

Učenie a evolúcia



- ⌘ Evolúcia a učenie sú 2 formy biologickej adaptácie, ktoré sa líšia v priestore a čase
 - ⌘ evolúcia – selektívna reprodukcia a substitúcia v geograficky distribuovanej populácii
 - ⊗ zmena trvá generácie
 - ⊗ je pomalá a dokáže zachytiť pomalé zmeny prostredia
 - ⊗ operuje na genotype
 - ⌘ učenie – zmeny v jednom jedincovi po dobu jeho života
 - ⊗ adaptácia jedinca ako reakcia na nepredvídané zmeny prostredia v živote jednej generácie
 - ⊗ rôzne mechanizmy: fyziologický vývoj, dospievanie, synaptická plasticita
 - ⊗ ovplyvňuje iba fenotyp; zmeny sa neprenášajú priamo do genotypu
- ⌘ v tejto prednáške: učenie = zmeny synaptických váh neurónovej siete; dajú sa adaptovať i iné atribúty – aktivačné stavy, architektúra, ...

Učenie a evolúcia



⌘ Konekcionizmus:

- ☒ učenie – dlhodobé zmeny synaptických váh

- ☒ pamäť – aktivačné stavy neurónov v rekurentných sieťach

⌘ oboje môže dávať podobné výsledky z hľadiska správania sa

Adaptívne funkcie učenia



- ⌘ Prispôsobenie sa zmenám v prostredí po dobu života jedinca alebo malého počtu generácií – schopnosť prežitia zmien
- ⌘ dovoľuje evolúcii využívať informácie získané z prostredia na zrýchľovanie a usmerňovanie evolúcie
 - ☒ ontogenetická adaptácia má spätnú väzbu z prostredia; evolúcia má jedinu hodnotu – počet potomkov (prírodná) alebo fitness (umelá)
 - ☒ evolúcia môže senzorové vnemy transformovať na učiace signály
- ⌘ učenie môže pomáhať a viesť evolúciu
 - ☒ fyzické zmeny fenotypu sa nezapisujú do genotypu, ale aj suboptimálni jedinci sa môžu reprodukovať tým, že vo svojom živote získajú vlastnosti nutné na prežitie
 - ☒ ale učenie stojí čas – preto evolúcia uprednostňuje jedincov, ktorí majú už od narodenia vlastnosti, ktoré by sa inak museli naučiť

Adaptívne funkcie učenia

- ⌘ Iné prednosti: učenie umožňuje vytvoriť zložité fenotypy z krátkych genotypov – časť informácií nutných na vytvorenie zodpovedajúceho fenotypu sa extrahuje z prostredia
 - ☒ umožňuje to udržiavať väčšiu genetickú rôznorodosť

⌘ Cena učenia

- ☒ doba potrebná na učenie – vtedy sa jedinec nechová optimálne
- ☒ vyššia nespoľahlivosť: ak sa pri učení nejaký podnet nevyskytne, tak naň jedinec nevie vhodne reagovať
- ☒ iné náklady:
 - ☒ neskoršia schopnosť reprodukcie
 - ☒ energia
 - ☒ nevyvinutý jedinec si môže nenávratne ublížiť

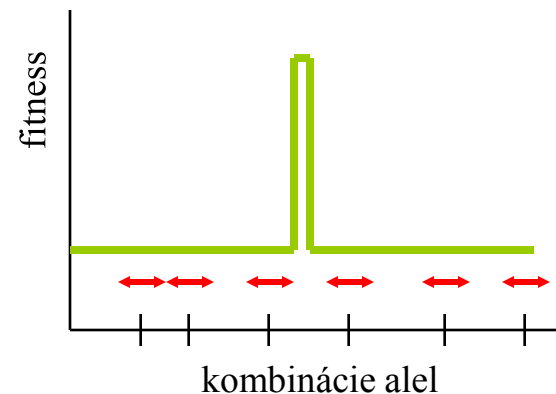
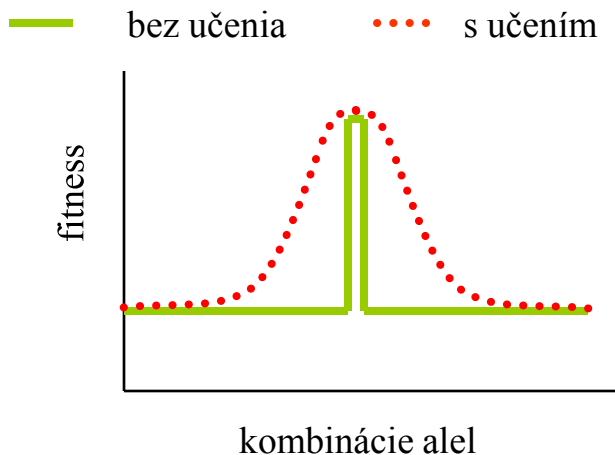
Ako učenie pomáha evolúcii – kanalizačný efekt



- ⌘ Kanál = komunikačný kanál
- ⌘ nepriama genetická asimilácia naučených vlastností
- ⌘ Hinton, Nowlan (1987)
 - ⌘ jedinec s 20 génmi, ktoré kódujú 20 potenciálnych spojov
 - ⌘ jeden gén má 3 možné hodnoty
 - ⌘ 0 – spoj neexistuje
 - ⌘ 1 – spoj existuje
 - ⌘ ? – spoj sa môže učením vytvoriť alebo rušiť
 - ⌘ úloha – umelá – nájsť správnu kombináciu spojov
 - ⌘ **učenie** – náhodné nastavovanie učiteľných spojov po obmedzenú dobu
 - ⌘ fitness bez učenia – rovná plocha s ostrými hrotmi v dobrých kombináciách spojov
 - ⌘ fitness s učením – okolie hrotov je hladšie a širšie – genetický algoritmus dokáže šplhať k vrcholu

Kanalizačný efekt

- ⌘ Keď sa nájdú jedinci s génmi čiastočne fixovanými na správnych hodnotách, tak evolúcia začne dávať prednosť jedincom, ktoré majú fixovaných viac správnych génov, teda menej učiteľných
- ⌘ jedinci bez učiteľných génov sa po celú dobu života nemôžu pohybovať v priestore fenotypu
- ⌘ učenie umožňuje evolúcii prehľadávať okolie kandidátov na reprodukciu
 - bez učenia – hľadanie ihly v kôpke sena
 - s učením – hľadanie ihly v kôpke sena, ale niekto nám napovedá, keď sme blízko



Kritika Hinton-Nowlanovho modelu



⌘ Kritika Hinton-Nowlanského modelu

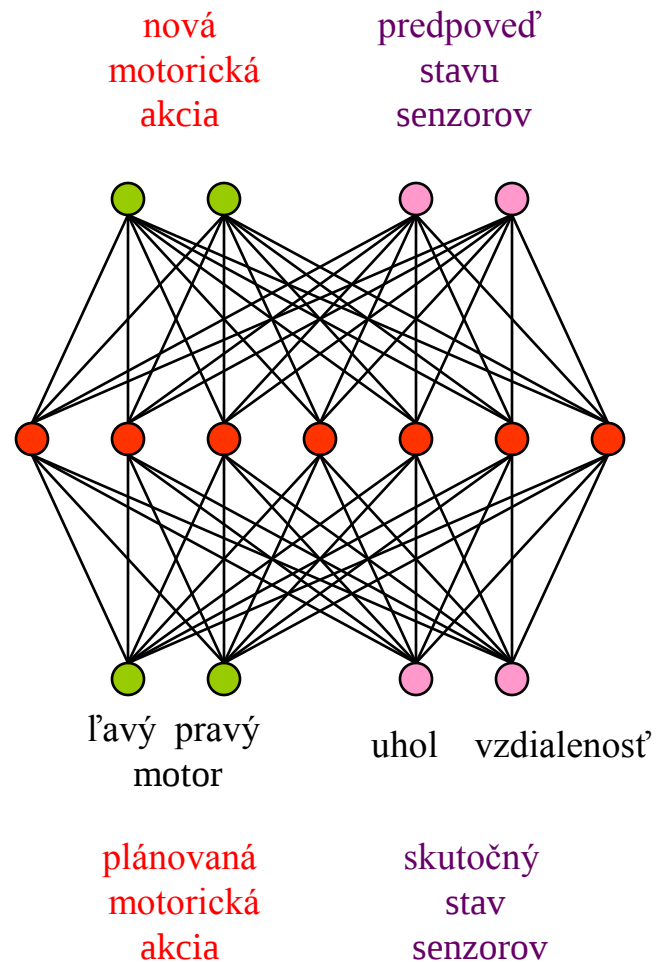
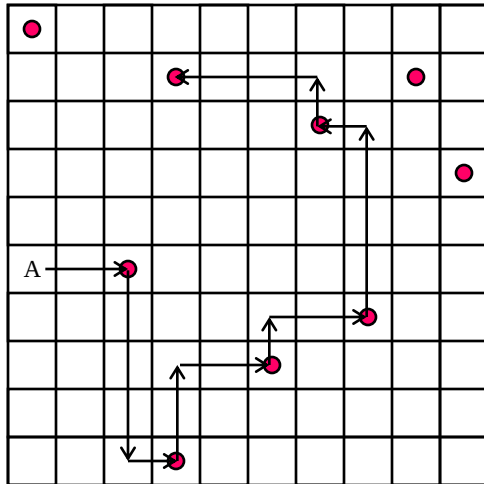
- ⏏ Učenie je iba náhodný proces
- ⏏ učenie a evolúcia majú ten istý cieľ
- ⏏ prostredie sa nemení
- ⏏ priestor učenia a priestor evolúcie sú kompletne korelované

⌘ Je možné závery Hinton a Nowlanského zovšeobecniť pre prípad menej korelovaných priestorov učenia a evolúcie?

- ⏏ Adaptívna výhoda učenia je úmerná korelovanosti priestorov učenia a evolúcie
- ⏏ asimilácia jedincov, ktorí boli najprv získaní učením je úmerná korelovanosti priestorov a cene učenia
- ⏏ za určitých okolností môže cena učenia prevýšiť jeho výhody

Evolúcia a učenie s rôznymi cieľmi

- ⌘ **Evolúcia** – podľa schopnosti hľadať potravu
- ⌘ **Učenie** – predpovedanie stavu senzorov podľa motorických akcií
- ⌘ keď animat vstúpi na políčko s potravou, tak ju hneď zje a jeho fitness sa zvýši
- ⌘ riadenie – NS:
 - ⊞ vstup plánovaná motorická akcia, uhol a vzdialenosť najbližšej potravy
 - ⊞ výstup – motorická akcia, predpoveď stavu senzorov
 - ⊞ motorická akcia – dva bity otočenie o 90° doľava, o 90° doprava, zostať stáť, krok dopredu
 - ⊞ časová postupnosť:
 1. sieť vezme plánovanú motorickú akciu a skutočný stav senzorov
 2. vydá novú motorickú akciu a predpoveď stavu senzorov
 3. plánovaná motorická akcia sa vykoná; nová motorická akcia bude novým vstupom
 4. prečíta sa stav senzorov – použije sa na učenie, potom ako nový vstup

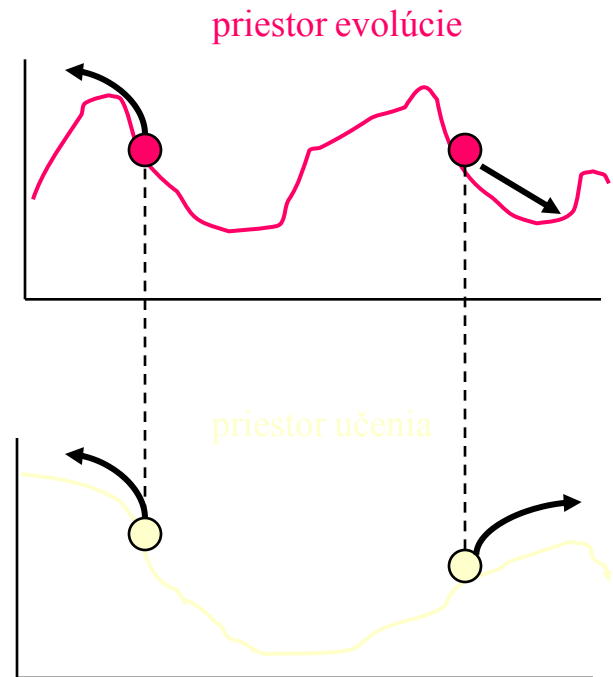


Výsledky

- ⌘ Jedinci, ktorí sa učili predpovedať boli lepší aj v hľadaní potravy ako jedinci, ktorí sa neučili
- ⌘ Vysvetlenie podľa Hintona a Nowlana nestačí, pretože učenie a evolúcia majú rozdielne ciele

Zmeny vyvolané učením posúvajú fenotyp v priestore učenia a tiež v priestore fitness (evolúcie)

- učenie maximalizuje (správnosť predpovede) v priestore učenia
 - evolúcia vyberá jedincov, ktorí pri zvýšení výkonu v priestore učenia zároveň zlepšujú výsledky v evolučnej úlohe
- ⇒ evolúcia má tendenciu vyberať jedincov v dynamicky korelovaných oblastiach



Výsledky



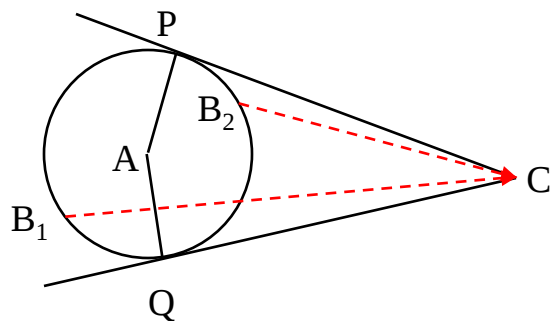
- ⌘ Evolúcia a učenie sú dva druhy zmien na dvoch rôznych entitách (populácia x jedinec), ktoré sa však navzájom ovplyvňujú
 - ☒ evolúcia učenie – zdedený genotyp čiastočne určuje ako sa bude jedinec chovať a čo sa naučí
 - ☒ učenie evolúciu – zlepšuje výkon vzhľadom k evolučnej úlohe
- ⌘ charakteristiky získané učením sa neprenášajú do genotypu jedinca (aspoň nie úplne), aj keď by to mohlo zvýšiť fitness
 - ☒ cena za učenie sa dá znížiť zrýchlením učenia
 - ☒ priestor učenia a evolučný priestor nie sú úplne korelované, genetické a učebné operátory sú rôzne; body blízke v učebnom priestore môžu byť od seba ďaleko v evolučnom priestore

Iná interpretácia

⌘ Harvey – zlepšenie priemernej výkonnosti učiach sa jedincov nenastáva interakciou učenia a evolúcie, ale iba doučením váh pozmenených mutáciou

☒ založené na pozorovaní: sieť bola trénovaná na trénovacej množ. T_1 , potom ďalej trénovaná na T_2 (nekorelované s T_1), výkonnosť siete sa zlepšila i na T_1

☒ A reprezentuje váhy siete po trénovaní s T_1 , B_1 a B_2 sú dve možné pozície siete po perturbácii, C je poloha siete po trénovaní na T_2 ; nech výkon na T_1 je nepriamo úmerný vzdialenosti od A



- Pri pohybe z B_1 je po určitú dobu sieť bližšie k A – nastáva aspoň v 50% prípadov
- pri pohybe z B_2 sa iba vzdiaľuje od A
- A silne skonvergovaná populácia (hľadanie potravy), mutáciou sa dostane do bodu B_i a učením predpovedať do C
- vlastne by to malo dopadnúť podobne, keď najlepšieho jedinca získaného evolúciou na hľadanie potravy nahradíme jedincom učeným na ten istý cieľ

Overenie



- ⌘ **Nedopadlo to tak:** najprv evolúcia bez učenia, potom učenie predpovedať – výsledky boli horšie
- ⌘ Dôsledok:
 - ☒ a) výhody celoživotného učenia nastávajú v interakcii učenia s evolúciou
 - ☒ b) v prípade učiacich sa jedincov populácia nekonverguje k A, ale niekam vľavo od A – pri učení (pohybe smerom k C) jedinec strávi väčšinu života bližšie k A

Evolúcia učenia



- ⌘ V predchádzajúcich experimentoch sa váhy vždy dedili; v prírode však väčšinou genotyp nekóduje celý fenotyp
- ⌘ Floreano, Mondala 1996: genotyp kóduje iba architektúru a pravidlá učenia pre váhy (nie ich hodnoty)
 - ☒ chromozóm sa dekoduje na riadiacu NS, váhy sa inicializujú na malé náhodné hodnoty
 - ☒ gény kódujú pre jednu synapsiu 4 možné učiace pravidlá, učiacu konštantu, chemické vlastnosti synapsie (excitačná-inhibičná, riadiaca-modulačná)
 - ☒ NS:
 - ☒ 2 neuróny pre motory a jeden skrytý neurón;
 - ☒ každý neurón dostáva na vstup signály z 8 senzorov a zo skrytého neurónu
 - ☒ 27 spojov s meta-vlastnosťami kódovanými v genotype
 - ☒ zvláštna dvojzložková aktivačná funkcia (riadenie, modulácia): súčet riadiacich signálov určuje smer otáčania motora, súčet modulačných rýchlostí

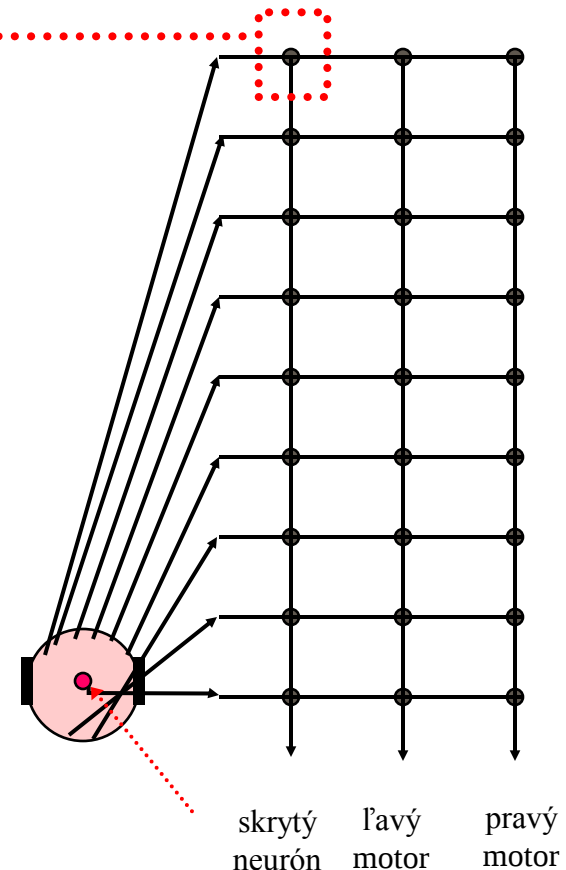
Architektúra experimentu

⌘ Genotyp:

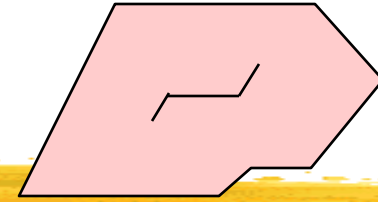
☒ 6 bitov na spoj

- ☒ riadiaci-modulačný
- ☒ excitačný-inhibičný
- ☒ 4 pravidlá – hebbovské, postsynaptické, presynaptické a kovariantné (2 bity); obmedzenie váh na interval $<0,0.1>$
- ☒ učiaci konštanta $[0, 0.3, 0.7, 1]$ (2 bity)

⌘ fitness – 3 zložková viz. Navigácia s vyhýbaním sa prekážkam



Evolučný prístup



Bludisko s okruhom (80 x 50 cm)

cieľ: maximálna rýchlosť vpred, vyhýbanie sa prekážkam

fitness (k je číslo kroku, n je celkový počet krokov)

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Phi_k \quad \Phi_k = V_k \left(1 - \sqrt{\Delta V_k}\right) (1 - i_k)$$

$$0 \leq V, \Delta V, i \leq 1$$

$$V_k = |l_k| + |r_k| \quad \Delta V_k = |l - r|$$

l_k ... rýchlosť ľavého motora, $l_k \in \langle -0,5 ; 0,5 \rangle$

r_k ... rýchlosť pravého motora, $r_k \in \langle -0,5 ; 0,5 \rangle$

i_k ... normalizovaná hodnota najaktívnejšieho
infračerveného čidla

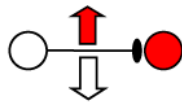
1 predchádzajúcej prednášky

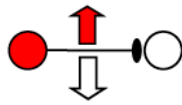
Učiacie pravidlá

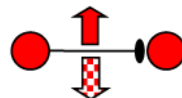
⌘ Učiacie pravidlá

  hebbovské – súhlasné aktivácie neurónov – spoj sa posilňuje, nesúhlasné aktivácie – spoj sa zoslabuje

- $\Delta w_{ij} = y_i x_j$

  postsynaptické – ten istý vzorec, ale uplatní sa iba keď je aktívny postsynaptický neurón

  presynaptické – ten istý vzorec, ale uplatní sa iba keď je aktívny presynaptický neurón

  kovariantné – $\Delta w_{ij} = (y_i - 0.5) (x_j - 0.5)$



Podrobnosti

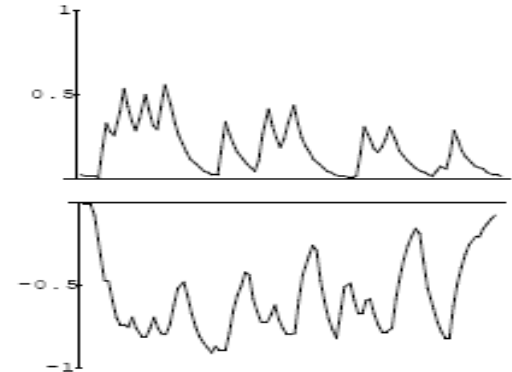
⌘ Váhy boli upravované každých 0.3 s podľa vzorca

$$w^t = w^{t-1} + \eta \Delta w^t$$

⌘ η je geneticky kódovaná učiaca konštanta

⌘ výslední najlepší jedinci fungovali podobne ako u predchádzajúcich experimentov, ale

- ☒ navinovať nevedeli už „od narodenia“, ale tí najlepší sa už po 10 krokoch učenia vedeli vyhýbať stenám
- ☒ prvé 2s dopredu-dozadu dokiaľ nenašiel stenu napravo od seba, potom už šiel dopredu, každé 2-3 kroky mierne pootočením doprava, potom znova rovno dopredu
- ☒ postupne sa jazda „vyhladzuje“
- ☒ hodnoty váh – váhy nezostali konštantné
 - prekvapivá dynamická rovnováha



Výsledky



- ⌘ Vyvinuté váhy zodpovedajú za učenie i za správanie.
- ⌘ Učenie riadenia bolo založené na dvoch zdedených schopnostiach:
 - ☒ pohyb dozadu, dokiaľ nenarazí na objekt
 - ☒ otočenie doprava dokiaľ nezačne byť aktívny najpravejší senzor; potom začne učenie – akýsi inštinkt
- ⌘ vyvinuté správanie je emergentné – vzniká interakciou s prostredím
 - ☒ je možné zmenšiť genetický kód
 - ☒ evolúcia môže nájsť jedincov schopných prispôbiť sa zmenám prostredia učením
 - ☒ váhy sa vyvíjajú iba u senzorov, kde je nejaká aktivita (pravá strana)
- ⌘ na rozdiel od predchádzajúcich experimentov evolúcia a učenie operujú na rôznych veličinách (meta-vlastnosti, váhy)
- ⌘ takto vyvinuté riadenie môže reagovať na zmeny prostredia bez ďalšej evolúcie

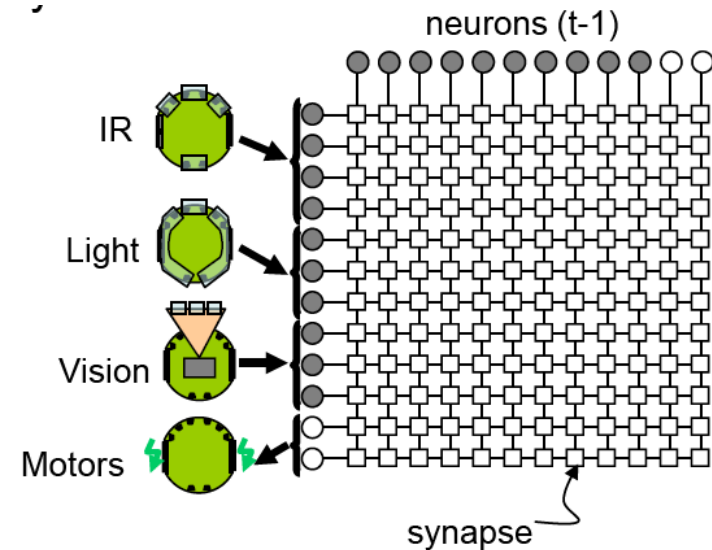
Sekvenčná úloha

zapnutie svetla vypínačom

⌘ Urzelai, Floreano, 2001 – robot má ísť k vypínaču, tým sa rozsvieti svetlo a robot má ísť k svetlu a zostať pri ňom

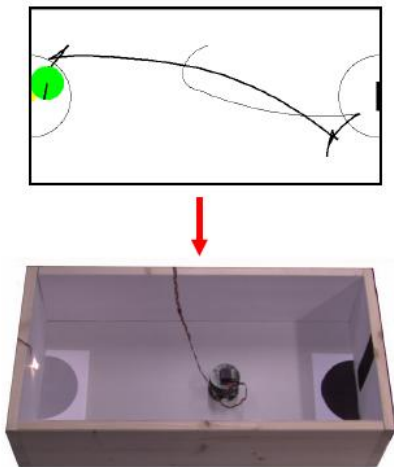
⌘ Fitness

dobapodrozsvieteným svetlom
celková doba

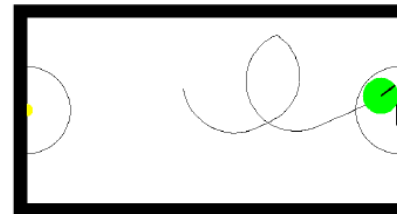
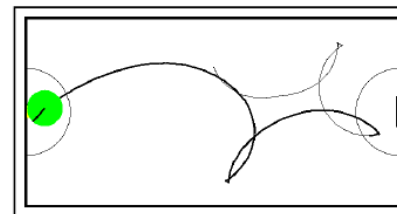


Sekvenčná úloha zapnutie svetla vypínačom

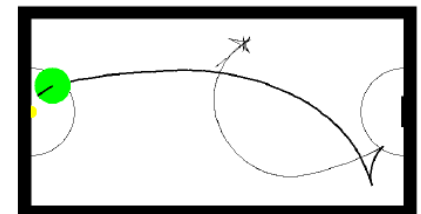
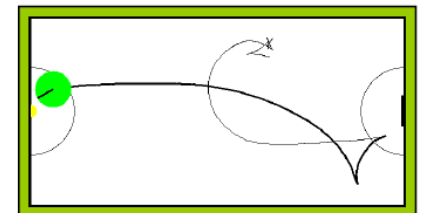
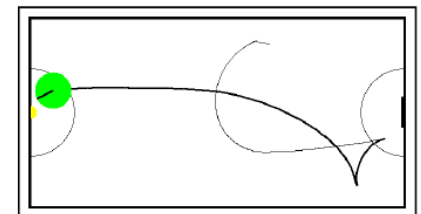
- ⌘ Vyvinuté jedince si dokázali poradiť so zmenou farby stien, ale jedince s geneticky kódovanými váhami nie
- ⌘ Podobne pri prenose na reálneho robota



Geneticky kódované
váhy



adaptované váhy

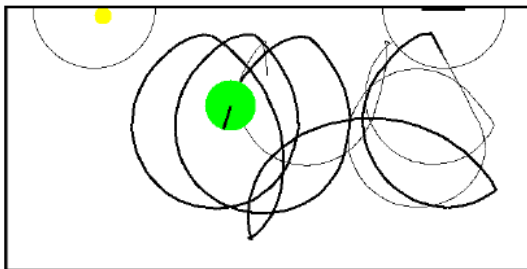
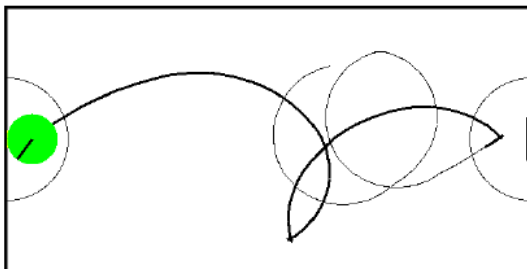


Sekvenčná úloha

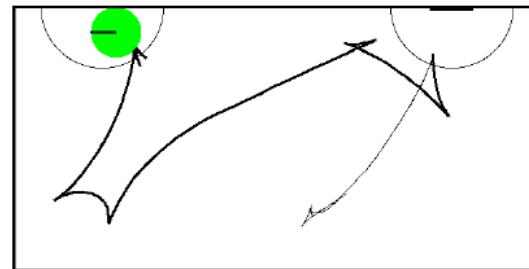
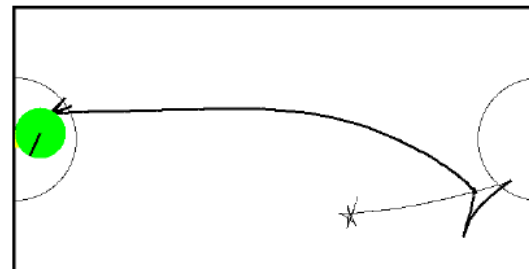
zapnutie svetla vypínačom

- ⌘ Vyvinuté jedince si zvládli i zmenu polohy vypínača a svetla

Geneticky kódované
váhy



adaptované váhy



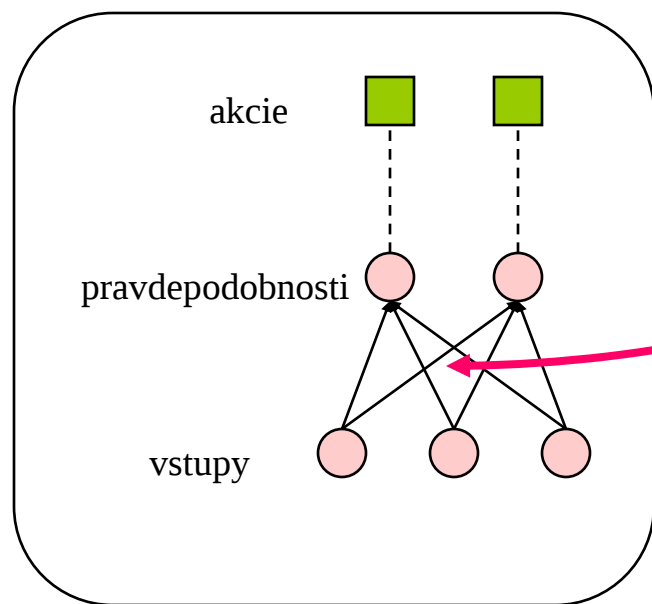
Adaptácia na rýchle zmeny prostredia



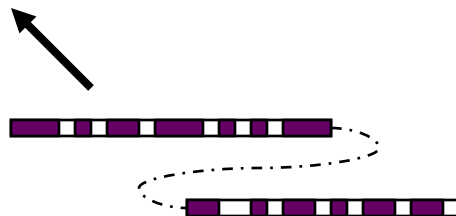
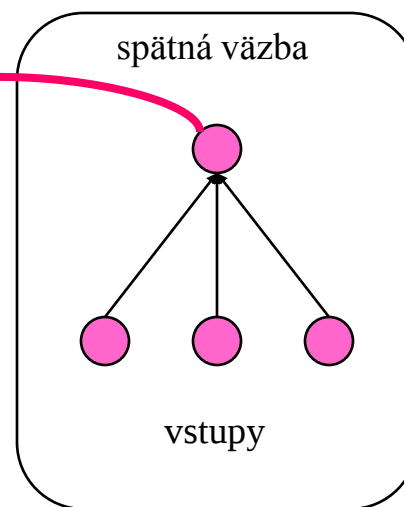
- ⌘ Ackley, Littman, 1991: umelé organizmy v simulovanom prostredí s dravcami, rôznymi druhmi potravy a inými objektmi
- ⌘ organizmus sa skladal z 2 modulov:
 - ☒ výkonný – vrstevnatá NS s dopredným šírením; výstup sú pravdepodobnosti vykonania akcií
 - ☒ vyhodnocovací – výstupom je spätná väzba – učiaci signál; závisí na zmenách výstupu hodnotiaceho modulu v čase
- ⌘ genetický algoritmus vyvíjal váhy pre výkonný i vyhodnocovací modul, ale počas života jedinca sú váhy výkonného modulu menené na základe spätnej väzby z vyhodnocovacieho modulu
 - ☒ kladná hodnota zvyšuje váhu a záporná znižuje
 - ☒ finálne váhy sa do genotypu naspäť neprepisujú
- ⌘ organizmy sa môžu reprodukovať, keď majú dostatok energie a blízko seba partnera, ktorý je pripravený k reprodukcii

Ackley, Littman

výkonný modul



vyhodnocovací modul



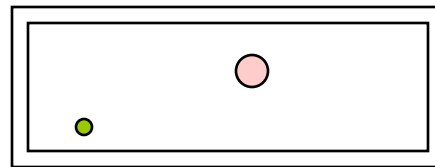
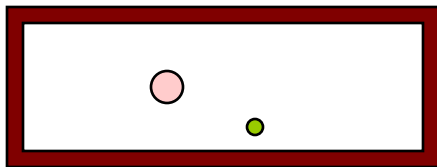
Adaptácia na rýchle zmeny prostredia



- ⌘ potomkovia vznikajú krížením a mutáciou
- ⌘ organizmus zomiera, keď je starý alebo nemá energiu
- ⌘ autori porovnávali
 1. Evolúciu bez učenia
 2. Učenie bez evolúcie
 3. Evolúcia s učením – evolutionary reinforcement learning (ERL)
- ⌘ ERL – najvýkonnejšie; viac než 3000 generácií
 - ☒ prvých 600 generácií sa jedinci museli učiť hľadať potravu
 - ☒ neskôr to už vedeli od „narodenia“
 - ☒ evolúcia formovala učenie – autonómne samo-učenie, ktoré rozhodovalo kedy a čo sa učiť

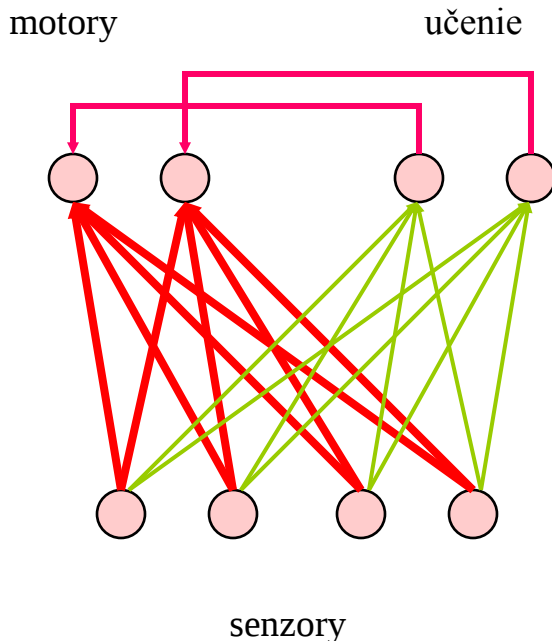
Nolfi, Parisi – premenlivé steny

- ⌘ Khepera má nájsť cieľ v aréne, kde steny môžu meniť farbu (iba simulovaný experiment)
- ⌘ aréna 60x20 cm, cieľ – kruh s priemerom 2 cm náhodne umiestnený
- ⌘ Khepera nepozná, či našla cieľ, ale fitness je tým vyššia, čím skôr nájde cieľ – má čo najefektívnejšie preskúmať arénu
- ⌘ 2 prostredia
 - ⏏ tmavé steny – musí sa pohybovať opatrne, keď „vidí“ stenu, tak je už veľmi blízko pri stene
 - ⏏ svetlé steny – aby preskúmala celú plochu, tak sa stenám musí vyhýbať až pri veľmi silnom signále zo senzorov



Premenlivé steny

⌘ Robot nevie, do ktorého prostredia sa dostal – musí to rozlíšiť a naučiť sa adekvátne pohybovať



- 4 vstupy – infračidlá združené po dvoch
- 4 výstupy
 - 2 rýchlosti motorov
 - 2 učiace signály
- učenie delta-pravidlom
- 2 podsiete – štandardná a učiaca
- všetky váhy sú geneticky vyvíjané, ale **váhy štandardnej** sa môžu meniť počas života jedinca; **váhy učiacej** sa počas života nemenia

Výsledky



- ⌘ Učenie závisí od váh učiacej podsiete (nemenných) a od senzorových vstupov (závisia na prostredí)
- ⌘ porovnanie
 - ⌘ učení x neučení – učení lepší po pár generáciách
 - ⌘ dospelí učení v oboch prostrediach, testovaní každý v oboch prostrediach
 - ⌘ vo „svojom prostredí“ jasne lepšie
 - ⌘ učení v dvoch rôznych prostrediach
 - ⌘ iné úrovne vstupných signálov po celý život
 - ⌘ iné úrovne signálov na rovnakých senzoroach (porovnávali sa najaktívnejšie)
 - ⌘ vyvinutí **učiaci sa** jedinci x vyvinutí **neučiaci sa** jedinci
 - ⌘ pred učením – učiaci sa boli horší
 - ⌘ po učení – učiaci sa boli lepší
 - ⌘ teda jedinci boli vyberaní podľa toho ako sa dokážu učiť

Predispozície k učeniu



- ☒ počiatkové podmienky (napr. počiatkové váhy)
- ☒ evolúcia môže zvoliť počiatkové váhy vhodné na učenie
 - ☒ keď nechali jedincom náhodné počiatkové váhy, tak sa síce celý život učili, ale neboli príliš úspešní – chyba klesala, ale efektivita prehľadávania sa nemenila
- ☒ predispozícia učiť sa prehľadávať – v zdedených váhach štandardnej siete, ale tiež v zdedených váhach učiacej siete
 - ☒ pri náhodných váhach učiacej siete – mizerný výkon
 - ☒ pri riadení robota učiacimi signálmi – tiež
- ☒ nájdené siete mali predispozíciu k učeniu, nie k chovaniu; chovanie vzniká emergentne interakciou štandardných váh, učiacich váh a prostredia
- ☒ vyvinutí jedinci majú predispozície k voľbe užitočných skúseností
 - ☒ po „narodení“ sa správajú tak, aby zosilnili vnímateľné rozdiely medzi prostrediami a mohli sa naučiť 2 rôzne správania pre rôzne prostredia

Záver



⌘ Evolučné učenie sa líši od tradičného

- ☒ tradičné učenie nezohľadňuje vlastnosti jedinca pred učením
- ☒ evolučné učenie ich využíva

⌘ evolúcia učiacich pravidiel

- ☒ kratší genóm
- ☒ jedinci sú vyvíjaní pre ich schopnosť prispôsobovať sa prostrediu a vyvíjať si chovanie, ktoré vyhovuje selekčnému kritériu
- ☒ takto vyvinuté roboty sú schopné sa „preučiť“ aj bez ďalšieho evolučného vývoja