

# Kompeptívna ko-evolúcia

- ⌘ Súčasná evolúcia dvoch alebo viacerých populácií s previazanou fitness funkciou. Napr. *dravec x korisť*, *hostiteľ x parazit*
- ⌘ súťaženie populácií môže postupne viesť k stále zložitejším správaniam – „preteky v zbrojení“, napr. korisť-dravec
- ⌘ inkrementálne učenie – postupná zmena fitness a prostredia – veľmi úspešné, ale vyžaduje dobré plánovanie od experimentátora
- ⌘ korisť-dravec: na začiatku môžu mať obidve populácie jednoduché stratégie, ktoré si postupne v súťaži zdokonaľujú
- ⌘ k zlepšovaniu dochádza aj keď sa nemení ani prostredie ani selekčné kritériá
- ⌘ v priebehu života sa jedinec stretne s určitým počtom súperov z tej istej alebo dvoch generácií; takíto súperia sa postupne zdokonaľujú, takže vyvinuté stratégie sa zdokonaľujú

# Kompetitívna ko-evolúcia

- ⌘ porovnanie s evolúciou dravcov proti nemennej koristi
  - ☒ menej obecná stratégia, ak sa korisť zmení, tak nemusí fungovať
  - ☒ ak sa začína vývoj proti dokonalej koristi, tak nevyvinutí dravci nič nechytia a nefunguje selekcia

⌘ ko-evolúcia môže pomôcť vyhnúť sa lokálnym minimám

⌘ historicky prvý model – 1925-26 Lotka, Voltera

⌘  $N_1$  hustota populácie koristi

⌘  $N_2$  hustota populácie dravcov

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = N_1(r_1 - b_1 N_2), \quad \frac{\partial N_2}{\partial t} = N_2(-r_2 + b_2 N_1),$$

⌘  $r_1$  prírastok koristi bez dravcov,  $r_2$  úbytok dravcov bez koristi,  $b_1$  úbytok koristi požieraním dravcami,  $b_2$  schopnosť dravcov uloviť korisť

# Problémy

⌘ Rovnice nepostihovali vývoj druhov

⌘ ko-evolúcia nemusí viesť z zdokonaľovaníu jedincov – vývoj s cyklicky sa opakujúcimi stratégiami

– úplne sa eliminujú

výhody súťaže

$$A_1 > B_1$$

$$A_1 < B_2$$

$$A_2 > B_2$$

$$A_2 < B_1$$

$$A_1 \quad B_1$$

$$A_1 \quad B_2$$

$$A_2 \quad B_2$$

$$A_2 \quad B_1$$

$$\hline A_1 \quad B_1$$

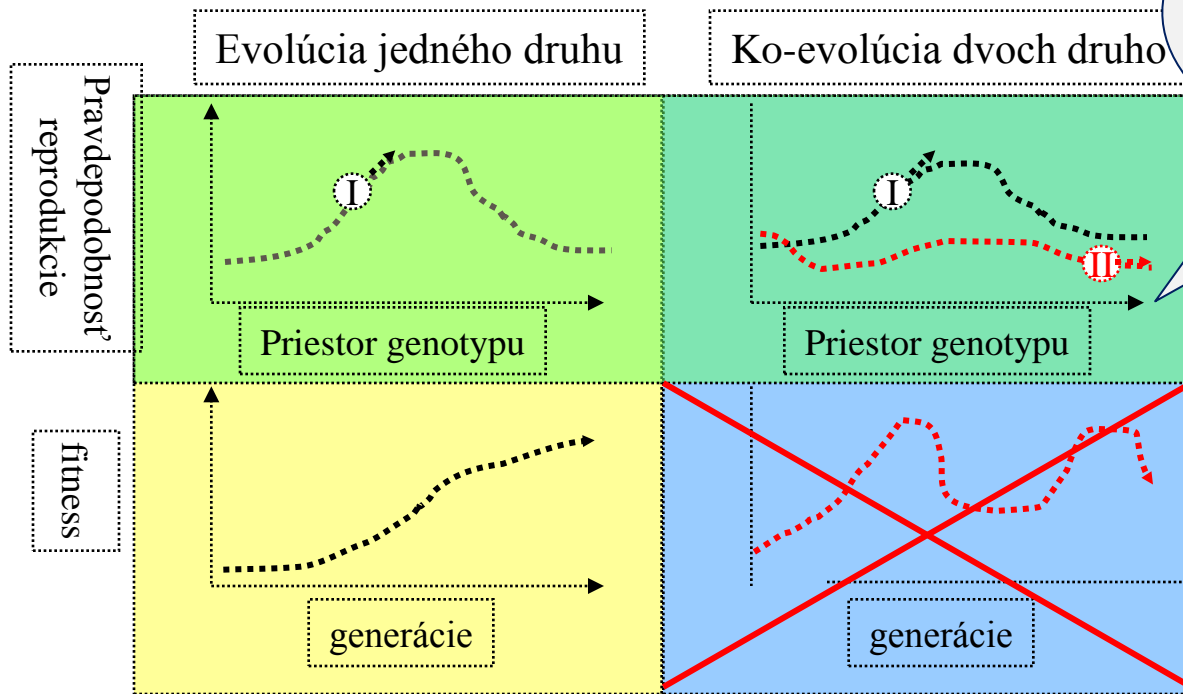
$$A_1 \quad B_2$$

⋮

⌘ zmena v jednom druhu zmení fitness druhého druhu „efekt červenej kráľovnej“ (Alenka v ríši divov) – pokrok sa nedá sledovať monitorovaním priemernej alebo najlepšej fitness

# Problémy ko-evolúcie

⌘ Ako sledovať vývoj?



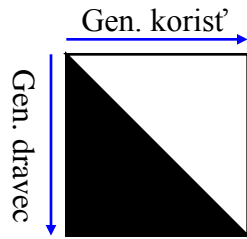
Pri zmene jedinca jedného druhu dochádza k zmene fitness landscape pre druhý druh!

pri ko-evolúcii nestačí sledovať fitness, pretože tá závisí na meniacej sa stratégii súťažiaceho druhu

# Problémy ko-evolúcie

## ⌘ **Monitorovanie** ko-evolučného pokroku:

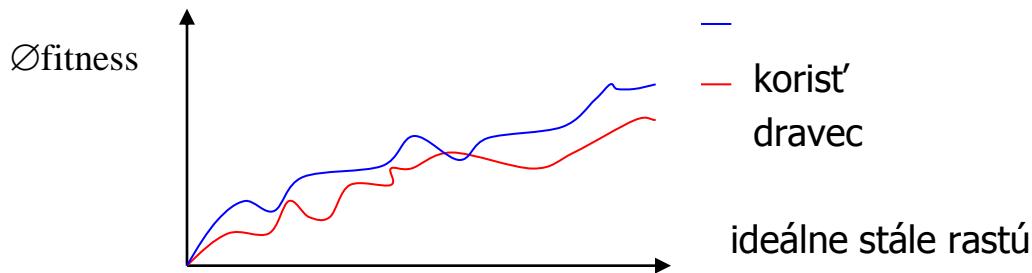
- ☒ CIAO (Current Individual vs. Ancestral Opponents) – najlepší z generácie proti najlepším súperom z prechádzajúcich generácií – jeden zápas = 1 pixel



- vyhrala korisť
- vyhral dravec

ideálny výsledok

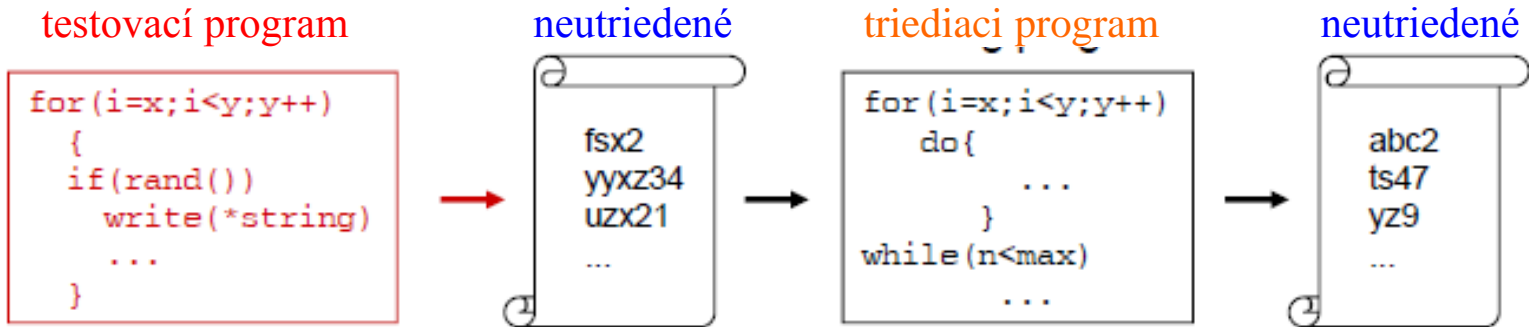
- ☒ majstrovstvá – najlepší z generácie proti najlepším zo všetkých (aj neskorších) generácií (dá sa použiť na výber najlepšieho v prípade optimalizácie) – do grafu sa vynáša priemerná úspešnosť – ide urobiť až po skončení evolúcie



ideálne stále rastú

# Aplikácie ko-evolúcie

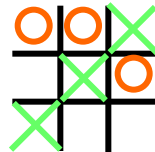
- ⌘ triediace programy – súperom boli parazitné programy, ktoré volili testovacie podmienky pre triediace programy



$$f(\text{triediaci}) = \text{kvalita}$$

$$f(\text{testovací}) = 1 - \text{kvalita}$$

- ⌘ hráč pre Tic-Tac-Toe



# Ciele



1. Rola ko-evolúcie v robotike
  2. Dajú sa dobré riadiace systémy vyvíjať s jednoduchými fitness funkciami – kedy ko-evolúcia vedie k „pretekom v zbrojení“?
  3. Aká je dosiahnutá emergentná dynamika systémov?
  4. Sú riešenia vyvinuté ko-evolúciou lepšie než riešenia vyvinuté štandardnou evolúciou?
  5. Dá sa sledovať postupné zlepšovanie stratégií?
- ⌘ ukážeme experimenty, kde dostaneme rôznorodé stratégie, ale po krátkom čase sa vývoj dostane do cyklu
  - ⌘ opakovanie sa dá obmedziť – „sieň slávy“: uchováваме všetky v minulosti objavené stratégie a používame ich na testovanie každého jedinca
    - biologicky neadekvátne
    - nemusí viesť k lepšiemu výkonu (jednoduchá ko-evolúcia môže byť lepšia)
  - ⌘ ukážeme, že ko-evolúcia dokáže riešiť problémy, na ktoré jednoduchá evolúcia nestačí

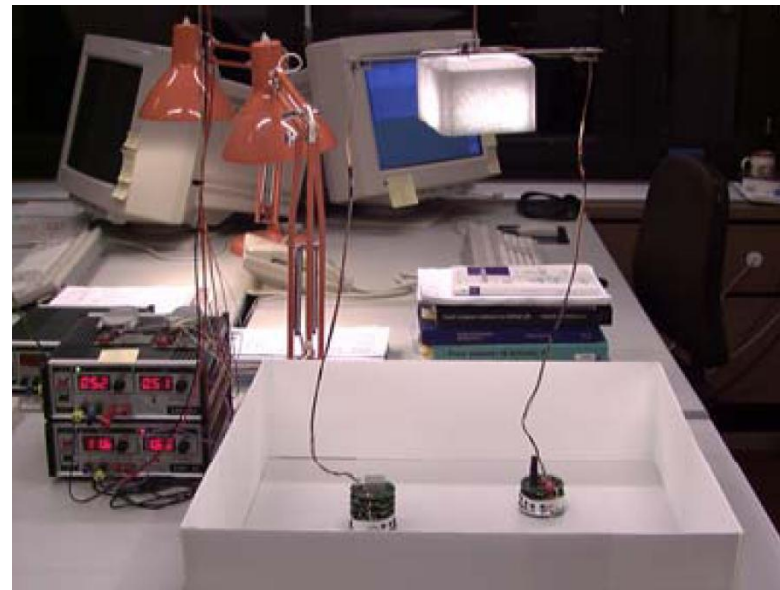
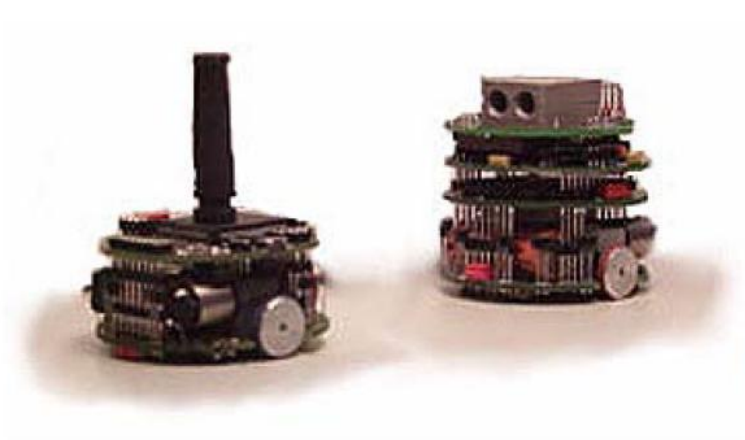
# Ko-evolúcia robotického dravca a koristi

- ⌘ Kombinácia experimentov na reálnych robotoch a simulácie
- ⌘ aréna 47x47 cm s bielymi stenami, dravec:
  - ☒ Khepera s lineárnym videním; 64 pixelov s 256 stupňami šedi, zorný uhol 36°
  - ☒ dravec „vidí“ korisť ako čiernu škvrnu na bielom pozadí (až na vzdialenosť 100cm)
  - ☒ 8 infra senzorov; detekujú stenu na 3 cm, druhého robota na 0,5 cm
- ⌘ korisť:
  - ☒ korisť dvakrát rýchlejšia než dravec
  - ☒ 8 infra senzorov; detekujú stenu na 3 cm, druhého robota na 0,5 cm
- ⌘ oba roboty detekujú dotyk druhého robota (vodivý prúžok okolo robota)
- ⌘ Senzorovo-motorický cyklus 100ms



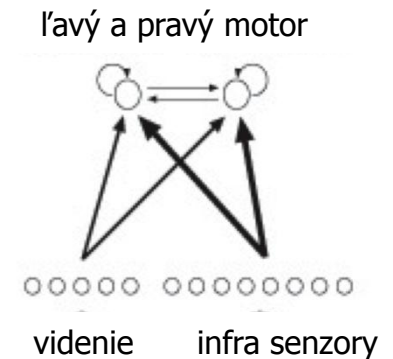
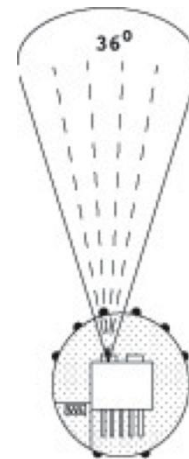
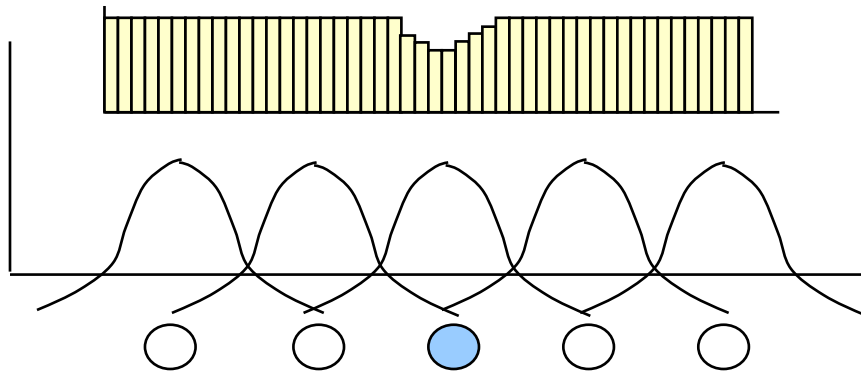
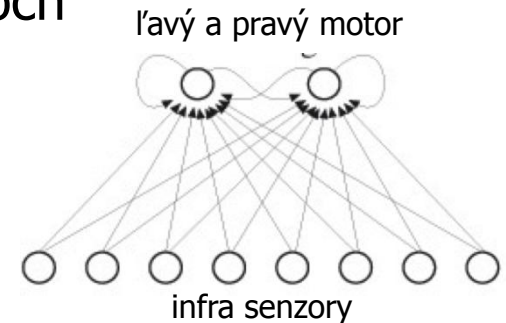
# Dravec - korisť

- ⌘ Riadenie – NS s rekurentnými spojmi na výstupoch
- ⌘ korisť – slepá, ale dvakrát rýchlejšia než dravec
  - ☒ 8 vstupov z infra senzorov
  - ☒ 2 výstupy pre motory
- ⌘ dravec – to isté + 5 neurónov pre videnie



# Dravec - korisť

- ⌘ Riadenie – NS s rekurentnými spojmi na výstupoch
- ⌘ korisť – slepá, ale dvakrát rýchlejšia než dravec
  - ☒ 8 vstupov z infra senzorov
  - ☒ 2 výstupy pre motory
- ⌘ dravec – to isté + 5 neurónov pre videnie



# Dravec - korisť



- ⌘ Dva genetické algoritmy bežia na pracovnej stanici, NS sa nahrajú do robotov
- ⌘ zápas končí buď dotykom dravca a koristi alebo po 500 krokoch (50s) prežitia koristi; doba prežitia koristi je fitness pre korisť i pre dravca
- ⌘ okrem reálnych robotov mali simuláciu založenú na vzorkovaní
  - ☒ rýchle testovanie variant
  - ☒ výpočtovo náročná analýza fitness
- ⌘ parametre simulácie; genetické kódovanie
  - ☒ váhy a prahy 5 bitov (znamienko + 4 bity hodnota)
  - ☒ dravec 5 x (30 váh + 2 prahy) bitov
  - ☒ korisť 5 x (20 váh + 2 prahy) bitov
  - ☒ 2 populácie po 100 jedincoch; 100 generácií

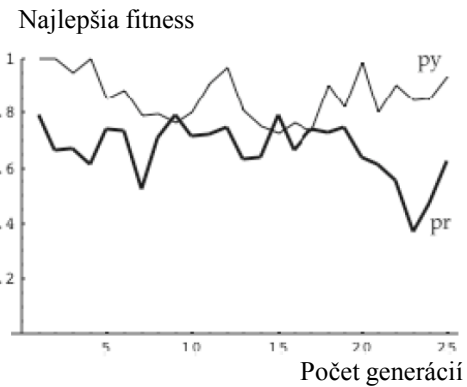
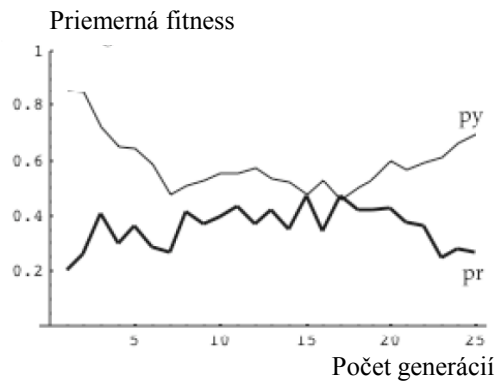
# Dravec - korisť: simulácia

- ⌘ Každý jedinec bol testovaný proti 10 súperom najlepším v predchádzajúcich 10 generáciách
  - ☑ v generácii 0 súperu vyberaní náhodne z tejto generácie
  - ☑ v generáciách 1-9: súperu vyberaní náhodne z najlepších jedincov z predchádzajúcich generácií
- ⌘ počiatočná poloha na vodorovnej čiare v strede, vzdialenosť polovičnej šírky arény s náhodnou orientáciou
- ⌘ fitness  $\frac{TimeToContact}{MaxKrokov}$  korisť  $1 - \frac{TimeToContact}{MaxKrokov}$  dravec
  - ☑ reprodukovať sa mohlo 20 najlepších jedincov z generácie

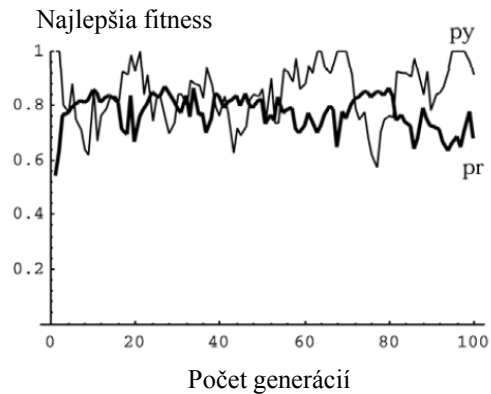
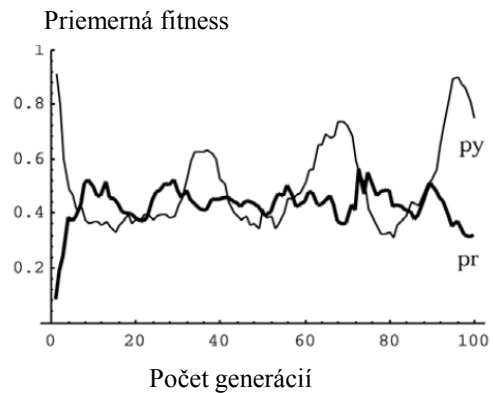
# Sledovanie ko-evolúcie

⌘ Podľa očakávania priemerná i maximálna fitness oscilovala

## Reálne roboty

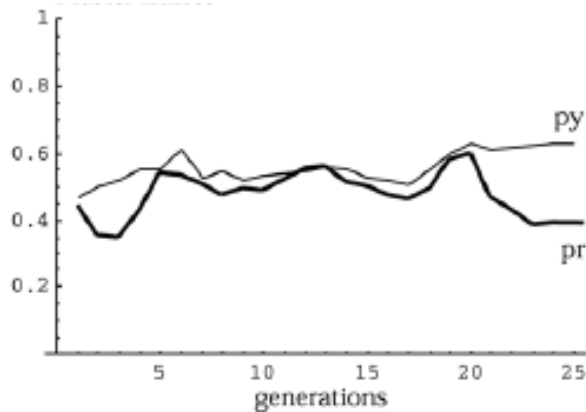


## simulované roboty

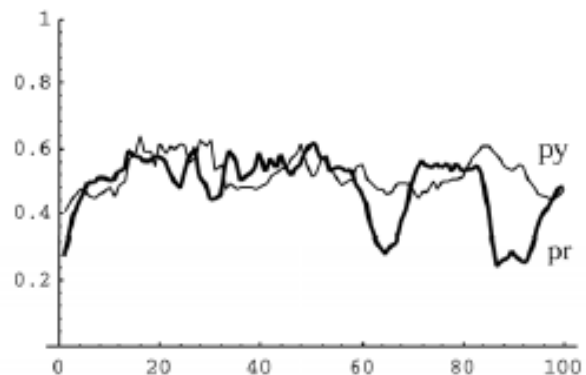


# Vyhodnotenie ko-evolúcie – *po skončení evolúcie*

**Reálne roboty**  
majstrovstvá



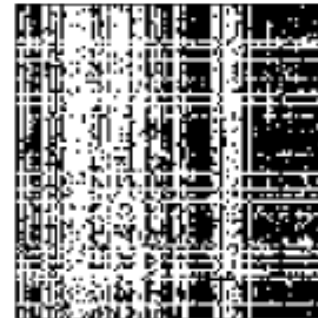
**Simulované roboty**  
majstrovstvá



- ⌘ Majstrovstvá – jedince sa zlepšovali iba v prvých 20 generáciách, po 50 generáciách nastalo zhoršovanie.
- ⌘ Naznačuje to, že došlo k zacykleniu stratégií

Gen. korisť

Gen. dravec



CIAO tiež  
neprehľadné

# Dravec - korisť:

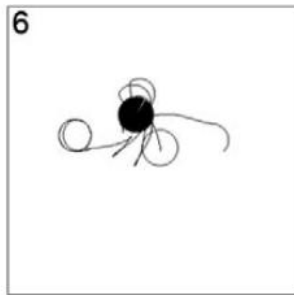
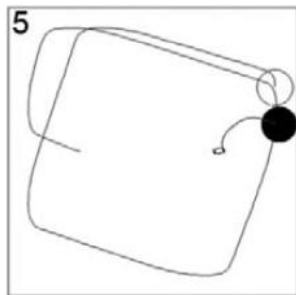
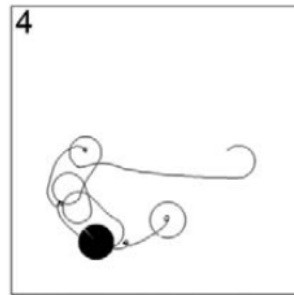
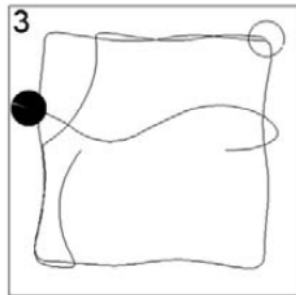
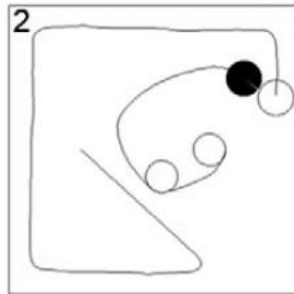
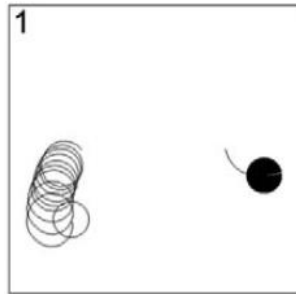
## výsledky simulácie



- ⌘ zo začiatku mala korisť vysoké skóre – dravci nevedeli loviť
- ⌘ neskôr vznikli oscilácie vo fitness; avšak fitness koristi mala vyššie vrcholy (výhoda polohy a rýchlosti koristi)
- ⌘ Pokrok jedného druhu bol nasledovaný pokrokom druhého
- ⌘ majstrovstvá: jedinci z neskorších generácií nemusia byť lepší, než jedinci z predchádzajúcich populácií
- ⌘ na fyzických robotoch to dopadlo podobne
- ⌘ typické zápasy:
  - ☒ korisť krúži okolo arény, dravec útočí iba, keď je korisť blízko
  - ☒ korisť krúži na mieste, keď sa priblíži dravec, tak rýchle utečie – príliš rýchla korisť nedokáže v rýchlosti zareagovať na dravca – zistí ho príliš neskoro)
  - ☒ dravec po neúspešnom útoku ide po oblúku a snaží sa dostať ku koristi z boku (tam nemá infra čidlá)

# Dravec - korisť:

## výsledky simulácie



○ Korisť  
● Dravec

1. Začiatok evolúcie, ani dravec, ani korisť „sa nevedia“ koordinovane pohybovať
2. korisť krúži okolo arény, dravec útočí iba, keď je korisť blízko
3. Dravec stratil schopnosť vyhýbania sa stenám, pretože väčšinou chytil korisť skôr než sa dostal k stene
4. korisť krúži na mieste, keď sa priblíži dravec, tak rýchle utečie; nefungovalo to, keď sa dravec priblížil z boku (málo senzorov)
5. Varianta stratégie koristi 2, ale príliš rýchla korisť nedokáže v rýchlosti zareagovať na dravca – zistí ho príliš neskoro); dravec má „pavúčiu stratégiu“ – k stene a čakať
6. dravec po neúspešnom útoku ide po oblúku a snaží sa dostať ku koristi z boku (tam nemá infra čidlá); korisť sa otáča na mieste a keď príde dravec, tak cúva, aby videla dravca infra senzormi



# Dravec - korisť analýza stratégií

- ⌘ rovnaké stratégie sú opätovne objavované znova a znova, teda efektívne stratégie sa môžu strácať namiesto ich uchovania a zdokonaľovania
- ⌘ Triedy stratégií pre dravcov:
  - ☒  $A_1$  prenasleduj korisť a snaž sa k nej priblížiť
  - ☒  $A_2$  sleduj korisť, ale zostaň viacej-menej tam, kde si, zaútoč iba, ak je korisť v špeciálnej pozícii vzhľadom k dravcovi
- ⌘ Triedy stratégií pre korisť:
  - ☒  $B_1$  stoj na mieste, ale „krytý“ pri stene (dravec obyčajne nechodí blízko steny, aby nenarazil).
  - ☒  $B_2$  rýchle sa pohybuj a vyhýbaj sa dravcovi i stenám

$$A_1 > B_1$$

$$A_1 < B_2$$

$$A_2 > B_2$$

$$A_2 < B_1$$

# Dravec - korist' analýza stratégií



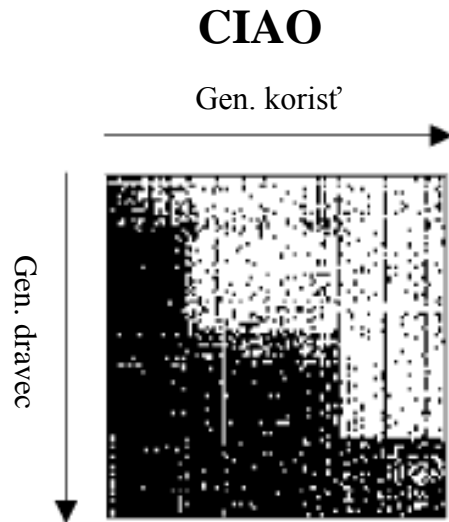
- ⌘ Pozorovanie stratégií nie je jednoduché:
  - ☒ 1. Pozorované stratégie sú triedy podobných stratégií.
  - ☒ 2. Výhoda/nevýhoda konkrétnej stratégie oproti inej sa mení kvantitatívne a je pravdepodobnostná.
  - ☒ 3. Populácie v jednej generácii obecnne používajú viacej stratégií.
  - ☒ 4. Niektoré stratégie sa dajú objaviť jednoduchšie než iné.

# Dravec-korist' a „sieň slávy“

- ⌘ „**Sieň slávy**“ – ako elitizmus, ale cez všetky predchádzajúce generácie – fitness jedinca je priemerná fitness voči všetkým jedincom najlepším vo všetkých predchádzajúcich generáciách
- ⌘ účelom má byť vyvolanie „pretekov v zbrojení“ a zabrániť opakovaniu
  - ☒ biologicky nepodložená metóda
  - ☒ so zvyšujúcim sa počtom generácií bude klesať miera adaptácie – tendencia hľadať efektívnejšie stratégie proti súčasnému súperovi bude potlačená hľadaním stratégií proti minulým súperom
  - ☒ So zvyšujúcim sa počtom generácií rastie časová zložitosť

# Dravec-korist' a „sieň slávy“

- ⌘ Ukázalo sa, že stačí, aby každý jedinec zápasil s 10 súpermi náhodne vybranými z najlepších jedincov z predchádzajúcich (všetkých) generácií.

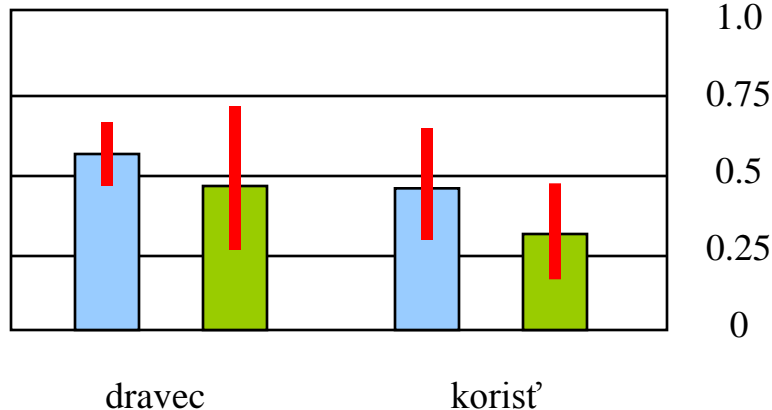


- ⌘ nájdené stratégie boli z rovnakých tried ako u obvyčajnej ko-evolúcie, ale boli stabilnejšie, nemenili sa tak často a mali čas na vylepšovanie

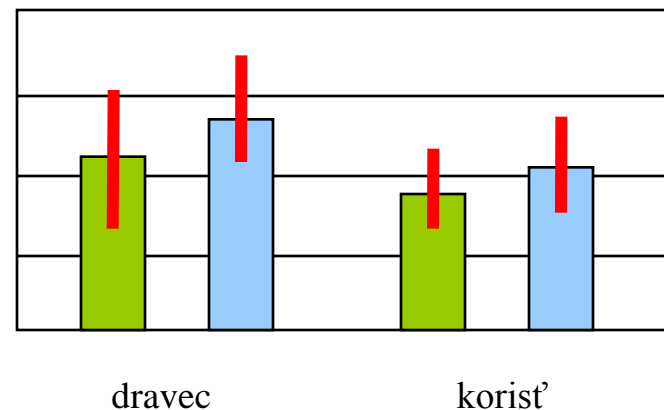
# Dravec-korist' a „sieň slávy“

- Metóda „siene slávy“ by mala viesť na obecnjšie stratégie – potvrdilo sa

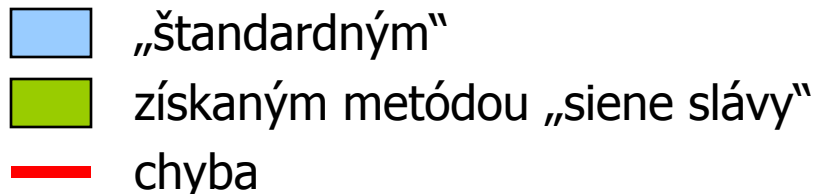
štandardní jedinci



jedinci získaní „sieňou slávy“



- pravdepodobnosti víťazstva druhu nad súperom



# Dravec-korist': zmenená korist'

- ⌘ Senzorový systém koristi je veľmi obmedzený, možno že kvôli nemu nie je možné ďalej zdokonaľovať stratégiu obeť; keď ho zmeníme, tak bude možno korisť schopná postupne zlepšovať svoju stratégiu bez rýchleho prepínania medzi stratégiami
- ⌘ korisť vybavili videním – 150 receptorov dávajúcich 256 stupňov šedi, zorný uhol 240°
  - ☒ 5 neurónov, každý pre 48°
- ⌘ štandardná ko-evolúcia, jedinci sa testovali proti najlepším súperom z 10 predchádzajúcich generácií
- ⌘ po dobu 100 generácií rástol výkon jedincov – teda zmena podmienok umožnila postupné vylepšovanie jedincov bez skorého zacyklenia

# Dravec-korist': zmenená korist'



- ⌘ ďalej porovnali jedince získané štandardnou ko-evolúciou s jedincami získanými metódou „sieň slávy“
- ⌘ pri „sieni slávy“ sa výborne zlepšovali jedinci, ale nakoniec neboli lepší, než jedinci získaní zo štandardnej ko-evolúcie
- ⌘ ⇒ „sieň slávy“ znižuje pravdepodobnosť, že sa budú opakovať stratégie, ale nemusí jednoznačne dávať lepšie výsledky, ak štandardná ko-evolúcia dokáže dostatočne dlho robiť „preteky v zbrojení“, tak môže byť lepšia než „sieň slávy“ (tá navyše pri dlhšom vývoji bude menej a menej efektívna)

# Dravec-korist'



- ⌘ Existuje problém, ktorý dokáže vyriešiť ko-evolúcia, ale nie jednoduchá evolúcia?
  - ☒ Pri ko-evolúcii jedinci dostávajú viacej vonkajších podnetov
  - ☒ ko-evolúcia môže spustiť „preteky v zbrojení“
- ⌘ skúsili vyvíjať (jednoduchou evolúciou) dravcov proti najlepšej koristi získanej z ko-evolúcie a naopak vyvíjať korisť proti najlepšiemu dravcovi
  - ☒ evolúcia bola schopná nájsť efektívne stratégie proti jednej najlepšej stratégii
- ⌘ ďalší experiment – dravec i korisť bez videnia, ale so zapnutými senzorami na okolité svetlo (druhý režim infra senzorov); navyše oba roboty majú svietiacu žiarovku, v aréne (60 x 60 cm) je 13 valcovitých prekážok



# Dravec-korist' bez videnia



- ⌘ 16 senzorov (8 infra + 8 svetlo)
- ⌘ genotyp 8 x 34 bitov
  - ☒ 16 x 2 váh + 2 prahy
- ⌘ ko-evolúcia zlepšovala oba roboty
- ⌘ jednoduchá evolúcia (evolúcia jednej populácie proti jednému (najlepšiemu z ko-evolúcie) súperovi) nefungovala v 8/10 prípadoch dravec nedokázal chytiť korisť
  - ☒ naproti tomu pri ko-evolúcii v 9/10 simulácií dravec chytil aspoň v 25% prípadov
  - ☒ problém asi v tom, že počiatoční dravci majú nulovú úspešnosť
- ⌘ jednoduchá evolúcia fungovala pre korisť - stačila jednoduchá stratégia
  - ☒ ko-evolúcia „vymyslela“ stratégiu počkať až sa dravec priblíži na 10 cm a potom ujst'

# Dravec-korist': rast

- ⌘ Iba v 1 zo 4 experimentov bola jednoduchá evolúcia neúspešná, inak vždy dokázala nájsť jednoduchú a efektívnu stratégiu proti jednotlivcovi
  - ☒ Existujú úlohy, pre ktoré neexistuje úplne obecné riešenie – potom je zacyklenie v stratégiách nevyhnutné a je to optimálne riešenie
    - ☒ ak obecné riešenie neexistuje alebo je málo pravdepodobné, že sa nájde, tak ko-evolúcia povedie na cyklicky menené stratégie také, že:
      - sú vhodné proti aktuálnemu súperovi
      - dajú sa ľahko zmeniť, keď súper v budúcnosti zmení svoje správanie
  - ☒ Keď obecné riešenie existuje a dá sa nájsť zmenami v genotype, tak ko-evolúcia vedie k takémuto riešeniu

# Dravec-korist' a celoživotné učenie

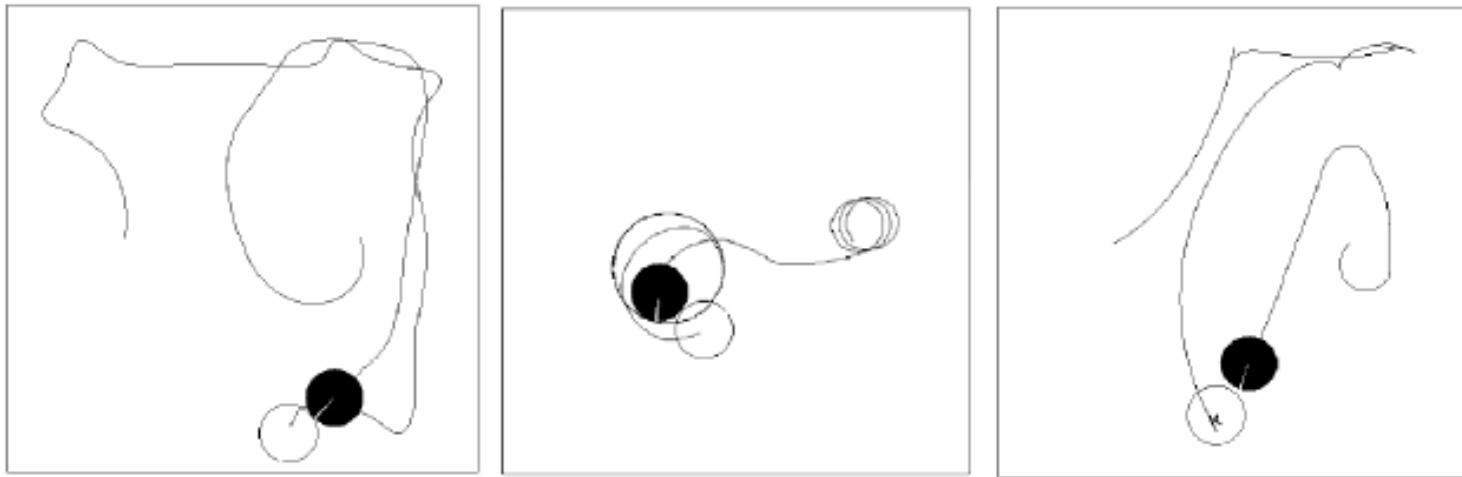
- ⌘ Cyklicky menené stratégie – ontogenetická adaptácia
- ⌘ učenie by mohlo zlepšiť výkon jedinca, dokázal by sa adaptovať na zmenu súpera už priebehu jednej generácie
- ⌘ 2 druhy úspešných jedincov:
  - ☒ úplne obecný – s jednou univerzálnou stratégiou
  - ☒ plasticky obecný – s množinou jednoduchých stratégií a mechanizmom výberu z nich
- ⌘ úplne obecný je efektívnejší, ale môže byť nedostupný
- ⌘ nájsť plasticky obecného jedinca môže byť tiež ťažké
  - ☒ musí mať viacej stratégií
  - ☒ musí byť schopný správne vybrať vhodnú stratégiu

# Dravec-korist' a celoživotné učenie

- ⌘ Experiment: genotyp kóduje vlastnosti váh a pravidlá učenia (viz minulé prednáška); dravec vidí, korisť nevidí
- ⌘ Kód pre váhu
  1. Hodnota váhy
  2. Hebbovské pravidlo – znamienko váhy (1 bit), učiaci konštanta (2 bity); počiatočné váhy malé náhodné čísla
  3. Náhodné číslo
- ⌘ učenie zlepšovalo výsledky; ale aj tu sa dalo vysledovať prispôsobovanie stratégie stratégii aktuálneho súpera, ale nie tak markantne ako bez učenia
- ⌘ Po 20 generáciách dravce vždy vyhrávali.
  - ☒ Dravce volili vždy hebovské učenie
  - ☒ Korisť volila náhodné váhy – adaptácia jej nepomáhala, pretože mala slabé senzory

# Dravec-korist' a celožitovné učenie

- ⌘ zmena stratégie dravca v priebehu života
  - ☒ príklad zmeny stratégie korisť sa otáča po malom kruhu, dravec sa 3 krát otočí (upravuje váhy) a potom vyrazí za korisťou



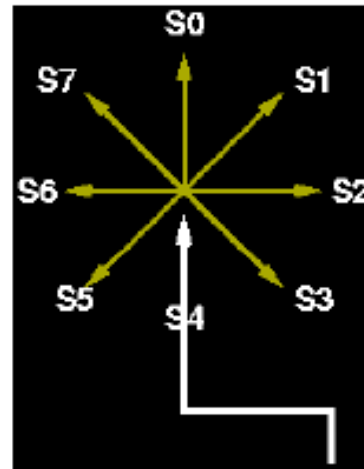
- ⌘ plastickí dravci sa vedia prispôbiť stratégiám  $B_1$  (čakať pri stene ...) a  $B_2$  (rýchly pohyb okolo arény)

# Ko-evolúcia stroj vs. človek

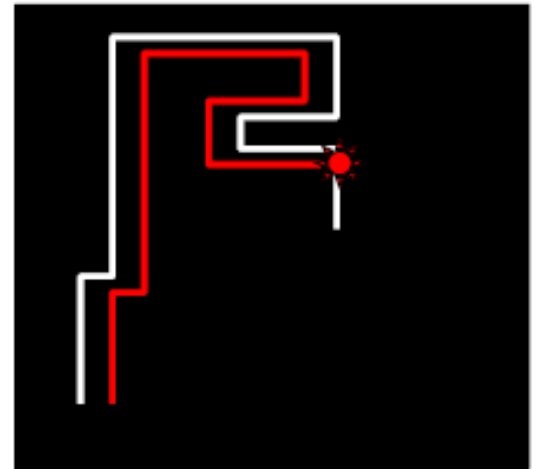
- ⌘ Funes & Pollack [2000] ko-evolvovali počítačové programy a ľudských hráčov zjednodušenej verzie počítačovej hry Tron.
- ⌘ Počítačové programy boli reprezentované jako stromy a evolvované genetickým programovaním. Vyššiu pradepodobnosť reprodukcie mali programy, ktoré porazili ľudského protihráča. Ľudskí hráči si mohli vybrať, či budú v hraní pokračovať alebo nie.



Tron, 1982, Walt Disney Pictures



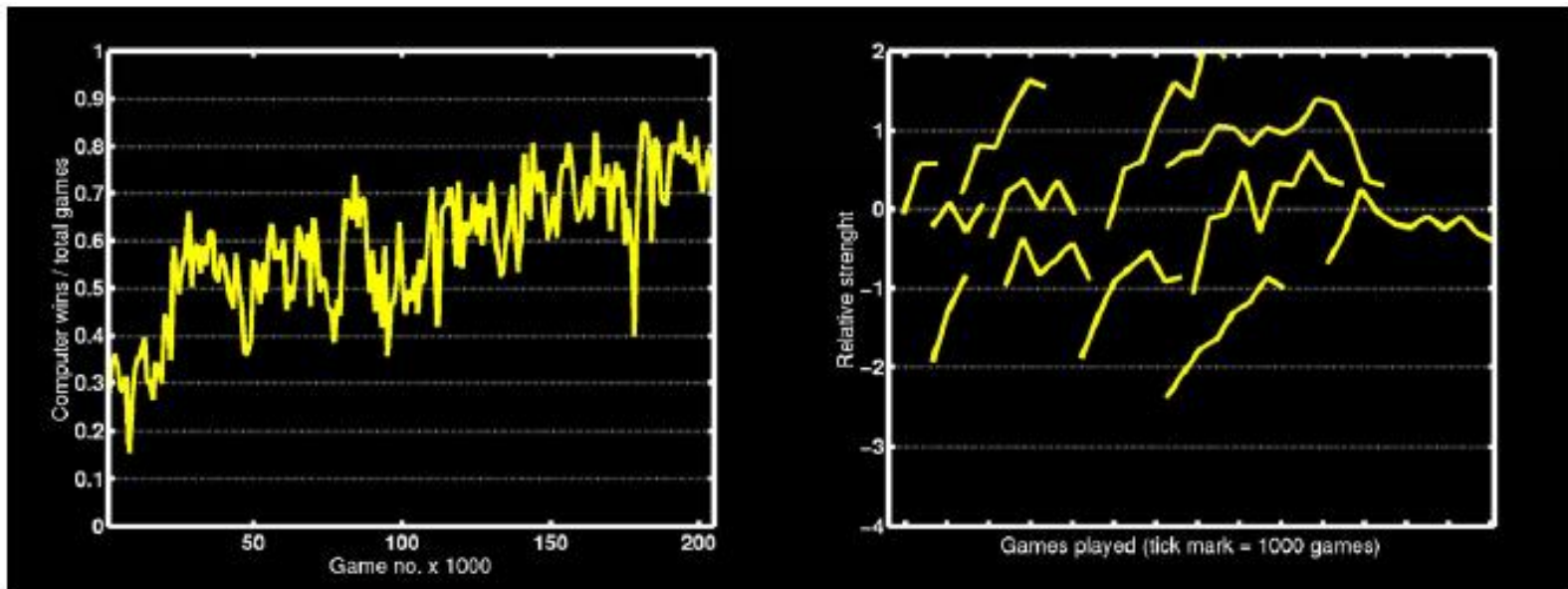
Computer Agent  
Sensory Information



Game Snapshot

# Ko-evolúcia stroj vs. človek – stroj víťazí

- ⌘ Počítačové programy sa stále zlepšovali.
- ⌘ Ľudská populácia sa nevyvíjala – ľudia sa učili medzi jednotlivými hrami.



# Dravec-korist': záver



- ⌘ Ko-evolúcia je zaujímavá
  - ☒ adaptácia v stále sa meniacom prostredí
  - ☒ inkrementálna evolúcia bez dohľadu
- ⌘ problém cyklenia
  - ☒ dá sa redukovať porovnávaním jedinca s minulými riešeniami (napr. náhodne vybraná vzorka z predchádzajúcich, „sieň slávy“)
  - ☒ pravdepodobne sa ho nedá zbaviť (ako lokálnych miním)
- ⌘ ko-evolúcia môže viesť k hľadaniu obecných stratégií
- ⌘ obecnosť sa dá dosiahnuť ko-evolúciou plastických (učiteľných) jedincov