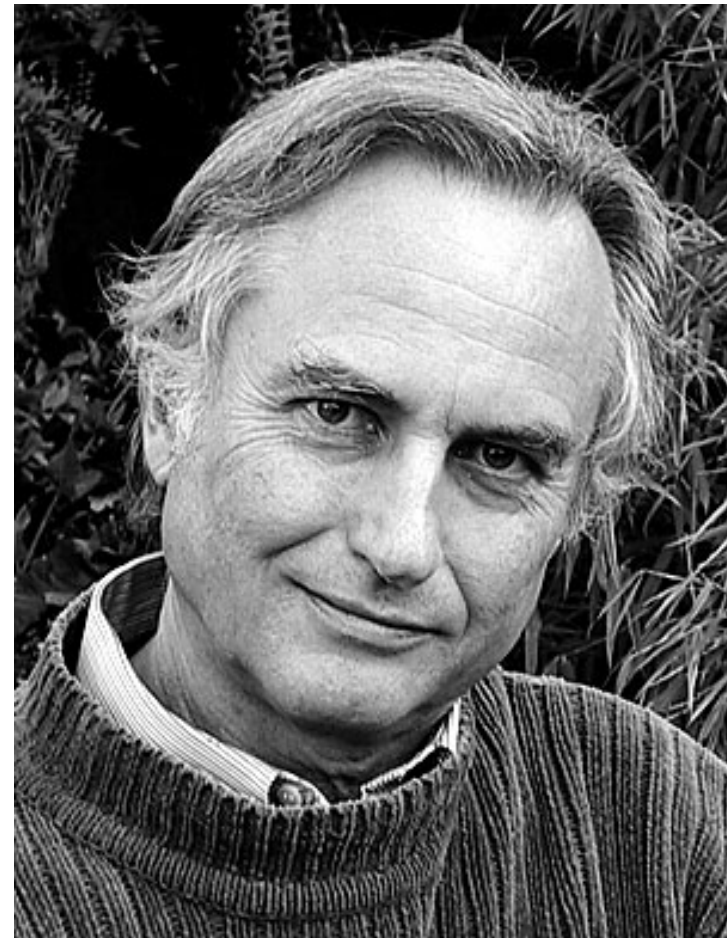


4. prednáška

Úloha učenia v evolúcii (Baldwinov efekt) a Memetika



J. M. Baldwin (1861-1934)



R. Dawkins (1941)

Baldwinov efekt

Úloha učenia v evolúcii

- V r.1896 americký psychológ J. M. Baldwin formuloval hypotézu podľa ktorej, jedinci z populácie *schopní učiť sa majú väčšiu šancu prežitia*, ich fitness je väčšie ako fitness jedincov, ktorí túto vlastnosť nemajú. Ak prostredie evolúcie zostáva dlhú dobu nemenné, potom prirodzený výber môže viesť k *emergencii* takých jedincov populácie, ktorí majú túto *schopnosť učiť sa geneticky zafixovanú*, Baldwin nazval tento mechanizmus „*organická selekcia*“. V súčasnosti sa na počesť Baldwina tento jav nazýva *Baldwinov efekt*.
- Môžeme teda konštatovať, že pri evolúcii kognitívneho aparátu vystupuje do popredia *aspekt učenia*, t.j. schopnosť jedincov adaptovať si svoj kognitívny orgán tak, aby odrážal v určitom rozsahu zmeny v prostredí alebo nové kognitívne funkcie dôležité pre prežitie a reprodukciu.

Význam učenia v darwinovskej evolúcii spočíva v tom, že organizmus s lepším kognitívnym aparátom má väčšiu šancu na prežitie a reprodukciu. Poznamenajme, že základná architektúra a snád' aj počiatkové nastavenie vybraných váhových koeficientov kognitívneho orgánu sa dedične prenášajú na potomkov, avšak neprenášajú sa vedomosti získané rodičmi v priebehu ich života.

GA s učením

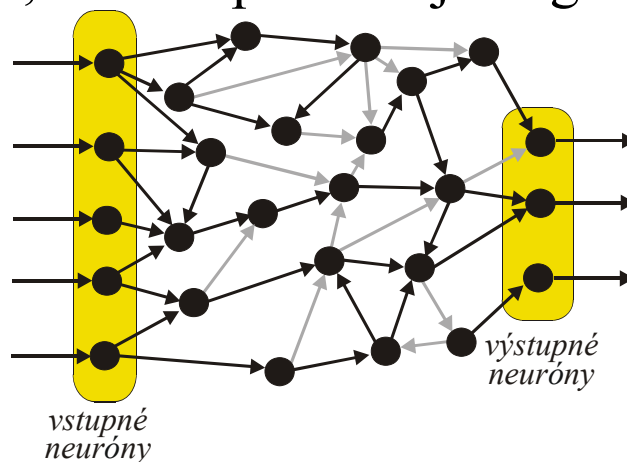
Moderný pohľad na Baldwinov efekt pochádza od *Hintona a Nowlana*, ktorí chápali učenie ako prehľadávanie v určitom okolí aktuálneho stavového bodu parametrov kognitívneho orgánu.



G. E. Hinton

Jednoduchý GA model evolúcie s učením podľa Hintona a Nowlana (pracovná hypotéza)

- Uvažujme neurónovú sieť, ktorá reprezentuje kognitívny orgán agenta



- Budeme predpokladať, že niektoré váhové koeficienty w siete sú už nastavené geneticky (čo je reprezentované binárnymi hodnotami 0 a 1 v genotype agenta), iné parametre siete nie sú nastavené (čo je reprezentované symbolmi # v genotype agenta)

$$x = (1100#####01##0011).$$

- V priebehu evolúcie agenta sa genotyp agenta mení pomocou mutácii tak, že sú mutované tak binárne hodnoty genotypu ako aj symboly #.
- Pod *učeníím agenta* rozumieme proces, kde agent metódou „hill climbing“ (t. j. náhodným lokálnym prehľadávaním) skúma, ktoré symboly # môžu byť nahradené nejakou binárnou hodnotou 0 alebo 1.
- Ukazuje sa, že väčšina symbolov # je nahradená binárnymi hodnotami, čo môžeme interpretovať tak, že kognitívny orgán agenta sa stáva vhodnejším pre realizáciu požadovaných kognitívnych aktivít. Tento proces prebieha aj bez učenia, ale je podstatne pomalší.

- Hlavný výsledok týchto numerických experimentov je ten, že ak do procesu evolúcie zapojíme učenie, potom *emergencia* chromozómov v populácii s malou frekvenciou výskytu allel # je podstatne rýchlejšia ako keď učenie nie je zapojené. *Výsledkom evolúcie je agent, ktorý má vo svojom kognitívnom orgáne určité poznatky buď*
 - (1) *už priamo zabudované v jeho architektúre (inštinkty) alebo*
 - (2) *jeho kognitívny orgán má určité predispozície vykonávať špeciálne kognitívne aktivity*

Plasticita genotypu

- **Plasticita fenotypu** je vyjadrená skutočnosťou, že fitness fenotypu $f(\mathbf{x})$ môže byť prehľadávaný v okolí $U(\mathbf{x})$ metódou „hill climbing“.
- V okolí $U(\mathbf{x})$ hľadáme „lepšie riešenie“ $\mathbf{x}' \in U(\mathbf{x})$, pre ktoré platí $f(\mathbf{x}') > f(\mathbf{x})$.
- Použitie koncepcie **efektívneho fitness** spočíva v možnosti vyjadriť podmienku „monotónnosti“: Majme dva fenotypy \mathbf{x}_1 a \mathbf{x}_2 s rovnakým fitness, $f(\mathbf{x}_1) = f(\mathbf{x}_2)$, kde v blízkom okolí týchto fenotypov existujú také riešenia

$$\mathbf{x}_{1,opt} = \arg \min_{\mathbf{x} \in U(\mathbf{x}_1)} f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x}_{2,opt} = \arg \min_{\mathbf{x} \in U(\mathbf{x}_2)} f(\mathbf{x})$$

Vyhovujúcich podmienke

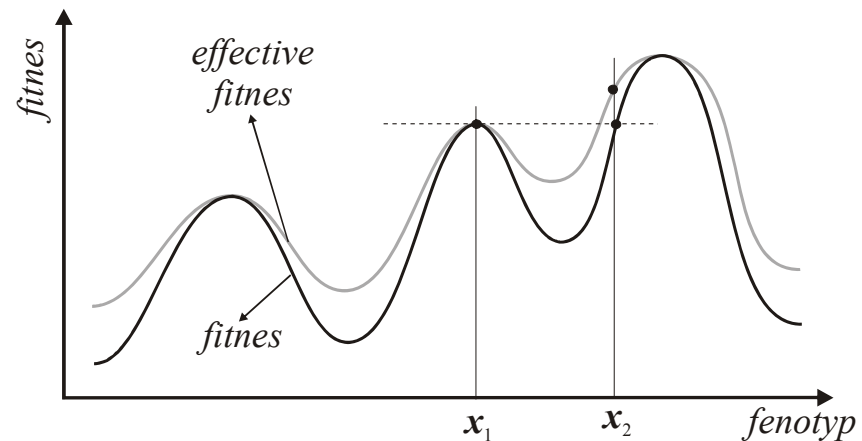
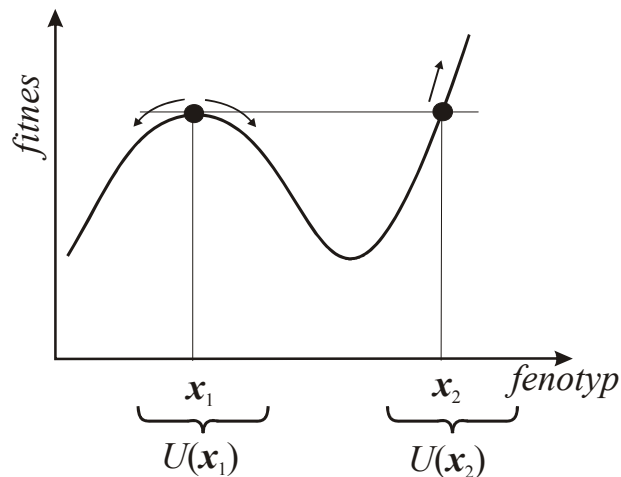
$$f(\mathbf{x}_{1,opt}) > f(\mathbf{x}_{2,opt})$$

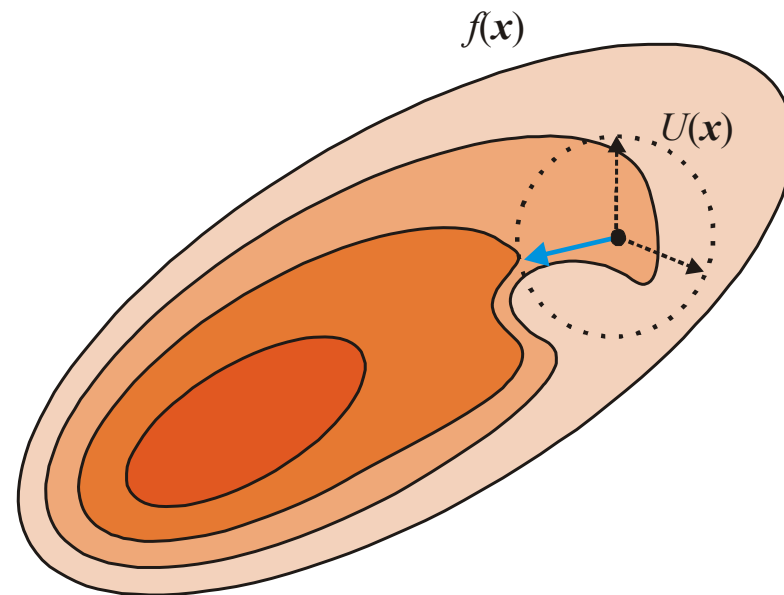
alebo pomocou **efektívnych fitness** $F(\mathbf{x}_1) = f(\mathbf{x}_{1,opt})$ a $F(\mathbf{x}_2) = f(\mathbf{x}_{2,opt})$ túto vlastnosť vyjadrím ako

$$F(\mathbf{x}) > f(\mathbf{x}).$$

Môžeme teda konštatovať, že *efektívne fitness* odráža vlastnosti fenotypu v jeho blízkom na povrchu funkcie fitness $f(\mathbf{x})$

1. $f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow F(x_1) = F(x_2)$, potom fenotypy \mathbf{x}_1 a \mathbf{x}_2 sú *efektívne rovnocenné*,
2. $f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow F(x_1) > F(x_2)$, potom fenotyp \mathbf{x}_1 je *efektívne lepší* ako fenotyp \mathbf{x}_2 .





- Hovoríme, že **učenie** nám pomáha nájsť lokálne nádejny smer (evolvabilitu) pre nasledujúcu evolúciu.
- V štandardnom prístupe Darwinovej evolúcie evolvabilita sa ponecháva výlučne na prírodný výber.
- Zapojenie Baldwinovho efektu do evolúcie môže slúžiť ako významný akceleračný faktor Darwinovej evolúcie.

Formulácia GA s učením

- Nech chromozóm $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \{0, 1, \#\}^n$ je lineárny reťazec dĺžky n , ktorý obsahuje symboly 0, 1 a #.

- Optimálny chromozóm \mathbf{x}_{opt} je náhodne generovaný binárny vektor dĺžky n

$$\mathbf{x}_{opt} = (x_1^{opt} x_2^{opt} \dots x_n^{opt}) \in \{0, 1\}^n$$

- *Populácia* P je multimnožina obsahujúca p chromozómov

$$P = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p\} \subseteq \{0, 1, \#\}^n$$

- Každý chromozóm $\mathbf{x} \in P$ je ohodnotený *fitness*. Tento ohodnocovací proces úzko súvisí s procesom učenia a je určený takto: Nech okolie chromozómu $\mathbf{x} \in P$ je

$$U(\mathbf{x}) = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_q\} \subseteq \{0,1\}^n$$

Toto okolie obsahuje q binárnych vektorov, ktoré sú náhodne vytvorené z chromozómu \mathbf{x} tak, že jeho „hash“ symboly sú náhodne nahradené 0 alebo 1

$$\mathbf{y} = (y_1 y_2 \dots y_n) \in \{0,1\}^n$$

$$y_i = \begin{cases} x_i & (\text{if } x_i = 0 \text{ or } x_i = 1) \\ \text{random}(2) & (\text{if } x_i = \#) \end{cases}$$

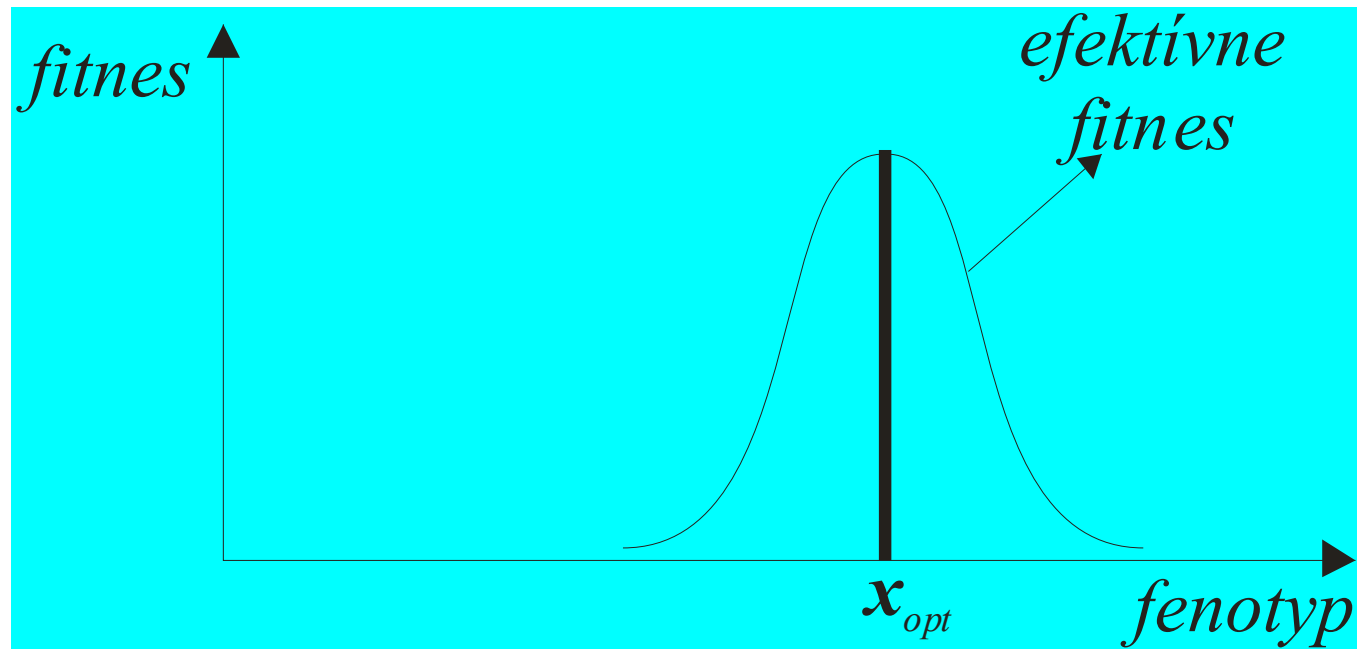
Kardinalita $q=|U(\mathbf{x})|$ sa nazýva *rozsah učenia*. Funkcia $d(\mathbf{x})$, pre $\mathbf{x} \in P$, je špecifikovaná ako minimálna vzdialenosť medzi optimálnym chromozómom \mathbf{x}_{opt} a binárnym vektorom z okolia $U(\mathbf{x})$

$$d(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{y} \in U(\mathbf{x})} |\mathbf{y} - \mathbf{x}_{opt}|$$

Fitnes chromozómu \mathbf{x} je určené formulou

$$f(\mathbf{x}) = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) e^{-\xi d(\mathbf{x})}$$

kde ξ je tzv. koeficient strmosti, ktorý špecifikuje „ostrosť“ fitness funkcie.



Priebeh efektívneho fitnes vzhľadom k fitnes, ktoré je nenulové len pre jeden konkrétny binárny chromozóm x_{opt} .

- Proces učenia (t. j. ohodnotenie chromozómov fitness) je špecifikované dvoma parametrami
 1. kardinalita q okolia $U(\mathbf{x})$ a
 2. parameter strmosti ξ .

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} f(\mathbf{x}) = \begin{cases} f_{max} & (\text{if } \mathbf{x} = \mathbf{x}_{opt}) \\ f_{min} & (\text{if } \mathbf{x} \neq \mathbf{x}_{opt}) \end{cases}$$
$$\lim_{\xi \rightarrow 0} f(\mathbf{x}) = f_{max}$$

Proces učenia môže byť interpretovaný ako prehľadávanie v blízkom okolí daného chromozómu, kde „hash“ symboly # sú náhodne nahradené binárnymi symbolmi 0 alebo 1.

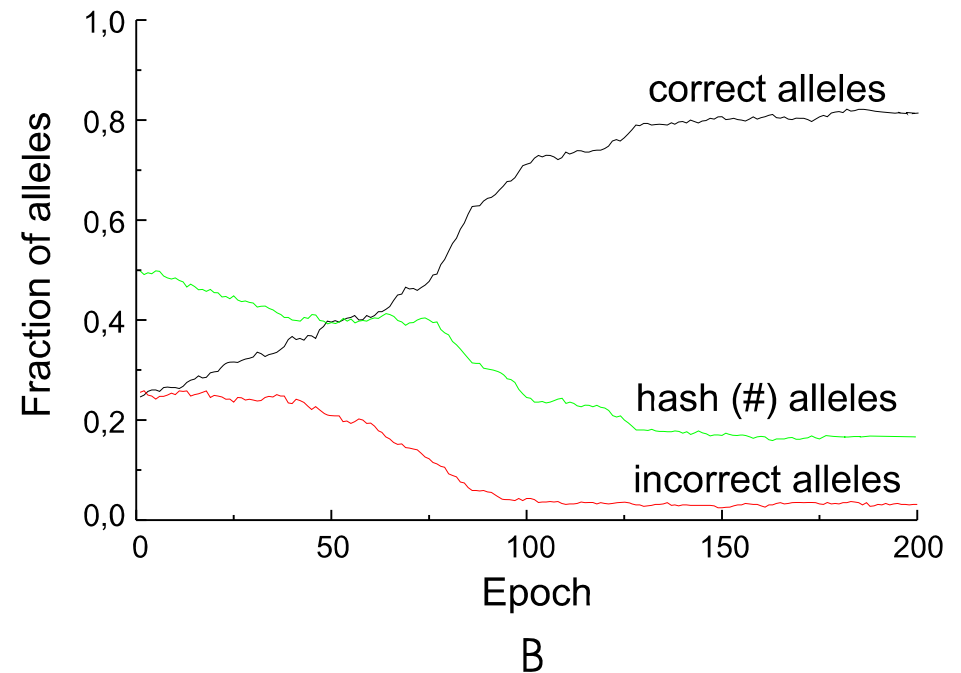
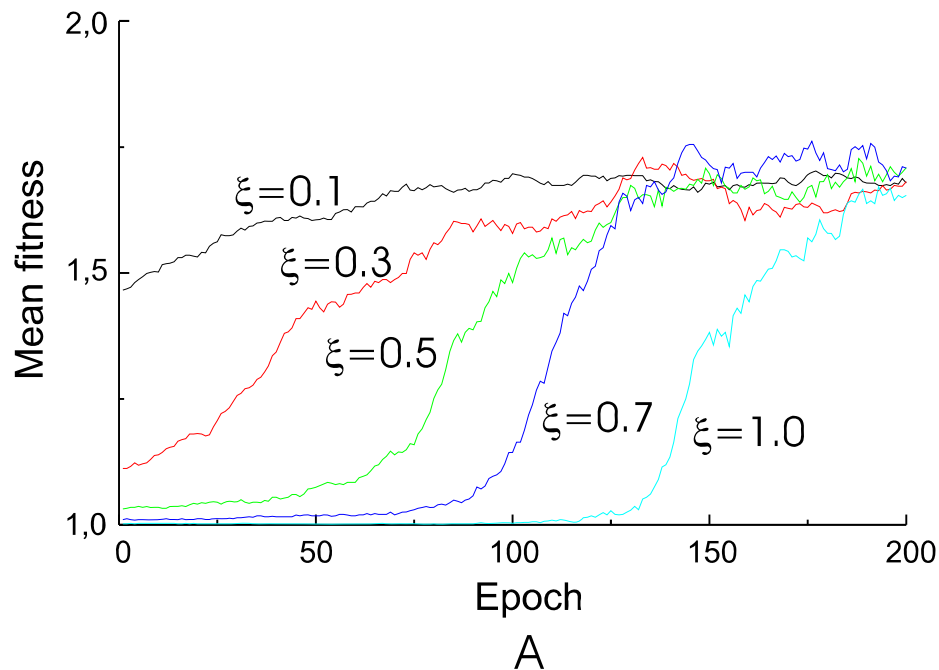
- Podľa Hintona a Nowlana študovaný problém môže byť charakterizovaný ako hľadanie ihly v kope sena; pretože existuje len jedno korektné riešenie v priestore 2^n riešení.
- Ak je do GA zahrnuté aj učenie, potom GA môže byť interpretovaný ako metóda prehľadávania, kde „niekto“ radí chromozómu v ktorom smere je ihla.
- Ak do GA nie je zahrnuté učenie, GA môže byť interpretované zhruba ako prehľadávacia metóda, kde nik neradí "chromozómu", ktorým smerom je ihla.

GA s učením má tieto parametre:

- (1) n , dĺžka chromozómu ($n=20$)
- (2) p , veľkosť populácie ($p=500$)
- (3) P_{cross} , pravdepodobnosť kríženia ($P_{cross}=0.1$)
- (4) P_{mut} , pravdepodobnosť mutácie ($P_{mut}=0.01$)
- (5) t_{max} , počet epoch ($t_{max}=200$)
- (6) q , veľkosť učenia ($q=10$)
- (7) ξ , parameter strmosti ($\xi=0.1$ a 1.0)
- (8) f_{max} , maximálna hodnota fitness ($f_{max}=2.0$)
- (9) f_{min} , minimálna hodnota fitness ($f_{min}=1.0$)
- (10) prvotná populácia je náhodne generovaná tak, že jej chromozómy obsahujú 50% symbolov #, 25% symbolov 0, and 25% symbolov 1.

V priebehu evolúcie s učením časť volne nastaviteľných allel v genotype sa určí tak, aby sa maximalizoval fitness organizmu, čo odráža zabudovanie kognitívnych aktivít do genotypu

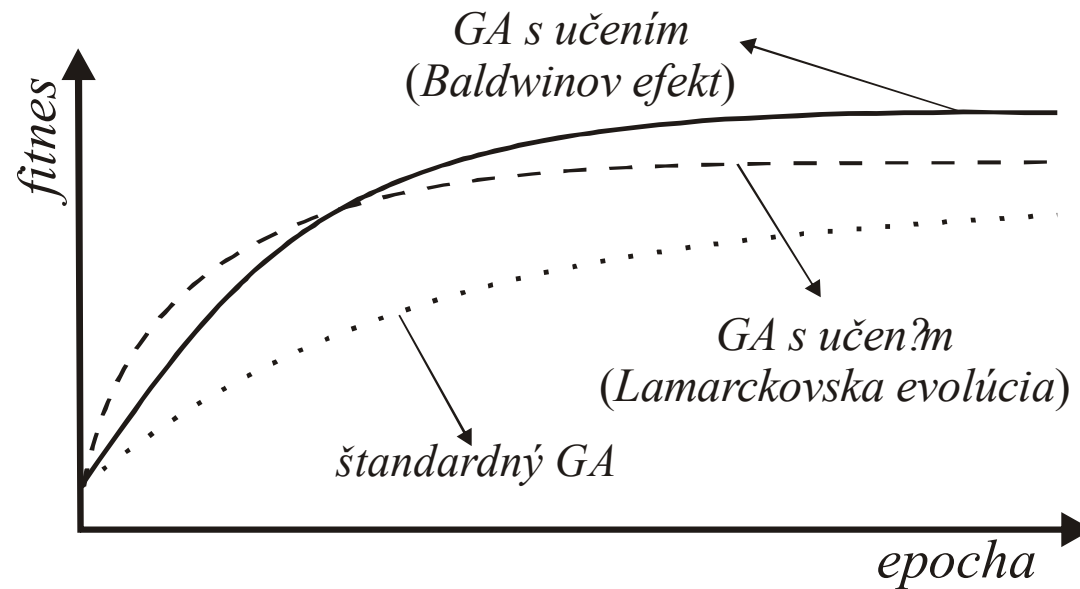
Zapojenie učenia pôsobí ako významný akceleračný faktor Darwinovej evolúcie



- (A) Päť rôznych priebehov fitness pre rôzne hodnoty parametrov strmosti, od podporovaného učenia ($\xi=0.1$) až po potlačené učenie ($\xi=1.0$).
- (B) Priebehy frakcií korektných allel, nekorektných allel a „hash“ allel (#) pre GA s parametrom strmosti $\xi=0.5$.

Dôsledky Baldwinovho efektu

- Pôsobí ako akceleračný faktor Darwinovej evolúcie
- Jednoduché kognitívne úlohy môžu byť pomocou Baldwinovho efektu kanalizované (geneticky zakódované) (vznik sociálneho hmyzu)
- Zložité kognitívne úlohy nemôžu byť pomocou Baldwinovho efektu kanalizované (dĺžka života nie je postačujúca k prejavaniu sa tohto efektu)



Priebeh fitness v genetickom algoritme, kde

- (1) selekcia chromozómov do reprodukcie je riadená pomocou efektívnej fitness (t. j. GA s Baldwinovým efektom),
- (2) selekcia chromozómov do reprodukcie je riadená pomocou obyčajnej fitness,
- (3) pri reprodukčnom procese chromozómy sú lokálne optimalizované (evolučný algoritmus s Lamarckovou evolúciou).

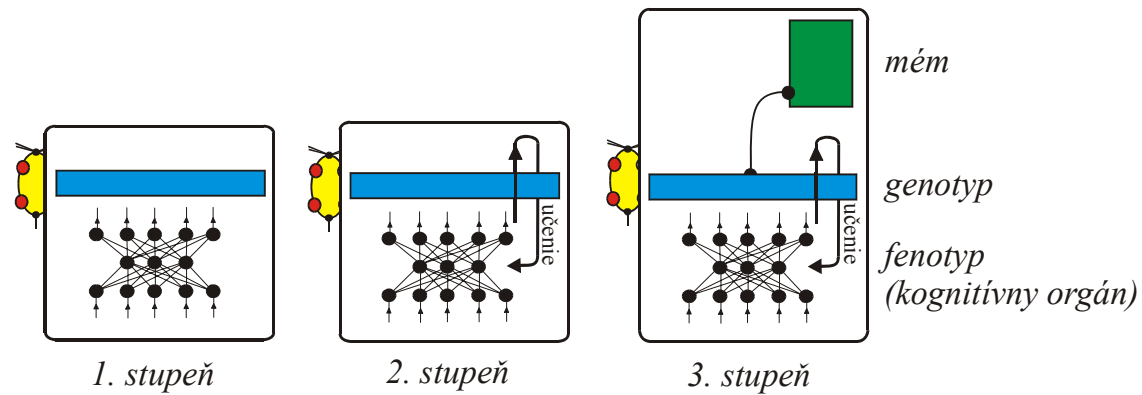
Memetika

Úloha mémov v evolúcii

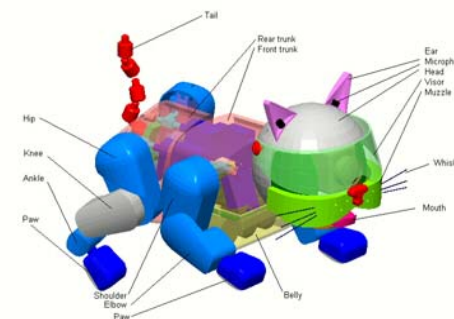
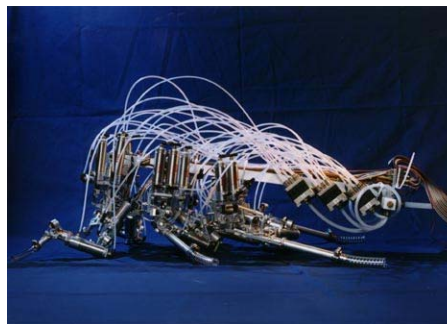
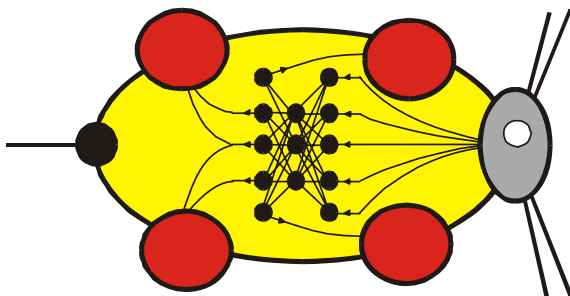
Tri stupne Darwinovej evolúcie:

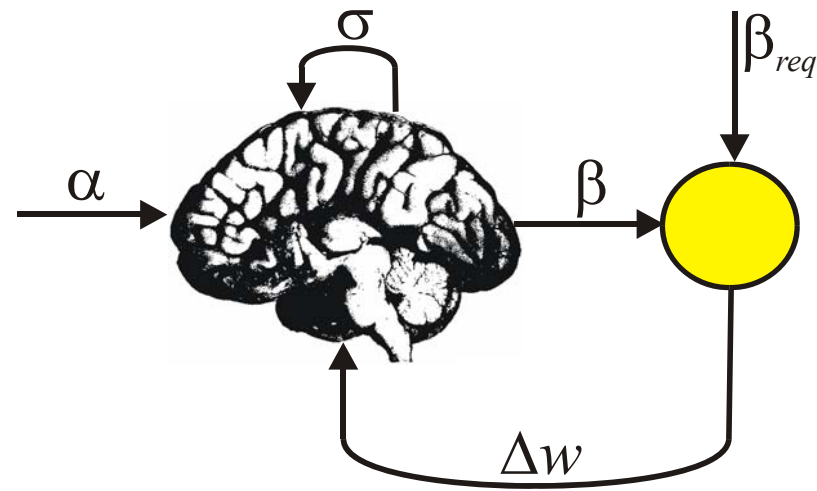
- 1. stupeň.** Fitnes genotypu agenta je určený *výlučne len jeho zložením*, žiadne iné efekty (učenie sa, mémy, ...) nie sú zahrnuté pri ohodnotení genotypu fitnessom.
- 2. stupeň.** Fitnes genotypu je určené nielen jeho štruktúrou, ale aj *schopnosťou organizmu učiť sa* (Baldwinov efekt). Elementárne kognitívne aktivity môžu byť zabudované (kanalizované) do genotypu organizmu (napr. pri vzniku sociálneho hmyzu).
- 3. stupeň.** Fitnes genotypu je určené nielen jeho štruktúrou a schopnosťou organizmu učiť sa, ale aj určitým *„informačným balíkom“ (mémom)*, ktorý podstatne ovplyvňuje fitness.

Znázornenie jednotlivých stupňov Darwinovej evolúcie



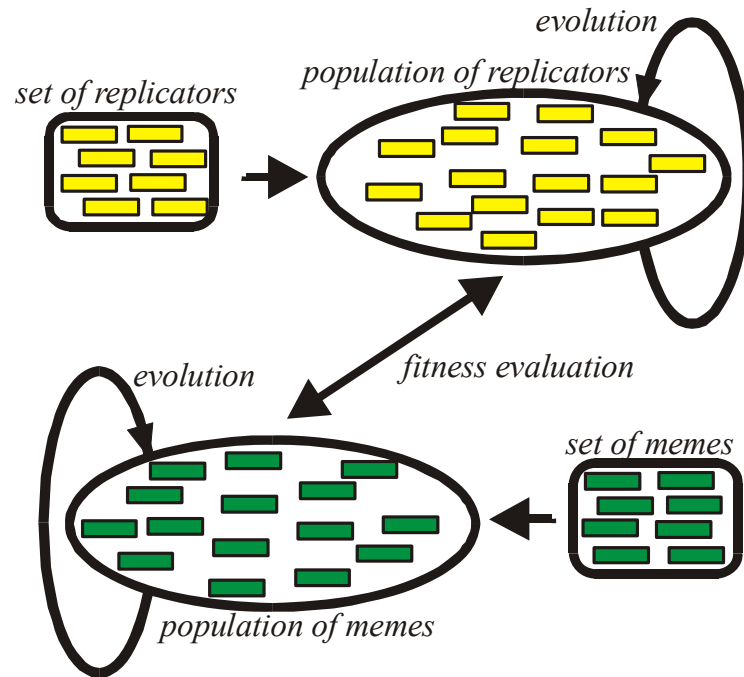
Organizmus s neurónovou sieťou



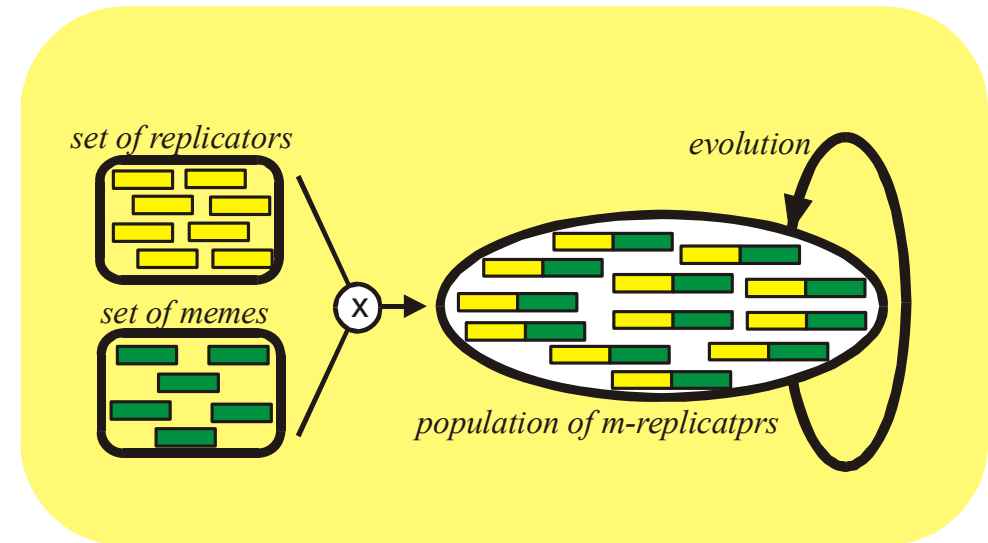


Učenie kognitívneho organu (mozgu) pomocou mému štruktúry $\alpha \Rightarrow \beta_{req}$. Premisa mému α je vstupom do kognitívneho orgánu, a nech jeho odozva na tento vstup je β . Požadovaný výstup β_{req} je porovnaný s vypočítaným výstupom β (úloha učiteľa / tútora), toto porovnanie vyústi v konštrukciu Δw , pomocou ktorého sa upraví kognitívny orgán tak, aby sa zmenšil rozdiel medzi vypočítaným β a požadovaným β_{req} . Vnútoraná (skrytá) premenná σ reprezentuje vnútorný stav mozgu, ktorý ovplyvňuje odozvu mozgu na daný vstup, $\beta = F(\alpha, \sigma; w)$ (odozva mozgu na dva rovnaké vstupy $\alpha_1 = \alpha_2$, avšak pre rôzne vnútorné stavy $\sigma_1 \neq \sigma_2$, môže byť diametrálne odlišná, $\beta_1 \neq \beta_2$).

Darwinova evolúcia s učením a negenetickým prenosom informácie - mémov (3. stupeň)

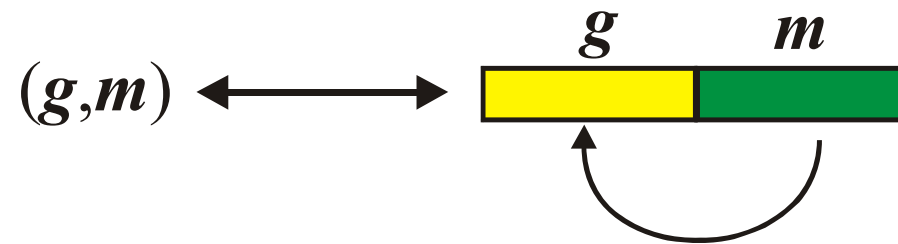


kompetitívna koevolúcia



kooperatívna koevolúcia

Kooperačný koevolučný model - populácia obsahuje *m-gény*
zložené z génu a mému



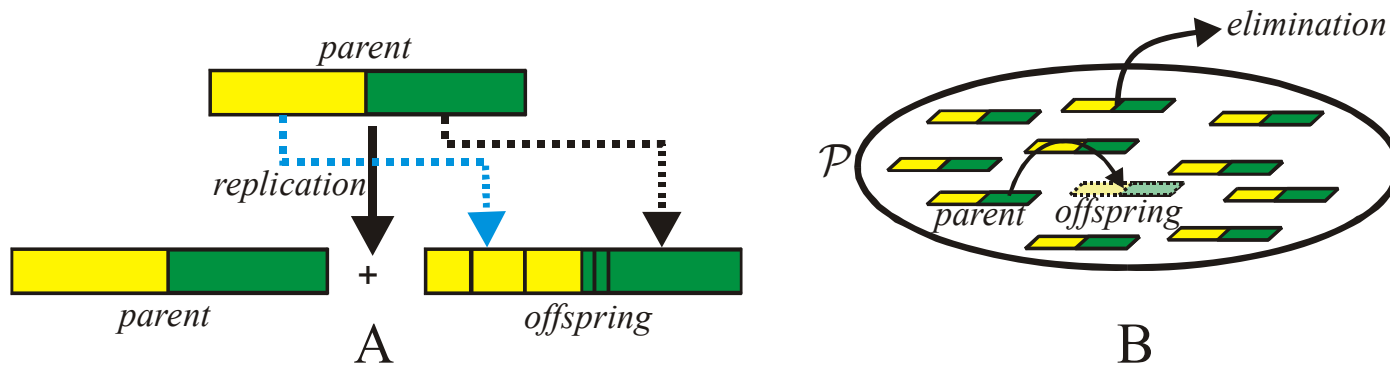
Mém reprezentuje dodatočnú informáciu o aktuálnom optimálnom riešení génu

Ako ďalej intenzifikovať GA s už zahrnutým učením (GA s Baldwinovým efektom)?

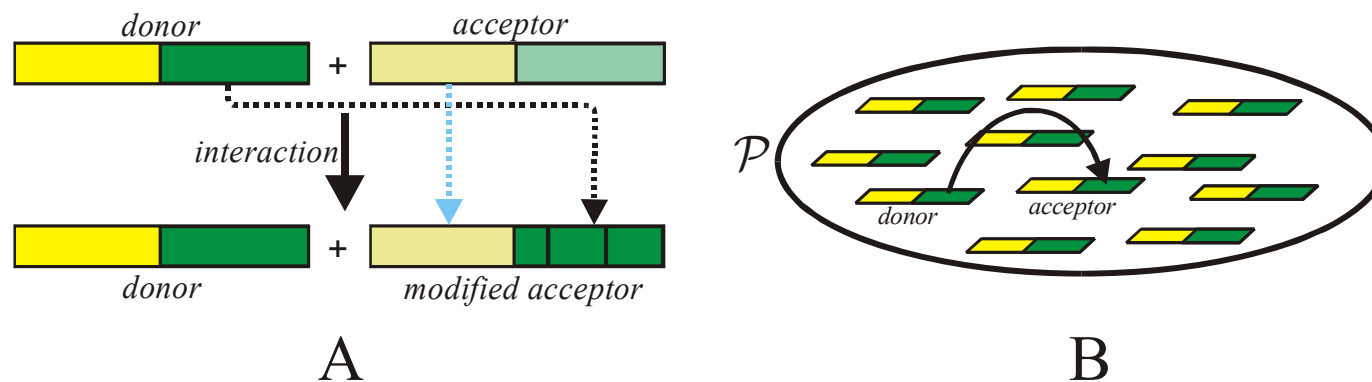
- Ďalšia možnosť je zahrnúť *memetický prístup* pôvodne navrhnutý v evolučnej biológii R. Dawkinsom (pozri jeho knihu *Sebecký gén*).
- Použijeme veľmi zjednodušený *model mémov*, ktorý môže byť jednoducho zahrnutý do GA s učením. Mémy budeme chápať ako lineárne reťazce (rovnakej dĺžky ako gény), ktoré spolu s génmi vytvárajú komplex nazývaný *m-chromozóm*.
- Mémy sú nositeľom informácie o najlepšom lokálnom riešení, ktoré bolo doposiaľ nájdené pomocou GA s učením.

- Využitie mémov je dôležité v procese ohodnotenia m-chromozómov *fitness*, ako ďalší zdroj informácie o aktuálnom najlepšom riešení. Na začiatku evolučného procesu sú mémy prázdne (majú nulový informačný obsah). V priebehu evolučného procesu mémy sa stávajú nositeľom informácie, ktorá sa šíri v populácii pomocou *mémentickej interakcie*.
- V *horizontálnej mémetickej interakcii* kvázináhone vybraný (s vysokým fitness) m-chromozóm - donor s príslušným mémom vytvára správu – mém, ktorá je *prenesená* do náhodne vybraného m-chromozómu – acceptoru, ktorý prijme túto správu a zahrnie ju do svojho m-chromozómu.
- Vo *vertikálnej mémetickej interakcii* v rámci reprodukčného procesu vytváraný potomkovia obsahujú mém od jedného zo svojich rodičov; budeme používať model, kde “matka” určuje mém svojho potomka (hovoríme, že matka vychováva potomka)

Vertikálny transfér mémov



Horizontálny transfér mémov



Model m -chromozómov

Mém je reťazec n symbolov 0, 1 a *

$$\mathbf{m} = (m_1 m_2 \dots m_n) \in \{0, 1, *\}^n$$

Šírka mému \mathbf{m} , označená $|\mathbf{m}|$, je určená počtom binárnych (nehviezdičkových) symbolov, napr. mém $\mathbf{m}=(01**01***)$ má šírku $|\mathbf{m}|=4$. Mém budeme používať ako pomocný nositeľ informácie získanej v rámci procesu učenia. Ak šírka mému je nulová, potom hovoríme, že mém neobsahuje vhodnú informáciu a jeho aplikácia v rámci evolučného procesu je bezpredmetná.

Mémetický chromozóm (*m -chromosome*) je určený ako usporiadaná dvojica chromozómu a mému o rovnakej dĺžke

$$\boldsymbol{\alpha} = (\mathbf{x}, \mathbf{m}) = ((x_1 x_2 \dots x_n), (m_1 m_2 \dots m_n)) \in \{0, 1, \#\}^n \times \{0, 1, *\}^n$$

Kde \mathbf{x} je chromozóm s časťami $\boldsymbol{\alpha}$ a \mathbf{m} . Populácia P je multimnožina obsahujúca p m -chromozómov

$$P = \{\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_p\} \subseteq \{0, 1, \#\}^n \times \{0, 1, *\}^n$$

Proces učenia v ktrom sú m-chromozómy ohodnotené fitness obsahuje dve etapy

Prvá etapa, mémetická časť m m-chromozómu α je použitá na opravu (modifikáciu) is used for a repair of the chromosome part x of α , chromosome hash symbols are substituted by meme nonstar symbols. In particular, let \hat{x} be a chromosome created from the chromosome part x by a repair process performed with respect to the meme part m

$$\hat{x} = (\hat{x}_1 \hat{x}_2 \dots \hat{x}_n) = O_{mod}(x; m)$$
$$\hat{x}_i = \begin{cases} x_i & (\text{if } x_i \neq \# \text{ or } m_i = *) \\ m_i & (\text{if } x_i = \# \text{ and } m_i \neq *) \end{cases}$$

For better understanding of this repair process let us consider an m-chromosome

$$\alpha = \left(\underbrace{00\#\#1\#0\#}_x \right) \left(\underbrace{11***0**}_m \right)$$

The repaired chromosome \hat{x} is determined as follows

$$\mathbf{x} = (0\ 0\ \#\ \#\ 1\ \#\ 0\ \#)$$

$$\mathbf{m} = (1\ 1\ * \ * \ * \ 0 \ * \ *)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = (0\ 0\ \#\ \#\ 1\ 0\ 0\ \#)$$

where in the sixth position the lower condition in (18b) is satisfied, i.e. hash symbol # is substituted by 0.

Druhá etapa. Modifikovaný chromozóm \hat{x} je použitý ako referenčný chromozóm pre konštrukciu okolia

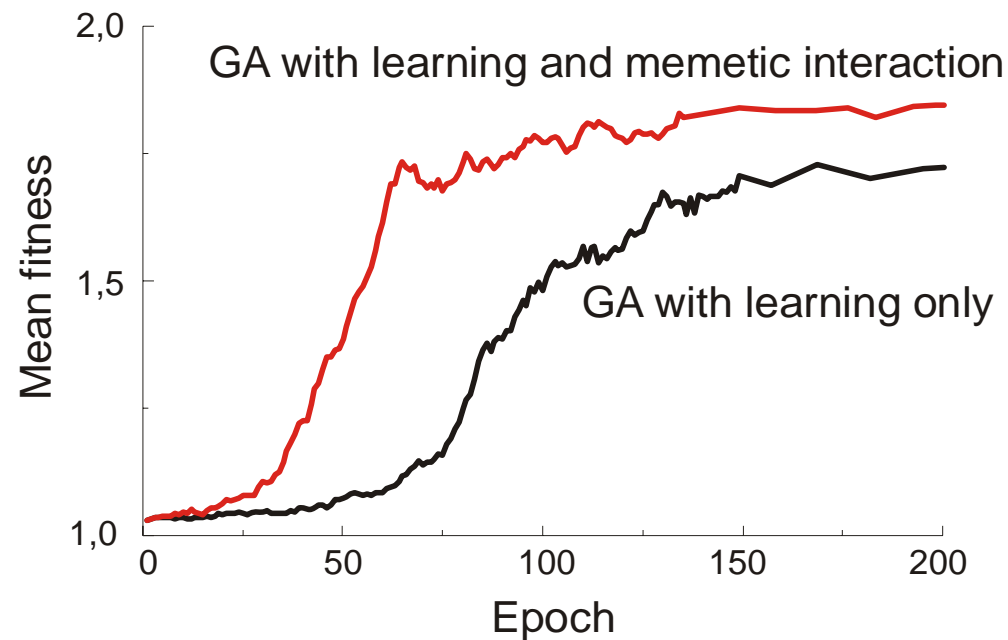
$$U(\hat{x}) = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_q\} \subseteq \{0,1\}^n$$

Kde binárne vektory \hat{y}_i sú vytvorené z modifikovaného chromozómu \hat{x} tak, že symboly # sú náhodne nahradené 0 alebo 1. Určíme minimálnu vzdialenosť okolia od optimálneho chromozómu x_{opt}

$$\hat{d}_{min} = \min_{\hat{y} \in U(\hat{x})} (\hat{y} - x_{opt})$$

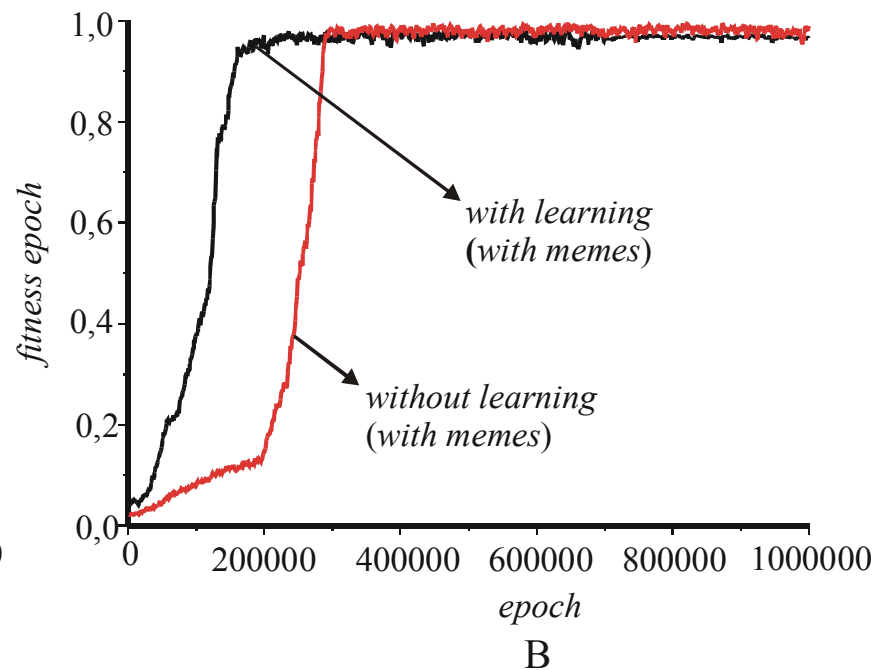
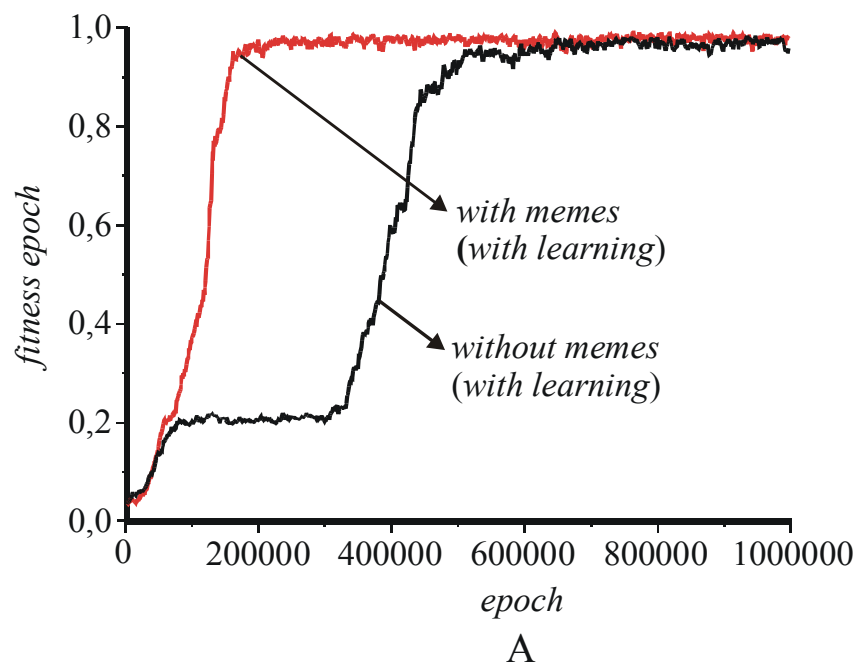
Fitnes priradené m-chromosome α je určené formulou

$$f(\alpha) = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) e^{-\xi \hat{d}_{min}}$$



Plot of mean fitness for two different versions of GA with and without a memetic interaction when learning is included in both versions. Both calculations were done for slope parameter $\xi=0.5$. We see that GA with learning and memetic information outperforms GA with learning only.

Simulácie v rámci modelu Hintona a Nowlana rozšíreného o mémy



Ilustračné numerické výsledky

Získali sme nasledujúcu postupnosť GA:

- (a) Štandardný GA, fitness je určené len štruktúrou chromozómu,
- (b) GA s učením (Baldwinov efekt), fitness chromozómu je určené prehl'adávaním okolia daného chromozómu (tento process sa nazýva učenie),
- (c) GA s učením a mémami (Baldwinov efekt plus mémy).

Zahrnutie mémov do GA s učením podstatne zvyšuje efektívnosť. Vo všeobecnosti môžeme konstatovať, že zahrnutie mémov do GA podstatne zvyšuje efektívnosť evolučného algoritmu. Môžeme povedať, že mémy do určitej miery substituujú proces učenia. Ak je proces učenia “drahý”, potom prístup mémov je dôležitý factor prekonania barier učenia.

Závery

1. Zahrnutie učenia (Baldinovo efektu) a Dawkinových mémov do GA je významný intenzifikačným faktorom genetických algoritmov.
2. Pomocou memetiky môžeme interpretovať význam kultúry v multiagentových systémoch ako významného faktora akcelerácie evolúcie pomocou medzigeneračného prenosu poznatkov (význam kultúrnej alebo spoločnej pamäti) v sociálnych vedách.



The End

Zlatá baňa Serra Pelada, Brazília