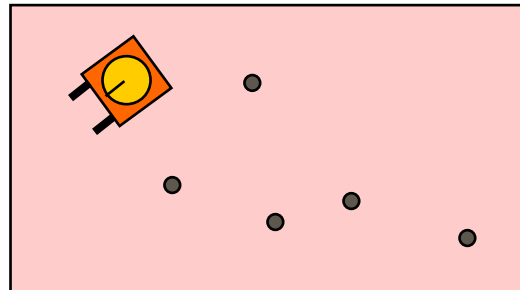


# Za hranice reaktívnej inteligencie

- na minulej prednáške sme sa dostali na hranice možností reaktívnej inteligencie
- teraz to budú úlohy, ktoré vyžadujú modulárnu architektúru alebo vnútorné stavy
  1. zbieranie odpadu – emergentná architektúra, moduly, moduly nezodpovedajú základným správaniam
  2. navigácia s návratom domov – robot musí periodicky dobíjať batérie v nabíjači; robot si vytvorí vnútornú neurónovú topografickú mapu
- Modulárna architektúra – v evolučnej robotike nie sú moduly nutné
  - Je možné vytvoriť homogénne (nemodulárne) riadenie pre ľubovoľnú úlohu, alebo sú úlohy, kde sú modulárne architektúry lepšie?
  - Keď budeme vyvíjať modulárne systémy, budú vytvorené moduly zodpovedať základným správaniam?

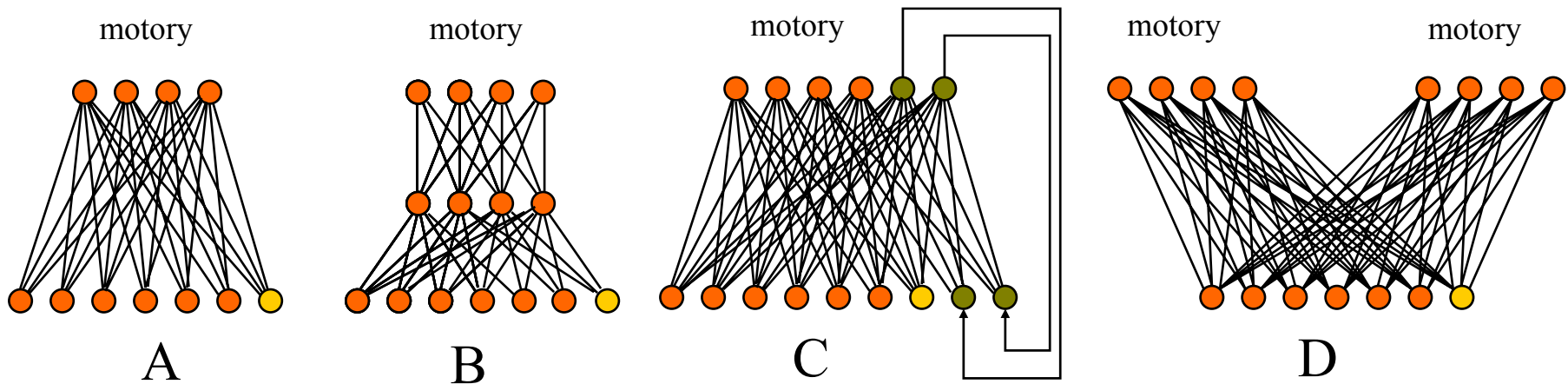
# Zbieranie odpadkov

- Khepera ma v obdĺžnikovej aréne (60 x 35 cm) s 5 valcami (2,3 cm) zbierať valce a vyhadzovať ich za stenu (3 cm vysokú)
- dlhá postupnosť akcií:
  - a) prehľadávanie, vyhýbanie sa stenám
  - b) rozpoznanie cieľa (valca) a priblíženie sa k nemu pod správnym uhlom a do vhodnej vzdialenosti, kde môže byť valec uchopený
  - c) zodvihnutie cieľa
  - d) pohyb ku stene s vyhýbaním sa ostatným cieľom
  - e) rozpoznanie steny, priblíženie sa k nej pod vhodným uhlom a do vhodnej vzdialenosti tak, aby cieľ mohol bezpečne vypadnúť za hranicu arény
  - f) vypustenie cieľa



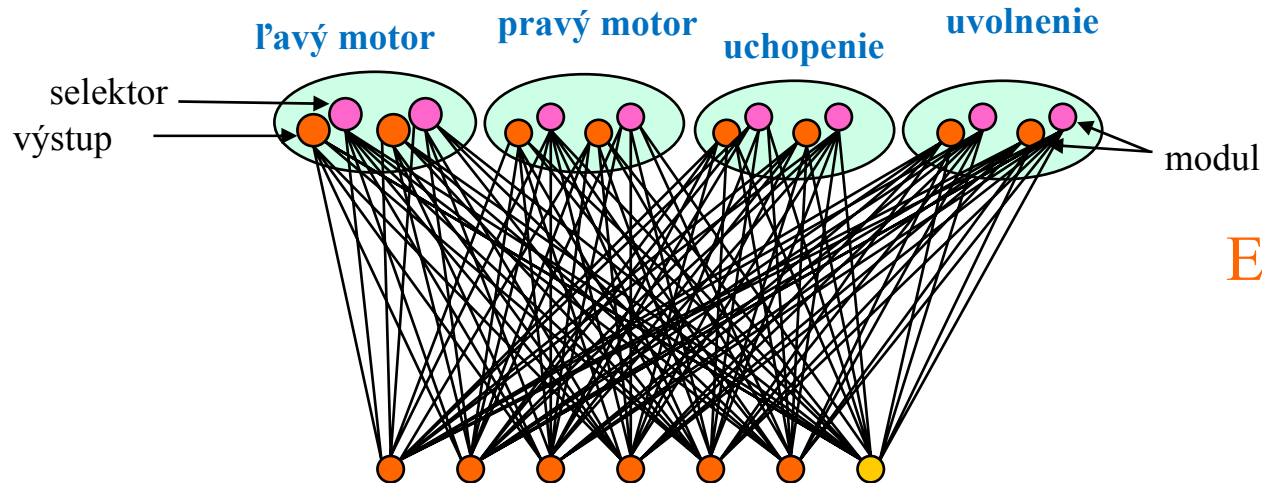
# Architektúra NS

- 7 neurónov pre senzory (6 predných infra, 1 v chápadle)
- 4 pre motory (ľavé/pravé kolo, spustenie procedúry uchopenia, spustenie procedúry pustenja)



- **D** 2 moduly, jeden pre riadenie, keď je chápadlo prázdne, druhý, keď je v chápadle nejaký objekt

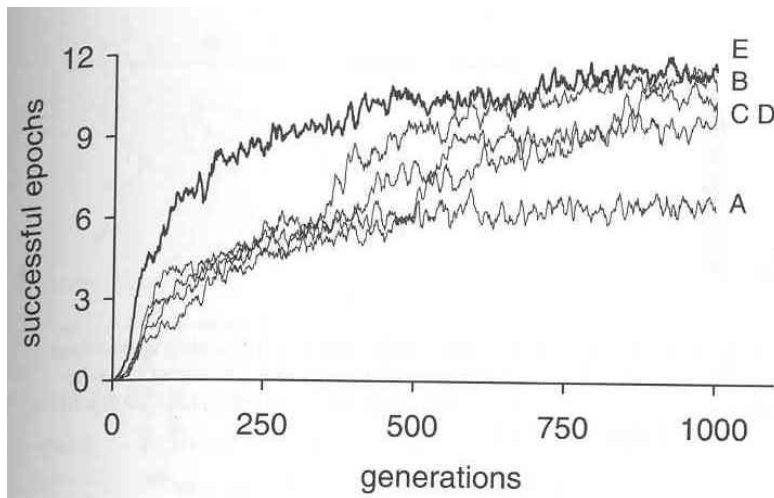
# emergentná modulárna architektúra



- **E** emergentná modulárna architektúra – konštruktér určí iba počet modulov (tu 2 moduly pre každý motor. výstup) a mechanizmus arbitra (rozhoduje, ktorý modul bude riadiť)
- modul – 2 neuróny: samotný výstup, selektor – súťaží so selektormi ostatných modulov pre ten istý motor o to, ktorý modul bude motor riadiť
- aktivita senzorov sa snímala každých 100 ms, ale uchopenie, resp. uvolnenie objektu trvalo až 3 s, preto má sieť výstupy na spustenie týchto procedúr)

# Evolúcia bola simulovaná

- fitness podľa počtu cieľov vyhodených z arény + (slabo) uchopenie cieľa
- navyše bolo nutné zvýšiť frekvenciu dôležitých vzorov pri tréningu (po tom, čo robot uchopil valec, tak sa mu hneď objavil v ceste (umelo pridaný) valec – aby sa lepšie naučil vyhýbať cieľom, keď má niečo v chápadle)



# Zložitosť úlohy

- robot musí rozoznať cieľ od steny a to v jednom kroku, aby sa mohla spustiť procedúra uchopenia
  - nemôže spoliehať na vyvinuté správanie – aktívne vnímanie, pretože robot potrebuje rozpoznávať, keď je priamo pred cieľom, aby ho mohol uchopiť (pre arch. C by to vďaka rekurentným spojom šlo, ale pri simulovanom vývoji sa takéto chovanie nevyvinulo)
  - robot musí reagovať značne rozdielne pre veľmi podobné vstupy
  - značne sa prekrývajúce vnemy pre valce a steny
  - v závislosti na stave čidla v chápadle musí byť jeho správanie opačné
- musí vykonať v správnom poradí dlhú postupnosť činností

# V rámci experimentu sa skúma



- A) úloha skrytých neurónov (môžu prekódovať vstupy, aby sa zdôraznili rozdiely)
- B) úloha vnútornej dynamiky (neuróny s rekurentnými spojmi – mohli by umožniť rôzne reakcie v závislosti na predchádzajúcich vstupoch)
- C) rola modularity (možnosti rozdelenia senzorových vnemov do podskupín spracovávaných rôznymi modulmi)

# Výsledky

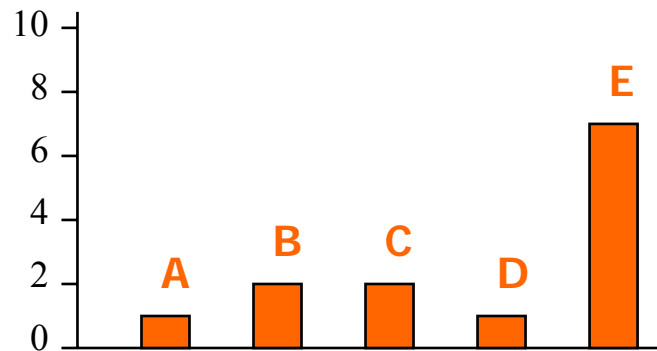


- všetky architektúry dovolili vytvoriť jedincov schopných robiť požadované činnosti, ale ich výkonnosti sa líšili:
  - 1 epocha končí po 200 krokoch alebo úspešným vyhodnotením cieľa z arény; porovnali sa počty úspešných epoch z 15 u najlepších jedincov po 1000 generáciách
  - pre **A** asi 6; **B,C,D** 9-10; **E** cca 12
  - architektúra **E** (emergentná modulárna) bola do generácie 500 značne lepšia než ľubovoľná iná architektúra
  - **A** bola vždy značne slabšia než ľubovoľná iná architektúra



# Na reálnom robote

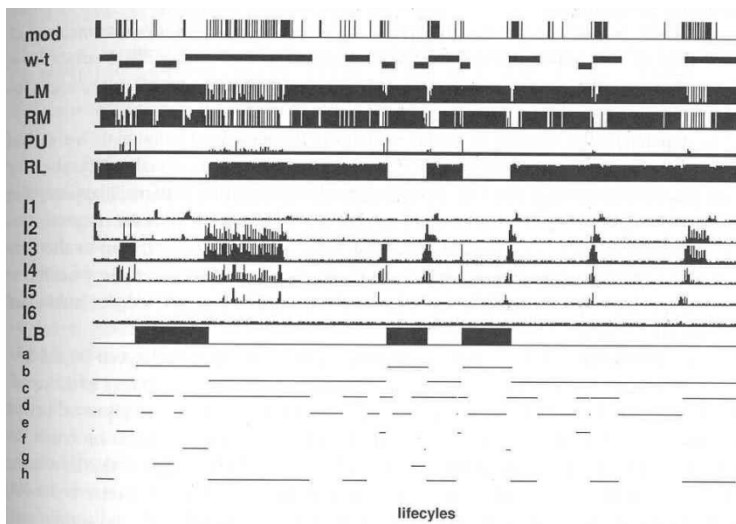
- Výsledky po prenesení na reálneho robota (vždy najlepší jedinci z 10 simulovaných experimentov):



- pre **E** 7 z 10 vyčistilo arénu do 5000 cyklov, nebúrало do steny, nechytalo stenu, nepúšťalo cieľ nad iným cieľom), u ostatných max. 2 z 10
- Celkovo: emergentna modulárna architektúra umožnila nájsť správne riešenie rýchlejšie než iné architektúry a umožnila vývoj robustnejšieho riadenia (malá strata výkonu po prenesení na reálneho robota)

# Budú moduly zodpovedať základným správaniam?

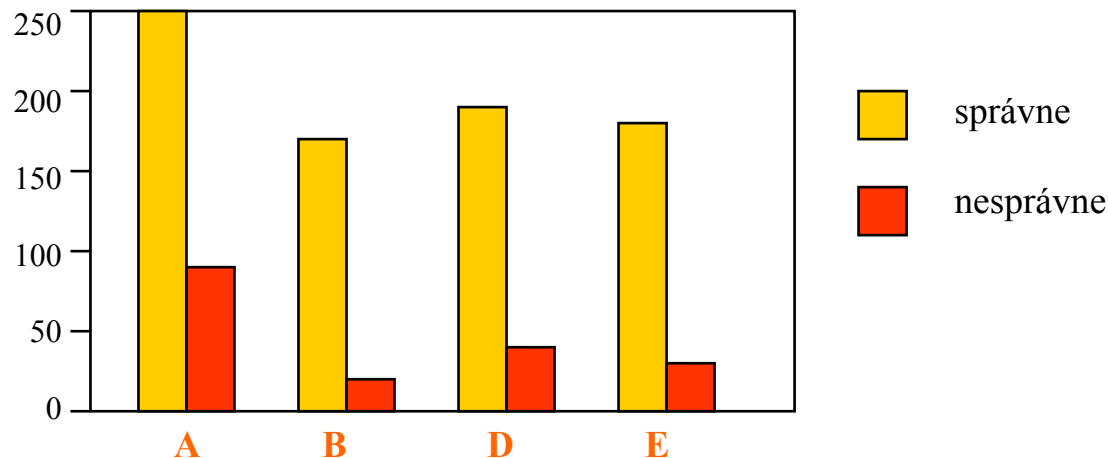
- **NIE!**
- **E** umožňuje  $2^4 = 16$  kombinácií modulov, ale v typickom jedincovi sa využili nakoniec iba 2 – 2 moduly pre pravý motor, z ostatných dvojíc iba jeden
- 2 moduly pre pravý motor – porovnanie z vonkajšieho pohľadu:



- striedali sa vo všetkých fázach (viz obr. 6.6)
- arbiter rýchle prepínal medzi obidvomi modulmi - žiaden nezodpovedal nejakému základnému chovaniu
- podobné výsledky ukázala analýza aj ďalších jedincov
- zdá sa, že hlavnou úlohou arbitra bolo prepínanie modulov pri podobných vstupoch

# Porovnanie zvnútra

- pre každú architektúru sa vzali najlepší jedinci z 10 simulácií; pre každého jedinca sa skúšalo 20 vzdialeností, 180 uhlov, s plným/prázdny chápateľom; počítal sa priemerný počet správnych spustení procedúr uchopenia a pustenia
- **A** (bez vnútorných neurónov) najviac správnych spustení, ale aj najviac chýb
- najmenej chýb robili **B** a **E** – dokonca 2 z 10 nikdy neurobili chybu; všetci jedinci pre **A** a **D** vždy urobili nejakú chybu



# Porovnanie zvnútra



- pozn. robot môže naviac sám voliť akcie tak, aby nerobil chyby
- ukazuje sa, že hlavnou úlohou modulov je zlepšenie schopnosti rozlišovania rôznych objektov
- tieto výsledky vyzerajú lepšie ako pri vizuálnej navigácii (rozlišovanie malých a veľkých valcov pri vyhýbaní sa stenám), ale to je iba zdanlivé, pretože po robote sa nechce, aby urobil rôzne akcie vždy, keď je to možné
- roboty dokázali senzoro-motorickou koordináciou zvyšovať frekvenciu stavov, keď nerobili chyby, oproti frekvencii stavov, keď chyby robili

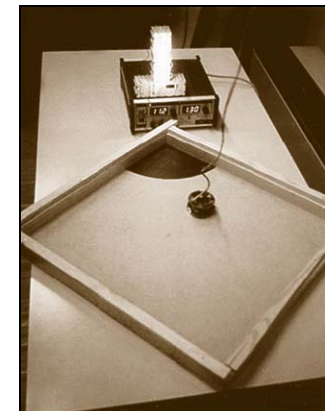
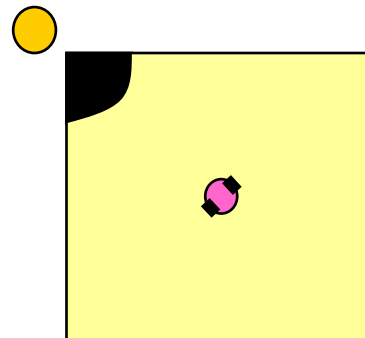
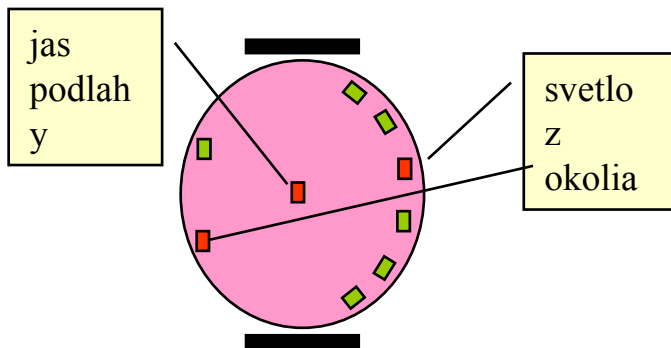
# Zhrnutie



- na minulej prednáške sme ukázali, že hlavným problémom dekompozície je rozdelenie úlohy na základne chovania; takéto ručné rozdelenie môže viesť k pod-úlohám, ktoré sú zložitejšie než celé globálne správanie
- emergentná modulárna architektúra umožňuje vyvíjaným jedincom, aby používali rôzne moduly k rôznym základným chovaniam bez toho, aby takéto rozdelenie musel robiť človek
- emergentná modulárna architektúra dávala lepšie výsledky než ľubovoľná iná (vrátane architektúry s ručne navrhnutými modulmi); vyvinuté riadenie nemá základné chovania priamo spojené s kombináciou modulov
- takéto riadenie nejde vytvoriť klasickým prístupom (dekompozícia a integrácia), pretože výsledné správanie je výsledkom dynamickej interakcie medzi robotom a prostredím
- i pri využití vnútorných stavov neklesá význam sensorovo-motorickej koordinácie

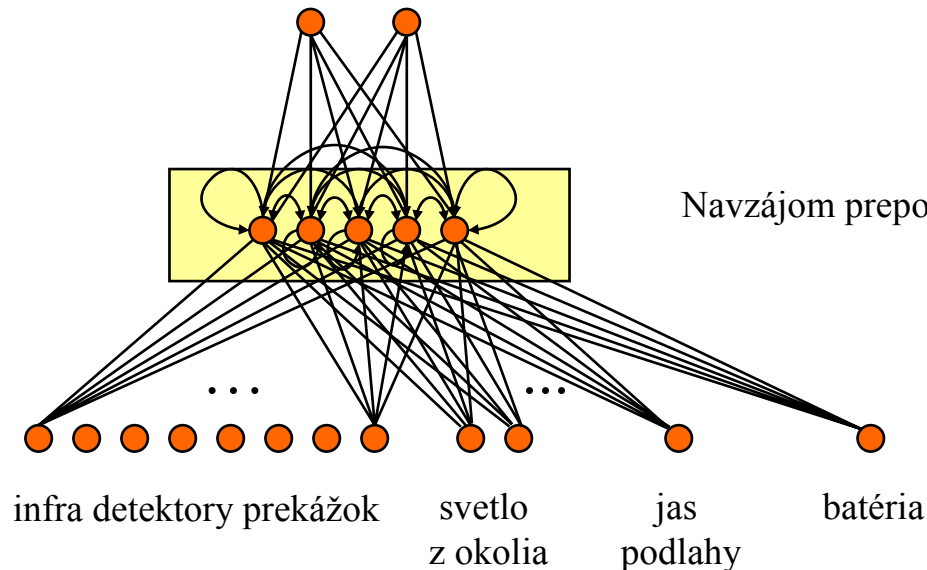
# Roboty s vnútornou dynamikou

- jednou z možností zvýšenia výpočtovej sily riadenia robota sú rekurentné spoje
- **Úloha:** Khepera v aréne s nabíjačom batérií a malou kapacitou batérie, ktorá sa musí často dobíjať
- nabíjač vyznačený svetelnou vežou v jednom rohu arény (40 x 45 cm) spolu s tmavšou podlahou (kruhový výsek čiernej farby polomeru 8 cm)
- Khepera: 8 infra senzorov, 2 z nich (jeden vpredu a jeden vzadu) navyše merali svetlo z okolia, dodatočný infra senzor smerujúci na podlahu (dával 1, keď Khepera nebola na nabíjači, inak 0)



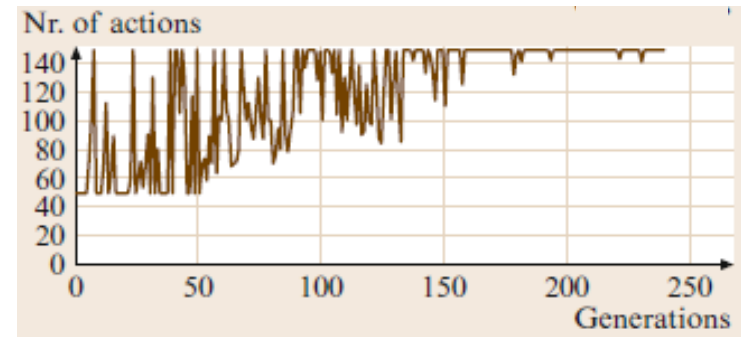
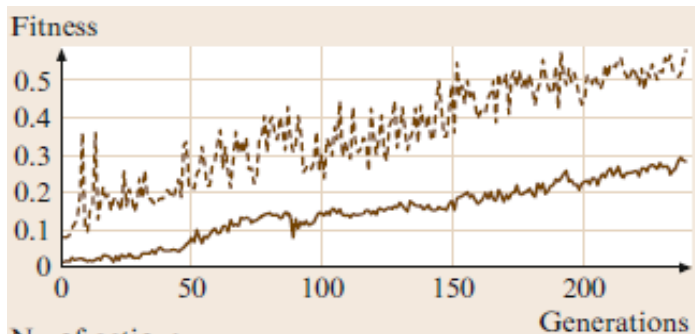
# Aréna s nabíjačom

- simulovaná batéria – doba vybitia 20 s, simulovaný senzor stavu batérie (kvôli času)
- NS – sigmoidový trojvrstvový perceptron; 5 neurónov v skrytej vrstve s rekurentnými spojmi



# Aréna s nabíjačom

- plne nabitá batéria výdrži 50 krokov = 20 s; na nabíjači sa batéria okamžite nabije; 1 epocha = max 150 krokov (60 s)
- jednoduchá fitness 
$$\Phi = V(1 - i), \quad \text{kde } 0 \leq V \leq 1, \quad 0 \leq i \leq 1$$
- $V$  je priemerná rýchlosť kolies – maximalizuje rýchlosť
- $i$  je max. aktivácia infra senzoru detekujúceho prekážky –  $(1-i)$  maximalizuje vyhýbanie sa stenám
- fitness sa v každom kroku pričítala, ale nie pokiaľ bol robot na nabíjači, nakoniec sa delila počtom krokov



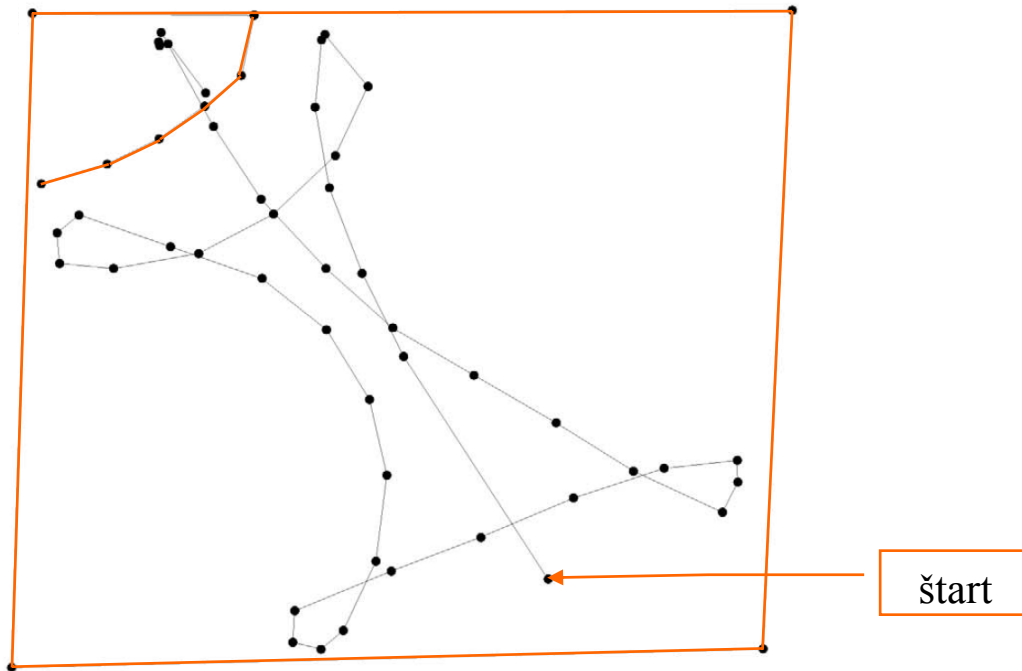


# Výsledky



- 240 generácií na skutočnom robote
- priemerná fitness populácie stále rástla; posledných 90 generácií zlepšovanie skracovaním pobytu na nabíjači
- **Vlastnosti najlepšieho jedinca**
  1. štart z nabíjača: rýchle von, vracal sa pri takmer vybitej batérii (0.1; 5 krokov pred vybitím); na nabíjači sa otočil a rýchle odišiel; robot prevažne cúval; väčšinou sa pohyboval po miernom oblúku, pri stenách sa otáčal doprava
  2. štart z rôznych pozícií a s rôznou orientáciou: z malého počtu pozícií/orientácií robot nabíjač nenašiel (aj z týchto to dokázal, keď už bol v pohybe – rôzne výstupy pre rovnaké vstupy spôsobené rekurentnými spojmi)

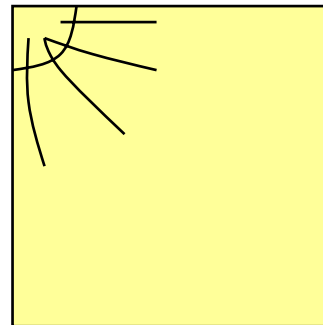
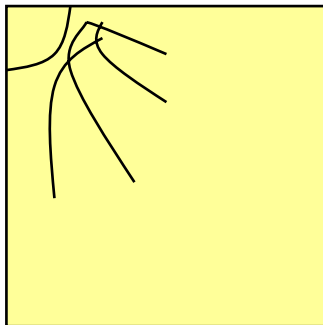
# Výsledky



3. štart robota z rôznych pozícií, zaznamenávala sa aktivita vnútorných neurónov: väčšinou mierne zahnutá dráha s ostrými obratmi pri stenách; 3-4 obraty než išiel na nabíjač

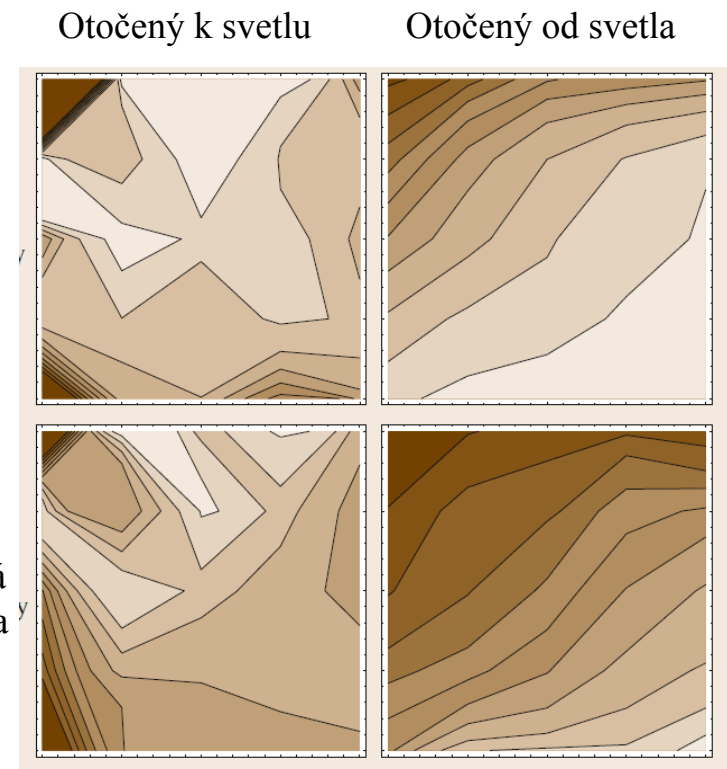
# Výsledky

4. porovnanie predchádzajúceho s vypnutou svetelnou stenou: keď nabitie batérie kleslo pod určitú úroveň (asi tretina), tak sa správanie zmenilo – kruhová dráha – hľadal zdroj svetla; jeden z vnútorných neurónov zodpovedal za stav batérie, keď hrozilo vybitie, tak rýchle rástla jeho aktivita; dva neuróny boli stále veľmi aktívne, okrem stavu pri stene – zodpovedajú za riadenie priameho pohybu a vyhýbaniu sa stenám; ďalšie dva asi slúžili na plánovanie trasy, jeden menil svoju aktivitu po zatočení, druhý mierne zvyšoval aktivitu pri poklese nabitia batérie
5. Porovnanie dráh s plne nabitou batériou a s takmer vybitou batériou:



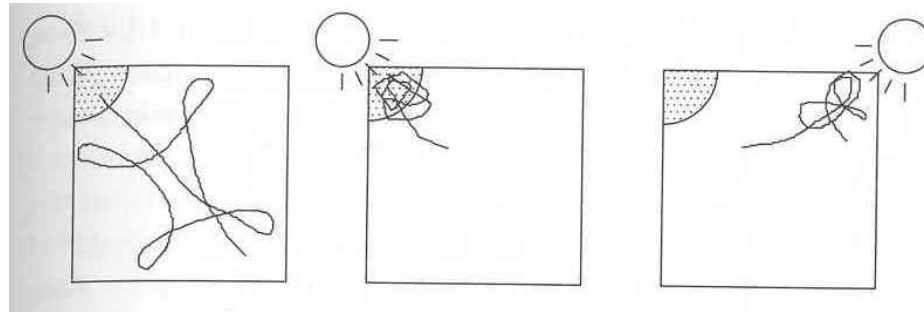
# Výsledky

6. Signál z rekurentných spojov nastavili na priemernú hodnotu a merali aktivitu vnútorných neurónov na rovnomerne rozložených pozíciách za podmienok
- a) slabá batéria, smeruje na vežu
  - b) slabá batéria smeruje od veže
  - c) nabitá batéria, smeruje na vežu
  - d) nabitá batéria, smeruje od veže
- neurón h4 (monitoroval batériu)  
vykázal topografickú reprezentáciu prostredia v závislosti na orientácii robota



# Re-adaptácia na zmeny

1. Najlepší jedinec po 240 generáciách – dobije batériu a rýchle opustí nabíjač
2. keď sa batéria nedobije, tak jazdí po nabíjači až do vybitia
3. keď premiestnili svetelnú vežu do susedného rohu, tak robot šiel k nej a zostal pri nej až do vybitia batérie



- po 240 generáciách sa zmenilo prostredie presunutím svetla do iného rohu a pokračovalo sa 80 generácií
  - už po 20 generáciách sa robot znova prispôbil
  - najrýchlejšie to šlo, keď svetlo prešlo do opačného rohu – na to stačilo zmeniť málo váh

# Zhrnutie



- Správanie vyvinutých jedincov je založené na topologickej neurálnej reprezentácii prostredia