rezanje drevesa (alfa-beta rezanje)

Pregled



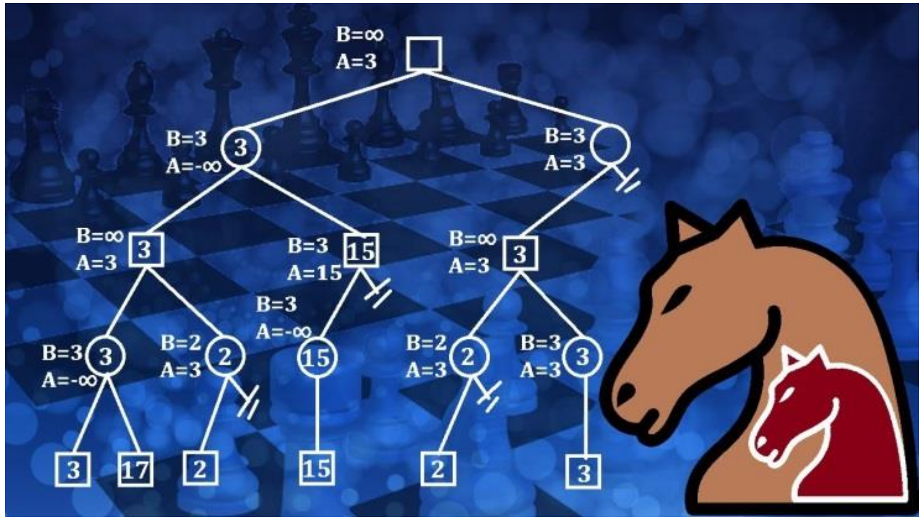
- igranje iger
  - predstavitev problema
  - algoritem MINIMAX
  - rezanje alfa-beta

- planiranje in razporejanje opravil
  - predstavitev problema
  - planiranje s "klasičnim" preiskovanjem prostora stanj
  - planiranje s sredstvi in cilji
  - planiranje z regresiranjem ciljev
  - razporejanje opravil

Rezanje alfa-beta

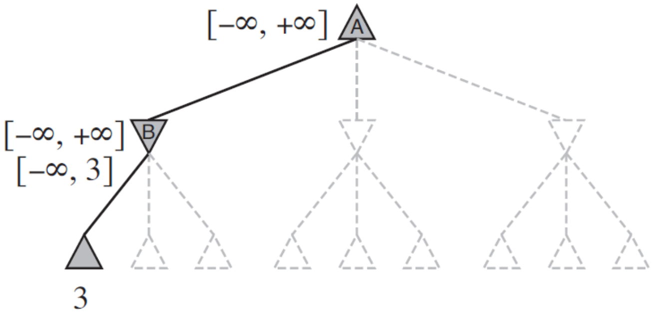
- algoritem **alfa-beta** vrne isto zaporedje potez kot bi algoritem **MINIMAX** s to razliko, da ne upošteva vej, ki ne vplivajo na končno odločitev
- za vsako vozlišče **spremljamo vrednosti** $[\alpha, \beta]$:

  α – najboljša do sedaj najdena rešitev za **vozlišča MAX** (najvišji že najdeni maksimum)
  β – najboljša do sedaj najdena rešitev za **vozlišča MIN** (najnižji že najdeni minimum)
- **algoritem**:
  - za začetno vozlišče velja $[\alpha, \beta] = [-\infty, +\infty]$
  - na vsakem koraku v globino prenaša vrednosti $[\alpha, \beta]$
  - ob vračanju posodabljamo vrednosti $[\alpha, \beta]$ glede na najdene vrednosti v poddrevesih
  - če v nekem vozlišču velja $\alpha \geq \beta$, lahko prekinemo preiskovanje ostalih poddreves (izvedemo rezanje)

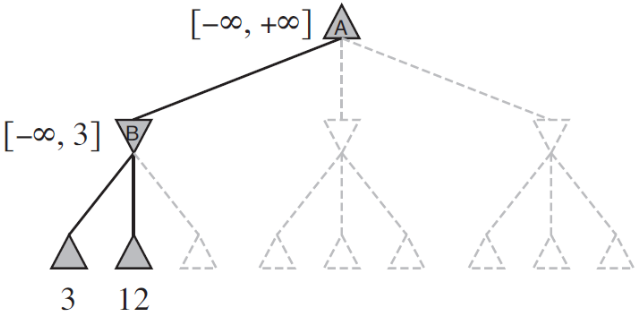


Example

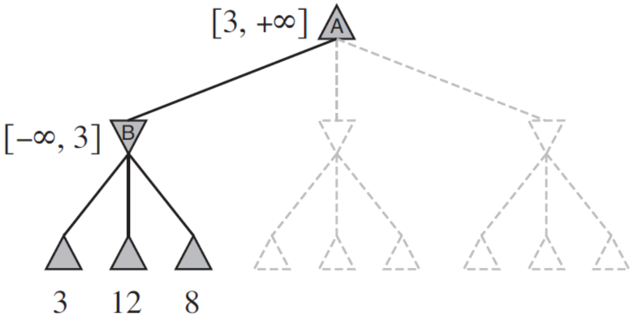
Propagiranje $[\alpha, \beta]$ navzdol. Ob vračanju za vozlišče B velja β=3 (najnižji najdeni minimum).



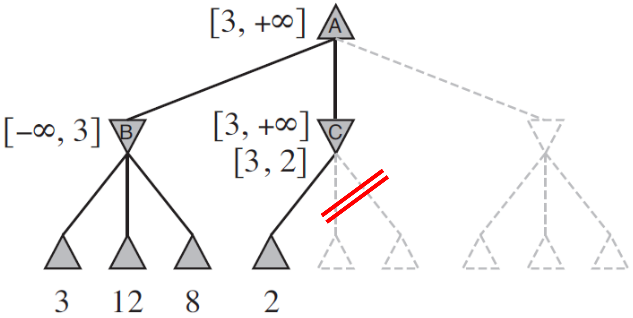
Naslednji naslednik B (vrednost 12) ne spremeni vrednosti najdenega minimuma za B. Ostane β=3.



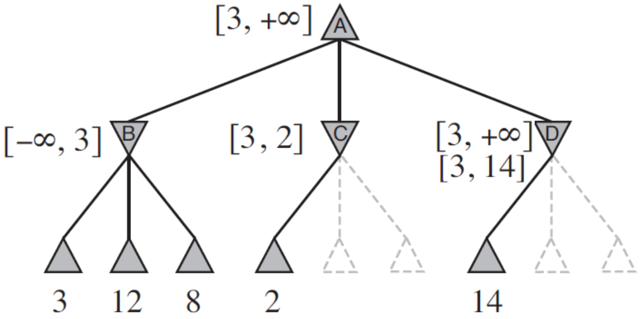
Tudi tretji naslednik B (vrednost 8) ohrani β=3. Za vozlišče A to pomeni, da je α=3 (najvišji najdeni maksimum). Preiskujemo naprej (iščemo višji maksimum).



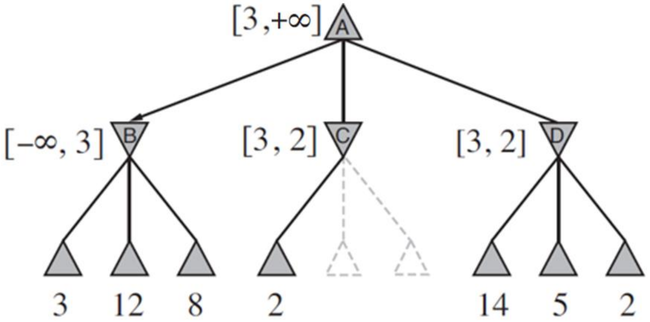
$[3, +\infty]$ se ob preiskovanju propagira k nasledniku C. Ob vračanju za C velja β=2, $[\alpha, \beta] = [3,2]$. Ker $\alpha \geq \beta$, preiskovanje ostalih poddreves ne bi vplivalo na vrednost vozlišča A. Porežemo.



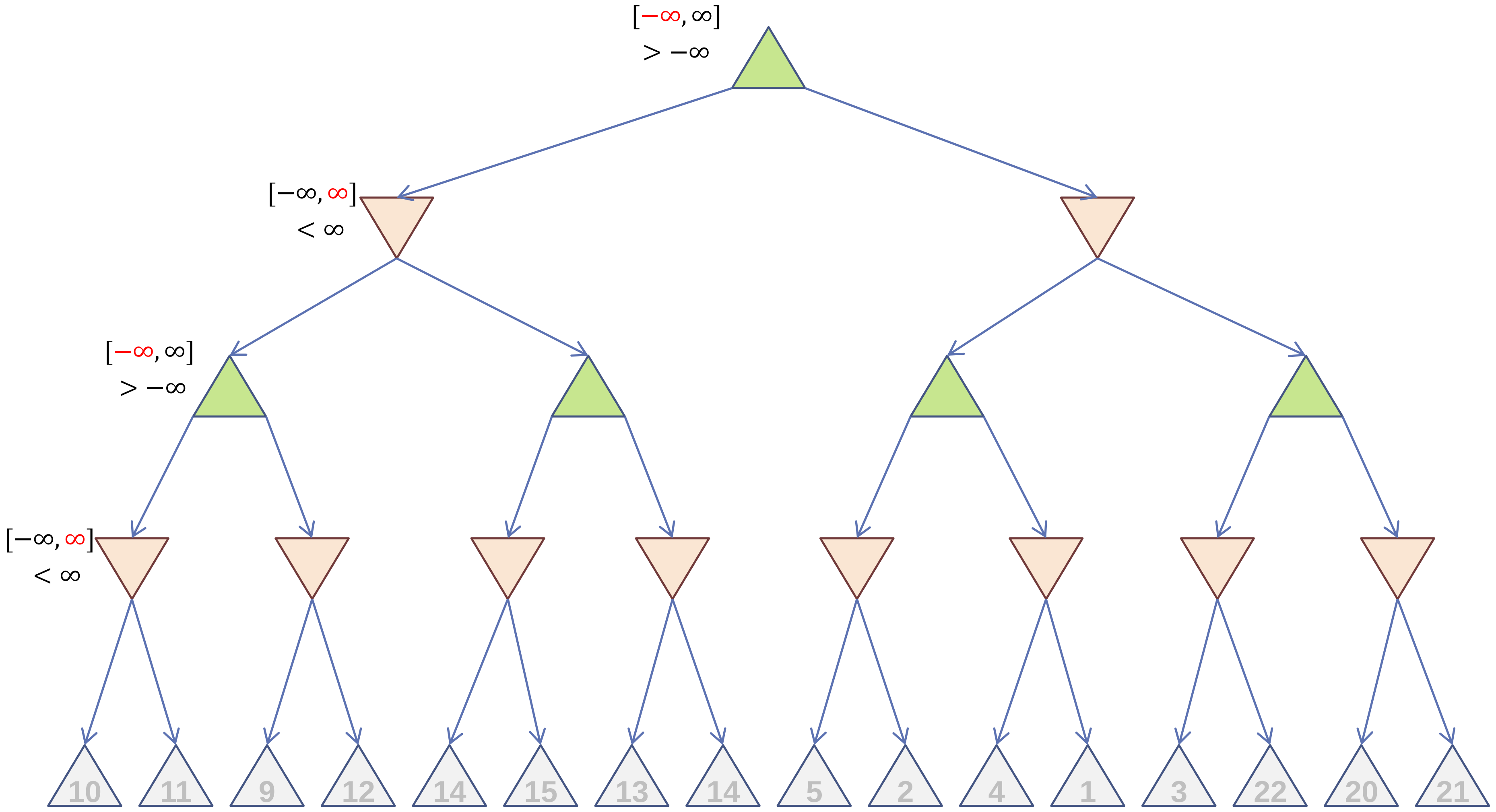
$[3, +\infty]$ se ob preiskovanju propagira k nasledniku D. Ob vračanju za D velja β=14, torej $[3,14]$. Preiskujemo naprej.



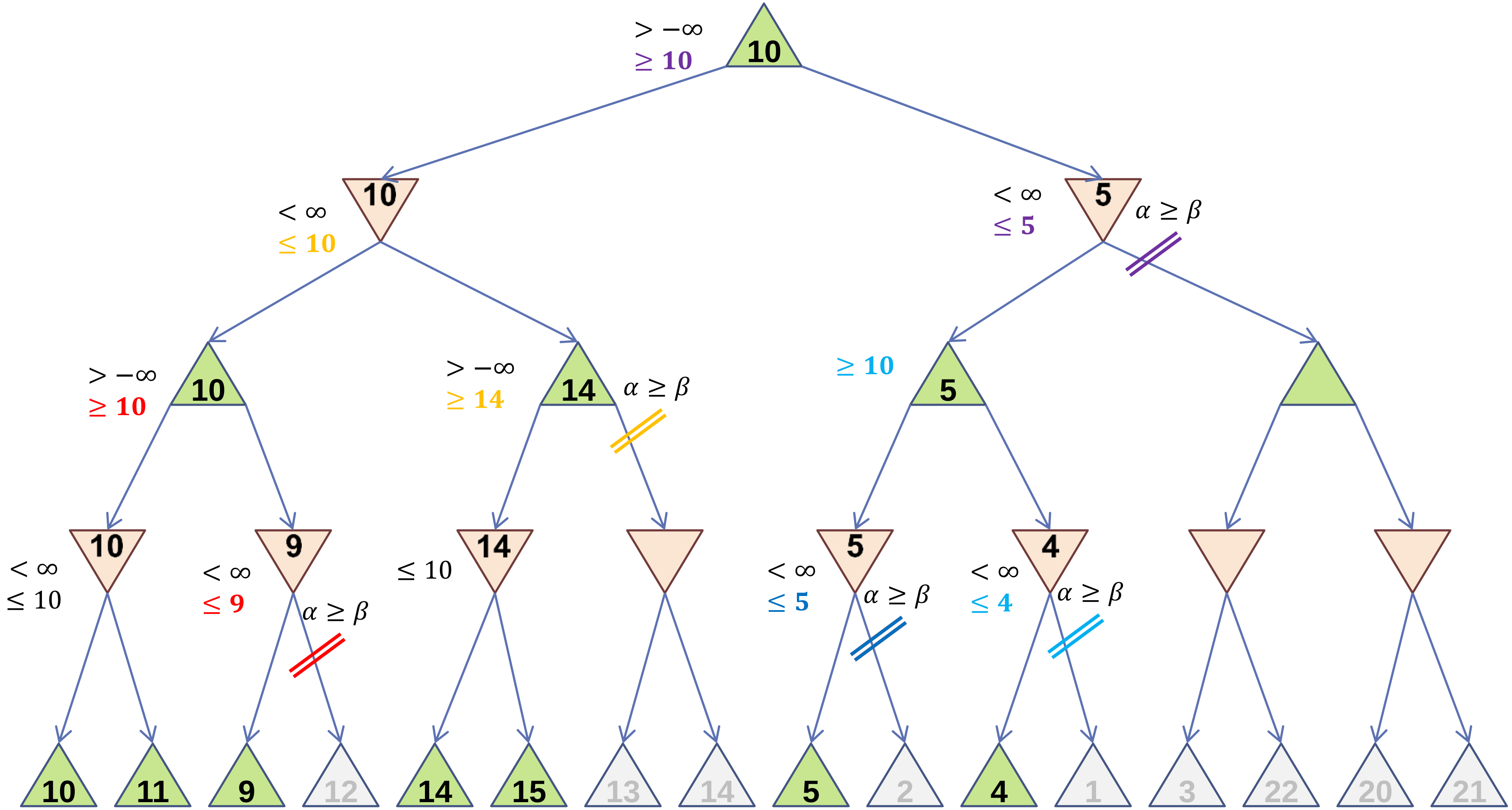
Preiskovanje ostalih poddreves D spremeni $[\alpha, \beta]$ v vozlišču D. Vrnemo se navzgor. Konec iskanja.



Drugi primer



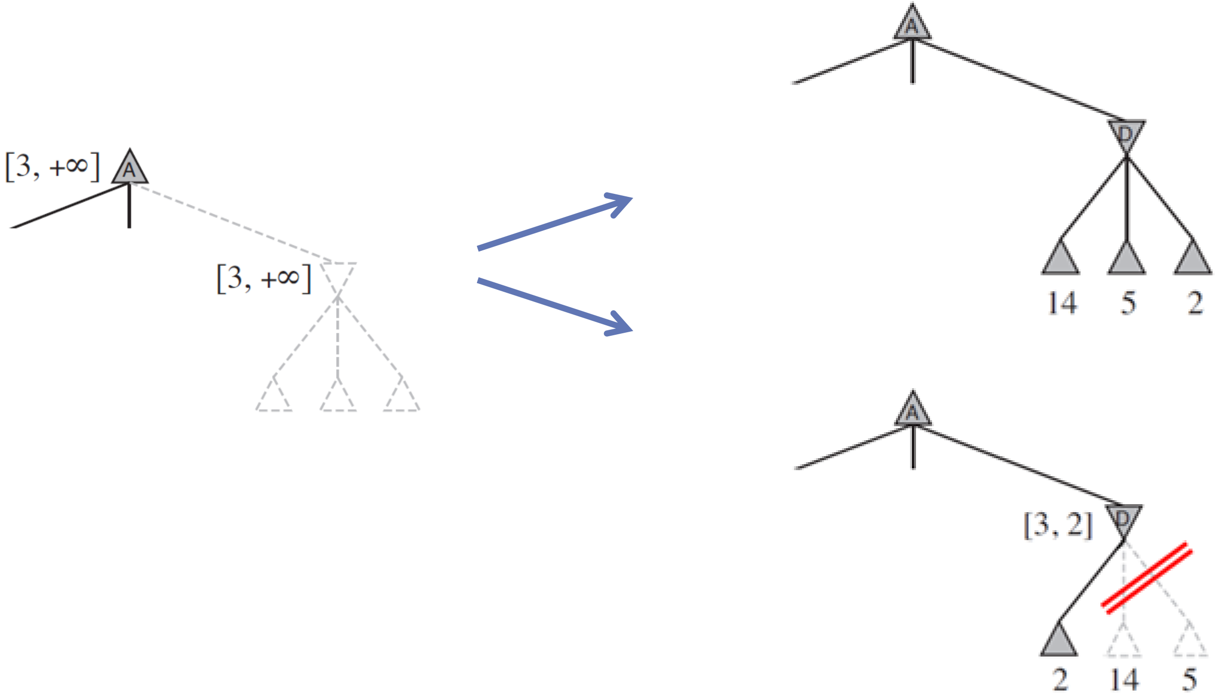
Drugi primer



Vir: CSCI 6350 Artificial Intelligence: Minimax and Alpha-Beta Pruning Algorithms

Lastnosti rezanja alfa-beta

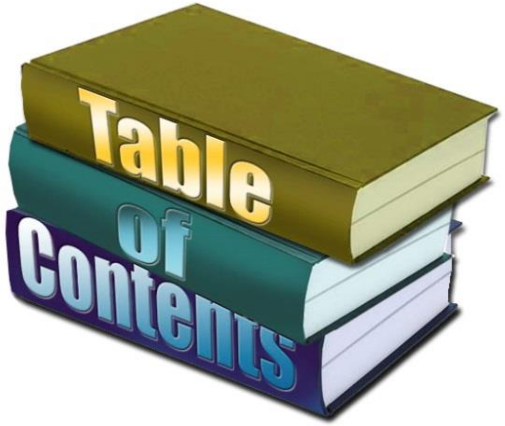
- potek algoritma je odvisen od vrstnega reda naslednikov



- rezanje alfa-beta zniža časovno zahtevnost algoritma MINIMAX z zahtevnosti z $O(b^m)$ na $O\left(b^{m/2}\right)$
  - šah: faktor vejanja se zniža s 35 na 6
  - v splošnem: možna globina preiskovanja se podvoji
  - uporaba strategij za določanje vrstnega reda preiskovanja naslednikov (uporabi se lahko znanje iz preteklih iger)

III. PLANIRANJE in RAZPOREJANJE OPRAVIL

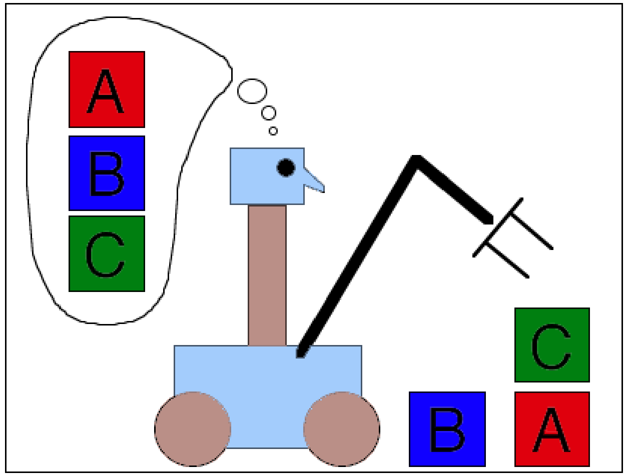
Pregled



- igranje iger
  - predstavitev problema
  - algoritem MINIMAX
  - rezanje alfa-beta

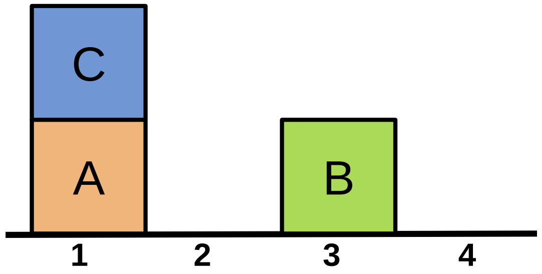
- planiranje in razporejanje opravil
  - predstavitev problema
  - planiranje s "klasičnim" preiskovanjem prostora stanj
  - planiranje s sredstvi in cilji
  - planiranje z regresiranjem ciljev
  - razporejanje opravil

Planiranje



- postopek načrtovanja akcij, ki dosežejo želene cilje
- **plan**: zaporedje akcij, ki pripelje od začetnega do končnega stanja
- praktična uporaba:
  - logistični problemi, planiranje operacij
  - robotika
  - razporejanje opravil, urniki
- Za **formalni opis problema** planiranja potrebujemo:
  - definicijo **začetnega stanja** in ciljnih stanj
  - definicijo **akcij** (angl. *actions*) z njihovimi predpogoji (angl. *conditions*) in učinki (angl. *effects*)
  - definicijo **omejitev** (angl. *constraints*)
  - predpostavko zaprtega sveta:
    - za vsa dejstva, ki niso omenjena, predpostavimo, da niso resnična
    - akcija nima učinkov, ki niso omenjeni (nadzorovani)
- za formalizacijo problema planiranja uporabljamo predstavitev s formalnim jezikom:
  - STRIPS: Stanford Research Institute Problem Solver (1971)
  - ADL: Action Description Language (1986)
  - PDDL: Planning Domain Definition Language (1998-2005)

STRIPS / PDDL



Uporaba formalnega jezika pri planiranju.

stanje: `[on(c,a), on(a,1), on(b,3), clear(c), clear(2), clear(b), clear(4)]`
cilj: `[on(a,b), on(b,c)]`

atomi
(literali, končni objekti)

akcija (akcijska shema):

`move(Block, From, To)`

predpogoji: `[clear(Block), on(Block,From), clear(To)]`
učinki
add: `[on(Block,To), clear(From)]`
del: `[on(Block,From), clear(To)]`
omejitve: `[block(Block), To≠From, To≠Block, From≠Block]`

spremenljivke
(z veliko začetnico),
so eksistenčno
kvantificirane (∃)

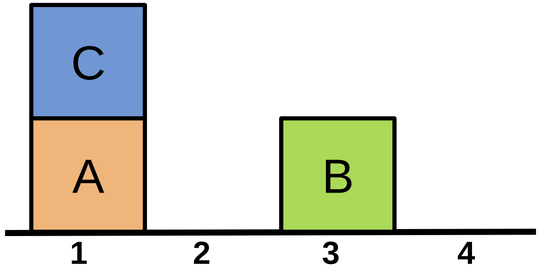
učinki akcij in stanja
so konjunkcije trditev

Rezultat izvedbe akcije a v stanju s je stanje $s1$:

$$s1 = (s - del(a)) \cup add(a)$$

Kako se predpostavka zaprtega sveta odraža na zapisu stanja in akcij?

STRIPS / PDDL



PDDL uporablja sorodno (alternativno) sintakso:

- dovoljuje negacije učinkov
- spremenljivke z malimi črkami, atomi z velikimi (ravno obratno)
- imena akcij z velikimi črkami

STRIPS:

```
move(Block, From, To)
predpogoji:    [clear(Block), on(Block,From), clear(To)]
učinki-add     [on(Block,To), clear(From)]
učinki-del:    [on(Block,From), clear(To)]
omejitve:      [block(Block), To≠From, To≠Block, From≠Block]
```

PDDL:

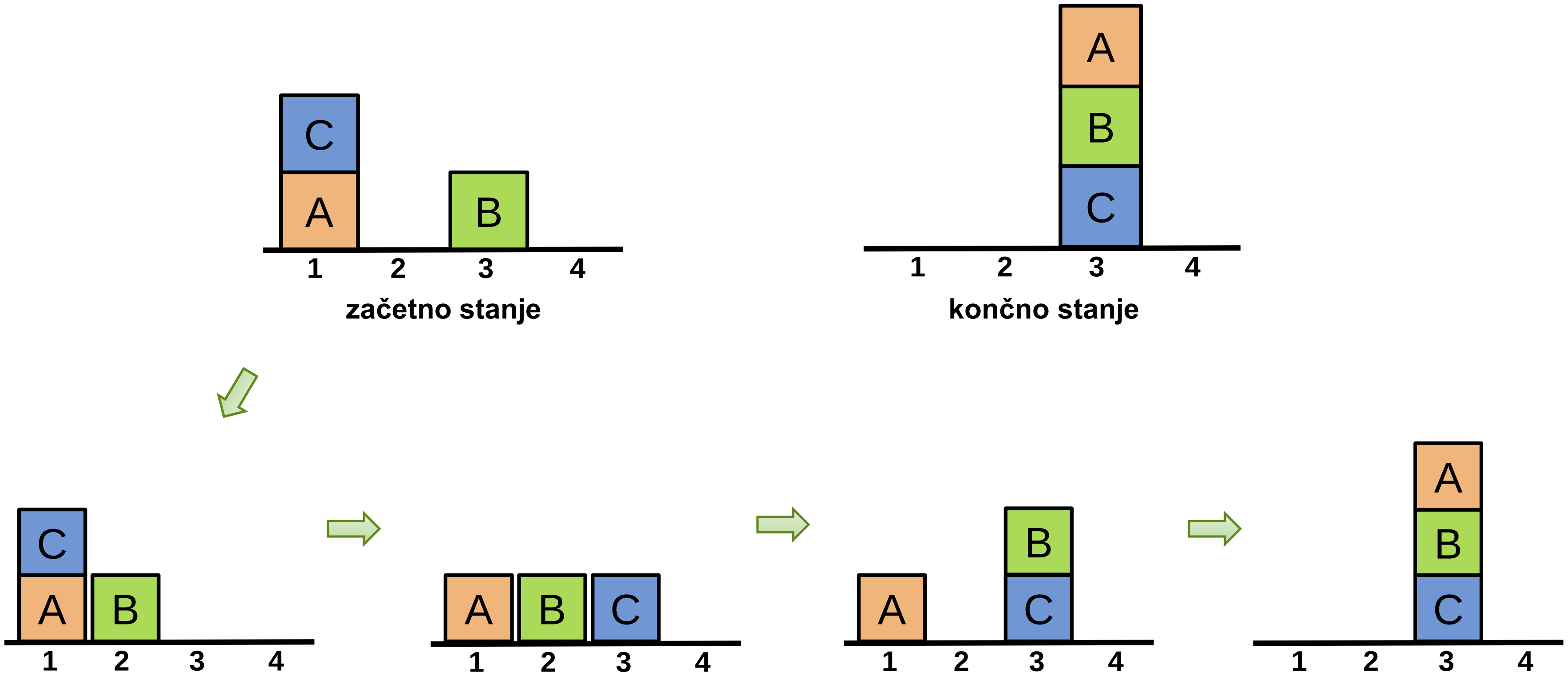
```
Action(Move(block, from, to),
    PRECOND: Clear(block) ∧ On(block, from) ∧ Clear(to)
    EFFECT: On(block,to) ∧ Clear(from) ∧ ¬On(block,from) ∧ ¬clear(to))
```

Primer 1: Svet kock

Plan: zaporedje akcij, ki pripelje od začetnega do končnega stanja

Možna rešitev:

```
plan = [move(b,3,2), move(c,a,3), move(b,2,c), move(a,1,b)]
```



Primer 2: menjava pnevmatike (PDDL)

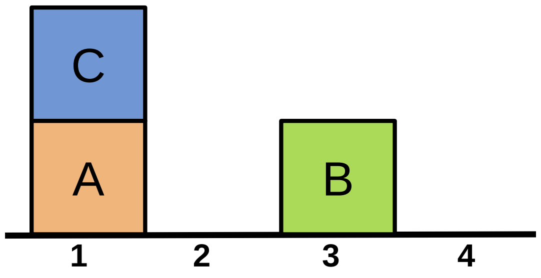
```
Init(Tire(Flat) ∧ Tire(Spare) ∧ At(Flat, Axle) ∧ At(Spare, Trunk))
Goal(At(Spare, Axle))
Action(Remove(obj, loc),
    PRECOND: At(obj, loc)
    EFFECT: ¬At(obj, loc) ∧ At(obj, Ground))
Action(PutOn(t, Axle),
    PRECOND: Tire(t) ∧ At(t, Ground) ∧ ¬At(Flat, Axle) ∧ ¬At(Spare, Axle)
    EFFECT: ¬At(t, Ground) ∧ At(t, Axle))
Action(LeaveOvernight,
    PRECOND:
    EFFECT: ¬At(Spare, Ground) ∧ ¬At(Spare, Axle) ∧ ¬At(Spare,Trunk)
    ∧ ¬At(Flat, Ground) ∧ ¬At(Flat, Axle) ∧ ¬At(Flat, Trunk))
```

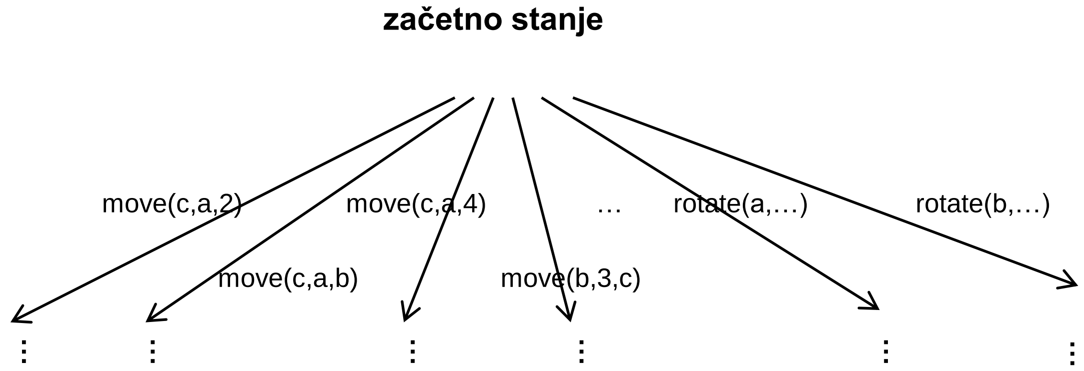
- Možna rešitev?
- Kako se akcije odražajo na **zaporednih spremembah stanja**?

“Klasično” preiskovanje prostora stanj

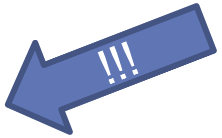
- uporaba neinformiranih, informiranih ali lokalnih **preiskovalnih algoritmov**
- rezultat: **kombinatorična eksplozija** prostora stanj
- iskanje v smeri od začetnega k ciljnemu stanju lahko razvija vozlišča **z uporabo akcij, ki niso relevantne**

- **primeri**:
  - možni premiki kock iz začetnega stanja
  - akcija: `buy(Isbn)`
    začetno stanje: `[]`,
    predpogoji: `[]`,
    učinki: `add [own(Isbn)]`,
    cilj: `[own(1234567890)]`

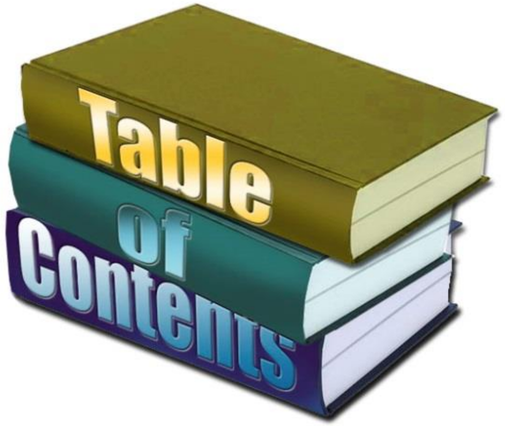




- rešitve:
  - dobra **hevristična ocena**
  - **drugačen pristop** k preiskovanju



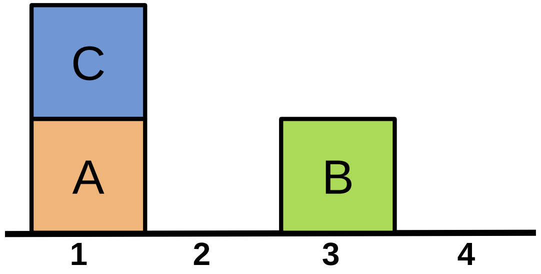
Pregled



- igranje iger
  - predstavitev problema
  - algoritem MINIMAX
  - rezanje alfa-beta

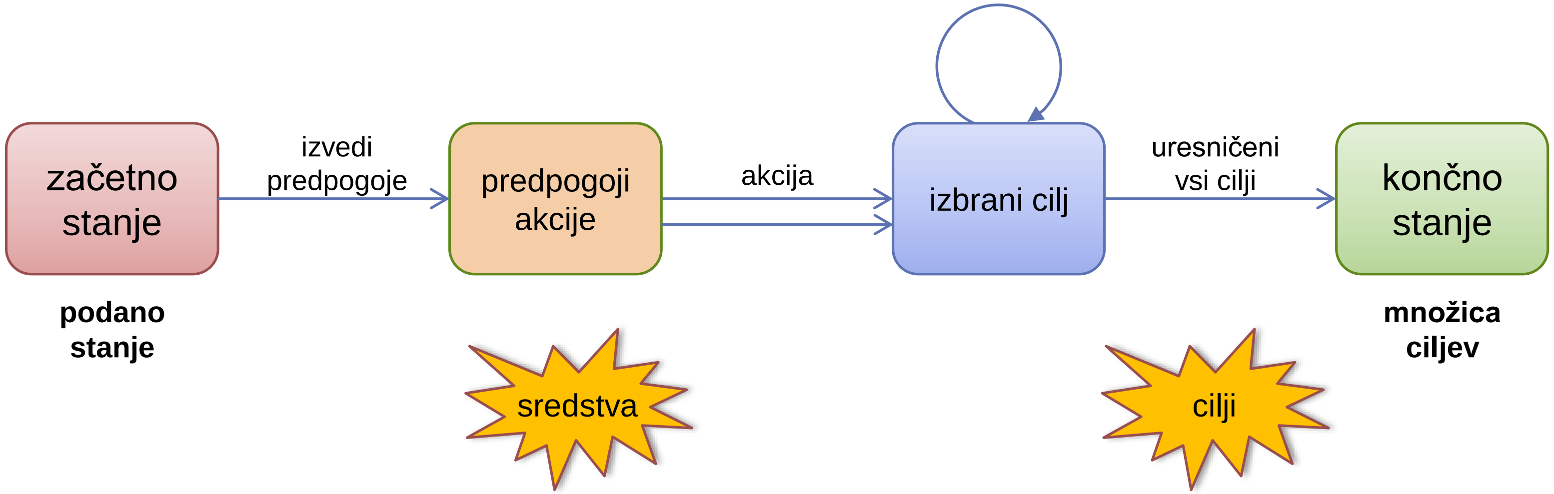
- planiranje in razporejanje opravil
  - predstavitev problema
  - planiranje s "klasičnim" preiskovanjem prostora stanj
  - planiranje s sredstvi in cilji
  - planiranje z regresiranjem ciljev
  - razporejanje opravil

Planiranje s sredstvi in cilji

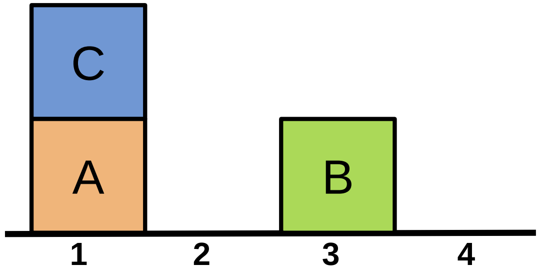


- primer iz sveta kock
  stanje: `[on(c,a), on(a,1), on(b,3), clear(c), clear(2), clear(b), clear(4)]`
  cilj: `[on(a,b),on(b,c)]`

- način reševanja:
  1. izberi **nerešen cilj**
  2. izberi **akcijo**, ki lahko vzpostavi (doseže) ta cilj
  3. ker ima akcija **predpogoje**, omogoči akcijo z **izvedbo predpogojev**
  4. **izvedi akcijo**
  5. vrni se v **korak 1** ali
     končaj, če so **uresničeni vsi cilji**



Planiranje s sredstvi in cilji



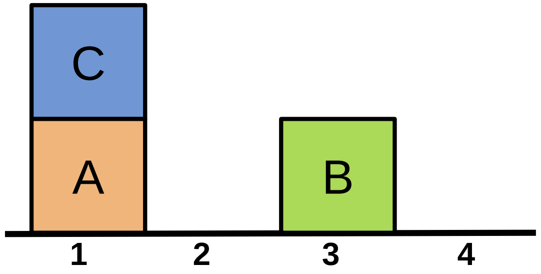
- primer iz sveta kock
  stanje: `[on(c,a), on(a,1), on(b,3), clear(c), clear(2), clear(b), clear(4)]`
  cilj: `[on(a,b),on(b,c)]`

- rešitev plana **pri preiskovanju v globino**:

```
move(c,a,2)   % izpolnjujemo on(a,b), ki potrebuje clear(a)
move(a,1,b)   % izpolnimo cilj on(a,b)
move(a,b,1)   % izpolnjujemo on(b,c), ki potrebuje clear(b), pokvarimo on(a,b)
move(b,3,c)   % izpolnimo cilj on(b,c)
move(a,1,b)   % ponovno izpolnimo cilj on(a,b)
<plan zaključen, vsi cilji izpolnjeni>
```

- pomembne podrobnosti:
  - strategija preiskovanja (v globino, širino, iterativno poglabljanje)
    - ali bi **iterativno poglabljanje** in **iskanje v širino** našla najkrajši plan?
  - princip **varovanja (ščitenja) ciljev** (angl. *goal protection*): pri preiskovanju lahko dodatno varujemo, da ne podremo že doseženih ciljev

Planiranje s sredstvi in cilji



- primer iz sveta kock
  stanje: `[on(c,a), on(a,1), on(b,3), clear(c), clear(2), clear(b), clear(4)]`
  cilj: `[on(a,b),on(b,c)]`

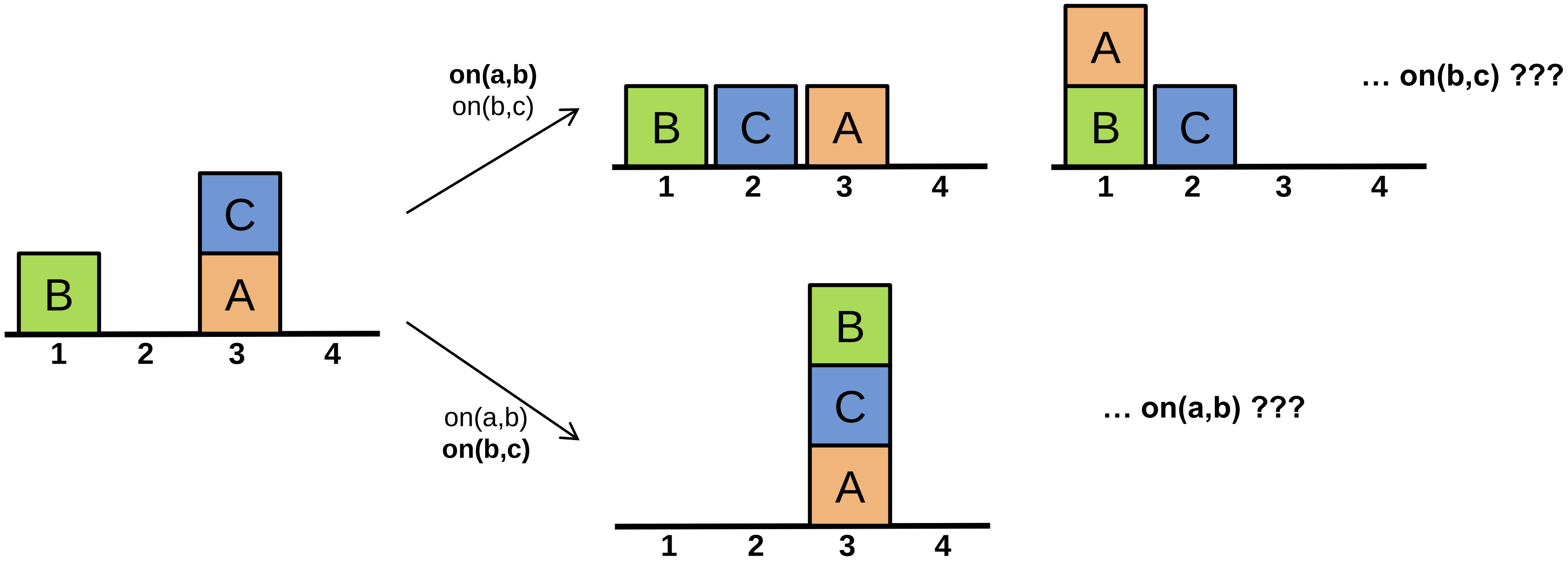
- pri iskanju v širino / iterativnem poglabljanju dobimo naslednjo rešitev:

```
move(c,a,2)   % doseže clear(a) za move(b,3,a)
move(b,3,a)   % doseže on(b,a) za move(b,a,c)             idealno bi bilo move(b,3,c) ?
move(b,a,c)   % doseže clear(a) za move(a,1,b) / doseže on(b,c)
move(a,1,b)   % doseže on(a,b), vsi cilji izpolnjeni
```

- najkrajši plan ni (vsebinsko) optimalen?
- zakaj?

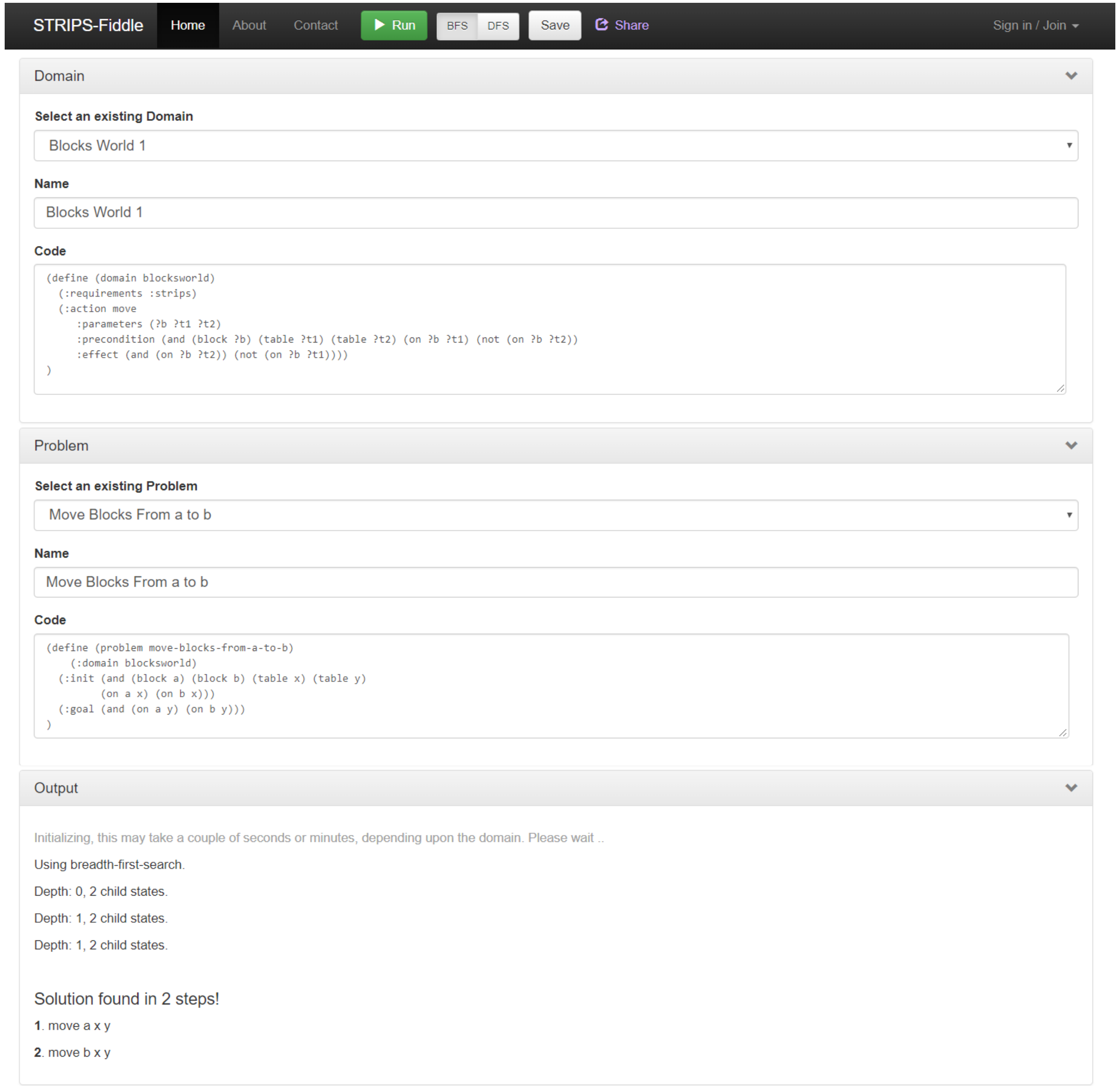
Sussmanova anomalija

- Sussman anomaly (Gerald Sussman, 1975)
- je problem interakcije med cilji
  - algoritem za planiranje (STRIPS) obravnava cilje "lokalno" (enega po enega, ne ozirajoč se na drugega med reševanjem prvega)
  - z doseganjem enega cilja algoritem razveljavi že dosežene cilje ali predpogoje za njihovo doseganje
  - planiranje poteka linearno (najprej prvi cilj, šele nato naslednji, …)
  - vrstni red obravnavanja ciljev vpliva tudi na nepotrebne korake pri planiranju
- rešitve
  - drugačen algoritem za planiranje (regresiranje ciljev)
  - ne vztrajaj na urejenosti ciljev, če to ni nujno potrebno (nelinearno planiranje)



Demo

- https://stripsfiddle.herokuapp.com/
- Frenk Dragar, študent 2020/21:
  PDDL za menjavo avtomobilske gume




Planiranje (nad.),
razporejanje opravil