

Umelá evolúcia

Vladimír Kvasnička

Katedra matematiky CHTF STU, Bratislava

email: kvasnic@cvt.stuba.sk



Abstrakt

V práci sú formulované základné princípy umelej evolúcie, ktorá je založená na Darwinovej evolúcii aplikovanej k umelým multiagentívnym systémom. Agent je umelý systém (napr. stroj alebo program), ktorý je umiestnený v prostredí v ktorom vykonáva určité aktivity. Vyššie druhy agentov majú kognitívny orgán, pomocou ktorého vykonávajú kognitívne aktivity (menovite učenie) s cieľom lepšie a efektívnejšie vykonávať požadované činnosti a orientovať sa v prostredí. Týmto sa dostávame do oblasti platnosti Baldwinovho efektu, pomocou ktorého sa prirodzeným spôsobom vysvetľuje význam učenia pre evolúciu. Pre zložitejšie evolučné ciele (napr. koordinovaná komunikácia alebo komplexné sociálne vzťahy), existencia kognitívneho orgánu ešte nie je dostačujúca pre ich emergenciu v priebehu evolúcie. V dôsledku neexistencie dedičných mechanizmov prenosu dôležitých informácií z rodičov na potomkov, štandardná forma Darwinovej evolúcie (aj rozšírená o Baldwinov efekt) nie je schopná dosiahnuť zložitejšie evolučné ciele. Z týchto dôvodov sa Darwinova evolúcia rozširuje o pojem mému, ktorý bol zavedený do evolučnej biológie Dawkinsom v jeho slávnej knihe *The Selfish Gene*. Mém je voľne viazaný na chromozóm a obsahuje „kultúrne dedičstvo“ prevzaté potomkom od rodičov. Do reprodukčného procesu sú zapojené nielen chromozómy ale aj mémy, t.j. mémy potomkov sú vytvárané z mémov rodičov aplikovaním operátorov kríženia a mutácie. Naviac, na rozdiel od štandardných chromozómov, mémy sa môžu „voľne“ v populácii, tak napr. mém silnejšieho agenta preskočí na slabšieho agenta a čiastočne nahradí jeho mém.

V umelej evolúcii rozlišujeme tri etapy rozvoja zložitosti: (1) V prvej etape fitness chromozómov je určená len ich zložením. Táto etapa umelej evolúcie môže byť priradená štandardným evolučným algoritmom, kde chromozómy sú priamo zobrazované na fitness – kladné reálne čísla. (2) V druhej etape do ohodnotenia chromozómov fitness sú zapojené aj procesy učenia pomocou kognitívneho orgánu. Táto modifikácia evolúcie je reprezentovaná zapojením Baldwinovho efektu ako akcelerácie evolúcie. (3) V tretej etape fitness chromozómov je určená nielen pomocou procesu učenia ale aj tzv. mémom, ktorý obsahuje informáciu zvyšujúcu fitness agentov. Chromozóm je rozšírený na komplex chromozómu a mému, oba určujú fitness chromozómu na povrchu fitness. Všetky tri etapy umelej evolúcie môžu byť chápané ako evolučné etapy samotnej Darwinovej evolúcie.

1. Úvod

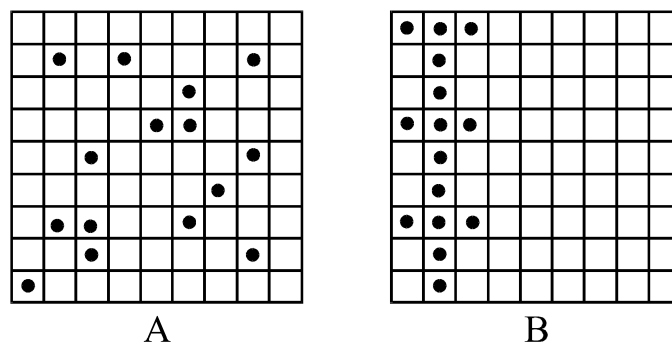
Cieľom tejto práce je poskytnúť pohľad informatika (zaoberajúceho sa neurónovými sieťami a evolučnými algoritmi) na Darwinovu evolúciu [1,2]. Prečo práve informatici sa zaujímajú o tak zdanlivo odľahitú biologickú disciplínu, akou je Darwinova evolúcia? Súčasná informatika je príznačná tým, že hľadá inšpiráciu v živej prírode. Tak napríklad, búrlivo sa rozvíjajúca *teória umelých neurónových sietí* [3], ktorá patrí medzi aktuálne oblasti umelej inteligencie, bola vytvorená ako „informatická reflexia“ metafory ľudského mozgu.

Podobne, *evolučné algoritmy* [4], aktuálna oblasť informatiky zaoberajúca sa strojovým učením a optimalizačnými metódami, je algoritmizácia a formalizácia procesov prebiehajúcich v Darwinovej evolúcii. Spojenie neurónových sietí s evolučnými algoritmi poskytl súčasnej informatike efektívny nástroj na štúdium procesov patriacich do oblasti umelého života [5] a kognitívnych vied [6]. Študuje sa emergencia rôznych kognitívnych a sociálnych fenoménov v populáciách agentov [7]. Agenti v týchto simuláciách sú vybavení tzv. kognitívnym orgánom (obvykle implementovanom neurónovou sieťou), ktorý je schopný realizovať kognitívne aktivity typu učenia, rekognoskácie, atď. Hnacou silou evolúcie týchto systémov je umelá evolúcia, ktorá je informatickou reflexiou Darwinovej evolúcie. Týmto spôsobom dostávame vlastne formalizovanú Darwinovu evolúciu, ktorú v tejto práci budeme nazývať *umelá evolúcia* (informatika má tiež už *umelú inteligenciu a umelý život*). Umelá evolúcia môže byť chápaná ako aplikácia metafory Darwinovej evolúcie k multiagentovým systémom. Je zbavená od „balastu“ materiálnej realizácie prírodnej evolúcie prebiehajúcej v živej prírode, uvažujeme len fundamentálne procesy ignorujúc ich materiálnu realizáciu. Jednoduchosťou a transparentnosťou základných pojmov a argumentačného aparátu poskytuje možnosť „kvalifikovane“ a „jednoznačne“ formulovať a študovať problémy súvisiace s evolúciou nielen multiagentových (umelých) systémov, ale aj biologických (živých) systémov.

Táto práca vznikla zovšeobecnením našich prác [8-11] venovaných počítačovým simuláciám multiagentových systémov pre šírenie mémov, úlohe Baldwinovho efektu a emergencii koordinovanej komunikácie .

2. Adaptívna zložitosť

Zložitosť (complexity) je štatistický pojem. Zložitá vec je štatisticky nepravdepodobná, má veľmi malú pravdepodobnosť existencie. Počet rôznych spôsobov usporiadania 10^{27} atómov ľudského tela je enormne veľký. Z týchto možných všetkých spôsobov len niekoľko málo spôsobov odpovedá ľudskému telu. *Adaptívna zložitosť* je taká zložitosť, ktorá je adaptívna k zmene prostredia. Tak napr. mikroelektronický čip, aj keď má enormnú zložitosť nie je adaptívny, pretože sa nedokáže adaptovať na zmenené prostredie, t.j. čip nie je adaptívna zložitosť. Na druhej strane, jednoduchý organizmus, napr. baktéria je adaptívna zložitosť, pretože vykazuje tak znaky zložitosti, ako aj adaptivity na zmenu prostredia. Existencia adaptívnej zložitosti je *hlavným kritériom existencie života*. Ak na nejakej planéte nájdeme nejaké hmotné štruktúry, ktoré môžeme klasifikovať ako adaptívnu zložitosť, potom môžeme deklarovvať, že na planéte existuje život. Cieľom každej evolučnej teórie je vysvetliť vznik adaptívnej zložitosti, t.j. experimentálny fakt, ktorí niektorí pokladajú za dôkaz existencie Tvorcu.



Obrázok 1. Dva ilustračné príklady zložitostí rôzneho typu. Diagram A znázorňuje náhodne rozmiestnené body na mriežke, diagram B znázorňuje body umiestené do tvaru trojkriža.

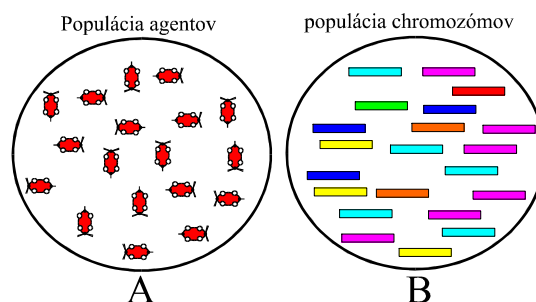
Budeme študovať jednoduchý ilustračný príklad zložitosti pomocou 15 objektov, ktoré sú rozmiestnené na mriežke 9×9, pozri obr. 1. Diagram A nám znázorňuje typické náhodné rozmiestnenie objektov na mriežke, môžeme konštatovať, že pravdepodobnosť vzniku podobného "chaotického" rozmiestnenia je skoro jednotková, $p_A=1-\varepsilon$, kde ε je malé kladné číslo. Potom pravdepodobnosť vzniku rozmiestnenia B (alebo podobného posunom alebo rotáciou) bude $p_B=\varepsilon$. Informačný obsah nejakého obrazca, ktorý vzniká s pravdepodobnosťou p je definovaný vzťahom $I = -\ln_2 p$. Potom informačný obsah našich obrazcov A a B má tieto hodnoty

$$I_A = -\ln_2(1-\varepsilon), \quad I_B = -\ln_2 \varepsilon \quad (1a)$$

Pre jednoduchosť odhadneme len asymptotické hodnoty týchto informačných obsahov pre malé kladné ε , dostaneme

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0_+} I_A = 0, \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0_+} I_B \rightarrow \infty \quad (1b)$$

To znamená, že v súhlase s našim očakávaním, obrazec A má nulový informačný obsah, zatiaľ čo obrazec B má skoro nekonečný informačný obsah. K lepšiemu pochopeniu tohto výsledku, predstavme si nasledujúcu situáciu: Prechádzame sa po morskom pobreží na neznámom ostrove a nájdeme obrazec A, na ktorom sú objekty - kamene náhodne rozmiestnené. Na základe našich predchádzajúcich úvah vieme, že tento obrazec má nulový informačný obsah, nedáva nám žiadnu správu o svojom tvorcovi. Naopak, ak by sme na morskom pobreží našli obrazec B, na ktorom kamene sú umiestnené pravidelne do tvaru trojkríža, získali sme správu o veľkom informačnom obsahu, vieme skoro so 100% istotou, že na ostrove musí existovať jeho tvorca.



Obrázok 2. Dva rôzne prístupy k prezentácii populácie agentov P . V prvom prístupe (A) agenti sú reprezentovaní fentypom organizmov, t.j. priamo organizmami samotnými. V druhom prístupe (B) sú agenti reprezentovaní genotypom agentov, t.j. chromozómami, ktoré určujú informačný obsah agentov.

3. Darwinova evolúcia [1,2]

Predmetom štúdia tejto kapitoly je populácia agentov, pozri obr. 2. Pod pojmom "agent" budeme v celej tejto publikácii rozumieť jedinca, zariadenie, program, atď. ("adaptívnu zložitost"), ktorý je schopný vykonávať elementárne činnosti v danom prostredí a ktorý vyhovuje nasledujúcim trom *nutným* podmienkam darvinovskej evolúcie:

- (1) *Reprodukčnosť*, agenti sú schopní reprodukcie – množenia. Vybraní agenti – rodičia vstupujú do reprodukčného procesu, ktorého výsledkom je jeden alebo viac agentov – potomkov.
- (2) *Variabilnosť*, agenti v populácii sa môžu v určitom rozsahu odlišovať, populácia agentov nie je striktno homogénna.

- (3) *Dedičnosť*, agenti obsahujú genetickú informáciu (*genotyp*), ktorá je reprezentovaná *chromozómom*, ktorý obsahuje v zakódovanom tvare informáciu o ich zložení a vlastnostiach (*fenotyp*). Genetická informácia sa dedí z rodiča na potomka. Prenos genetickej informácie z rodiča na potomka v reprodukčnom procese nie je úplne presný, dochádza k jej malej náhodnej zmene – mutácii, týmto spôsobom sa realizuje podmienka variabilnosti agentov.

Všetky tieto tri podmienky sú nutného charakteru, ak sa aspoň jedna nevyskytuje, tak potom nemôžeme hovoriť o existencii darvinovskej evolúcie v populácii. Teraz sa môžeme vrátiť ešte raz k všeobecnej špecifikácii agenta. Jeho architektúra a vlastnosti musia byť také, aby vyššie uvedené tri podmienky boli realizovateľné. Ak tieto podmienky sú splnené, tak potom hovoríme o *darwinovských agentoch*. Materiálna realizácia týchto vlastností je pre naše ďalšie úvahy irelevantná.

Bennett vo svojej inšpirujúcej knihe *Darwin's Dangerous Idea* [23] klasifikuje darvinovskú evolúciu ako algoritmus. Týmto označením darvinovskej evolúcie chce naznačiť je univerzálnosť, nezávislosť od prostredia a materiálnej realizácie biologických jedincov, ktorí sú jej predmetom. Táto univerzálnosť darvinovskej evolúcie našla svoju najvšeobecnejšiu reprezentáciu vo formulácii tzv. evolučných algoritmov, ako najvšeobecnejšej abstrakcie evolúcie založenej na prírodnom výbere.

2.1 Embryogenéza

Niekoľko poznámok k problémom reprodukcie a dedičnosti, ktorých významnou časťou je tzv. embryogenéza, čo je spôsob vzniku a vývoja nových jedincov zo zárodokov. Budeme rozlišovať dva druhy embryogenézy:

- (1) *Epigenetická embryogenéza*, kde nový organizmus vzniká delením jednej "zárodočnej" bunky, tento druh embryogenézy sa vyskytuje na našej planéte pri reprodukcii biologických systémov. Môže byť zjednodušene chápaná ako *recept* na prípravu koláča, kde je uvedené nielen to čo koláč obsahuje ale aj jeho príprava.
- (2) *Preformačná embryogenéza*, kde nový organizmus je reprezentovaný zárodkom, ktorý obsahuje všetky detaily dospelého organizmu. tento typ embryogenézy môžeme formálne prirovnať k plánu budovy alebo stroja, kde sú podrobne uvedené všetky detaily. Existencia tohto druhu embryogenézy je pre nás hypotetická, na našej planéte sa nevyskytuje. Snáď v budúcnosti sa preformačná embryogenéza bude vyskytovať aj na našej planéte v súvislosti s reprodukciiou umelých robotických systémov.

Pre evolúciu je primárne dôležitá tzv. *reverzibilita embryogenézy*, t.j. vzťah medzi genotypom a fenotypom, $\text{genotyp} \rightleftharpoons \text{fenotyp}$. Formálne povedané, či sa genotyp jednoznačne zobrazuje na fenotyp a naopak (t.j. či z fenotypu vieme dekódovať genotyp organizmu). Tento vzťah medzi genotypom a fenotypom je veľmi dôležitý pre diskusii takej evolúcie, ktorá umožňuje prenos získaných vlastností na potomkov (lamarckovská evolúcia). Preformačná embryogenéza umožňuje prenos získaných vlastností do genotypu, pretože vzťah medzi genotypom a fenotypom je jedno-jedno-značný. Táto reverzibilita neexistuje pre epigenetickú embryogenézu. Ak použijeme metaforu receptu koláča, potom zo štruktúry koláča sa nám nepodarí jednoznačne zostrojiť recept podľa ktorého bol vytvorený. Z tohoto dôvodu lamarckovská evolúcia (dedenie získaných vlastností) nemôže existovať na našej planéte, kde živé systémy používajú výhradne len epigenetickú embryogenézu. Niekde vo vesmíre môžu existovať živé systémy, ktorí využívajú preformačnú embryogenézu, potom je

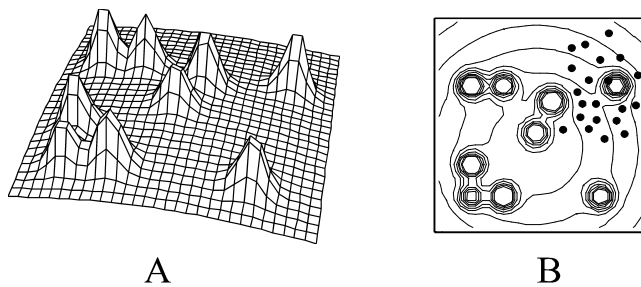
možné, že medzi týmito živými systémami prebieha lamarckovská evolúcia založená na prenose získaných vlastností z rodiča na potomkov.

3.2 Darwinov prirodzený výber, fitness

Biologická evolúcia je progresívna zmena genetickej informácie agentov populácie, ktorej výsledkom je vznik adaptívnej zložitosti..

Základnou hnacou silou evolúcie je *Darwinov prirodzený výber*, čo je proces v ktorom „silnejší“ agenti (s väčšou fitness) vstupujú častejšie do reprodukčného procesu a majú viac potomkov v nasledujúcej generácii ako „slabší“ agenti.

V prirodzenom výbere má dominantné postavenie pojem *fitness* agentov, ktorá je definovaná ako relatívna schopnosť prežitia a reprodukovania sa v danom *prostredí* a v danej *populácii*. Fitness je chápaná ako atribút genotypu. Potomkovia rodičov s väčšou fitness budú viac početnejší a "silnejší" ako potomkovia "slabších" rodičov. *Povrch fitness* [12] (fitness landscape) (pozri obr. 2) je jednoduchý heuristický prístup ako vizualizovať proces evolúcie populácie agentov. Evolúcia populácie môže byť pomocou tohto obrázku interpretovaná ako pohyb populácie smerom k vrcholu s najväčšou fitness. V dôsledku existencie mutácií, tento pohyb populácie na povrchu fitness má stochastický charakter. V tejto súvislosti sa zdôrazňuje, že práve vďaka mutáciám, agenti populácie majú šancu „preskúmať“ väčšiu oblasť na povrchu fitness a tak potenciálne dosiahnuť v procese evolúcie globálne maximum na povrchu fitness. To znamená, že evolučný proces môžeme charakterizovať ako *optimalizačný proces*. Cieľom agentov je optimálna adaptácia v danom prostredí. Vlastnosti povrchu fitness (jej extrémna multimodálnosť) určujú ako ťažko sa požadované optimálne riešenie nájde „prirodzeným“ evolučným procesom.



Obrázok 2. Znázornenie povrchu fitness (A), ktorý vyjadruje závislosť fitness agentov od zloženia ich genotypu. V tomto jednoduchom modelovom prípade sa jedná o organizmus, ktorý má dvoj-génový chromozóm, pričom jeho zložky sú reálne čísla. Kontúrový graf (B) je priradený povrchu fitness, oblak bodov znázorňuje populáciu agentov.

Po tomto úvode o základných elementoch Darwinovej evolučnej teórie, pristúpime k jej formalizácii [4]. Agent populácie je reprezentovaný *chromozómom* x , jeho štruktúru budeme špecifikovať neskoršie. Budeme predpokladať, že v chromozóme je obsiahnutá úplná informácia o architektúre a vlastnostiach agenta. *Populácia* agentov je multimnožina¹ chromozómov (pozri obr. 1)

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \quad (1)$$

¹ Multimnožina je zovšeobecnenie pojmu množiny, v ktorej prvky sa môžu vyskytovať viackrát.

Každý chromozóm populácie je ohodnotený zobrazením - fitness F , ktorá priradí chromozómu kladné reálne číslo (pozri obr. 3)

$$F : P \rightarrow R_+ \quad (2)$$

Predpokladajme, že medzi agentami existuje párový reprodukčný proces, t.j. podieľajú sa na ňom dvaja agenti – rodičia, ktorí sú kvázináhodne vybraní z populácie v závislosti na ich fitness (silnejší agenti majú väčšiu pravdepodobnosť byť vybraní do reprodukcie) a ktorí produkujú potomkov (deti). Reprodukčný proces má tieto tri zložky

- (1) *selekcía* rodičov,
- (2) *reprodukcia* rodičov, pričom vznikajú potomkovia, a
- (3) *návrat* potomkov do populácie.

V prvom kroku reprodukcie sa vyberú pomocou stochastického operátora O_{select} z populácie P dvaja agenti x_1^{old} a x_2^{old} tak, že pravdepodobnosť ich výberu je úmerná ich fitness.

$$x_1^{old} = O_{select}(P), \quad x_2^{old} = O_{select}(P) \quad (3a)$$

V druhom kroku, použitím stochastického operátora reprodukcie O_{repro} z rodičov dostaneme potomkov x_1^{new} a x_2^{new} .

$$(x_1^{new}, x_2^{new}) = O_{repro}(x_1^{old}, x_2^{old}) \quad (3b)$$

Ako už bolo povedané v kap. 2.1 intergrálnou časťou reprodukčného procesu je epigenetická embryogenéza, ktorá neumožňuje prenos získaných vlastností z rodičov na potomkov. V treťom kroku, potomkovia sa vracajú do populácie: Stratégia tohto návratu môže byť riešená rôznymi spôsobmi, jedna z najjednoduchších stratégií je taká, že potomkovia nahradia v populácii všetky chromozómy (tzv. stratégia neprekrývajúcich sa generácií). Pseudopascalovský kód takto určenej Darwinovej evolúcie je daný Algoritmom 1 (pripomeňme si Bennetovu myšlienku, že darwinova evolúcia je algoritmus, ktorou chcel zdôrazniť je univerzálnosť, nezávislý od materiálnej realizácie agentov - živých szstémov).

```

P:=náhodne vygenerovaná populácia
  chromozómov;
t:=0;
while t<tmax do
begin t:=t+1;
  Q:=∅;
  while |Q|<|P| do
  begin x1:=Oselect(P);
        x2:=Oselect(P);
        (x1', x2'):=Orepro(x1, x2);
        Q:=Q∪{x1', x2'};
  end;
  P:=Q;
end;

```

Algoritmus 1. Pseudopascalovský kód Darwinovej evolúcie. Algoritmus je inicializovaný náhodnou generáciou populácie P . Evolúcia populácie je obsiahnutá vo vnútri while-cyklu, ktorý sa opakuje t_{max} -krát. V rámci jednej epochy sa vytvorí nová populácia Q , ktorá nahradí pôvodnú populáciu P .

Poznamenajme, že existujú aj iné procesy reprodukcie ako ten, ktorý bol práve popísaný (nazývaný sexuálna reprodukcia, kde na tvorbe potomkov sa podieľajú dvaja agenti – rodičia). V asexuálnej reprodukcii, na tvorbe potomkov sa podieľa len jeden agent – rodič.

Formálne, tento proces môžeme vyjadriť takto

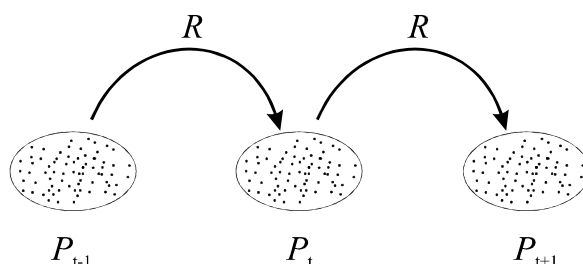
$$\mathbf{x}^{old} = O_{select}(P) \text{ a } \mathbf{x}^{new} = O_{repro}(\mathbf{x}^{old}) \quad (4)$$

V prvom kroku je kvázináhodne vybraný rodič, v druhom aplikáciou stochastického operátora reprodukcie O_{repro} sa z agenta - rodiča vytvorí agent – potomok. Podobne ako v predchádzajúcej párovej reprodukcii, v treťom kroku sa rieši problém návratu potomka do populácie. V nasledujúcej časti tejto kapitoly si ukážeme, za akých podmienok je potrebné uvažovať reprodukčný proces s účasťou dvoch rodičov alebo len jedného rodiča.

Darwinova evolúcia môže byť interpretovaná ako *rekurentný proces*, v ktorom nasledujúca populácia je vytvorená reprodukciou predchádzajúcej populácie (pozri obr. 3)

$$P_{t+1} = R(P_t) \quad (5)$$

Funkcia R kvázináhodne (vzhľadom k fitness agentov) priradí k populácii P_t nasledujúcu populáciu P_{t+1} .



Obrázok 3. Schematické znázornenie rekurzívnosti Darwinovej evolúcie, nová populácia sa vytvára z predchádzajúcej populácie aplikáciou stochastického operátora reprodukcie R .

3.3 Štruktúra chromozómu

Vyššie uvedený jednoduchý prístup k formalizácii Darwinovej evolúcie zatiaľ nešpecifikoval štruktúru chromozómu, t.j. informačnú entitu – genotyp, ktorý kóduje fenotyp agenta, t.j. jeho architektúru a vlastnosti. V nasledujúcej časti tejto kapitoly budeme špecifikovať chromozóm ako *lineárny reťazec znakov*. Vychádzajúc z tejto jednoduchšej špecifikácii chromozómu, pristúpime k jednoduchému popisu procesu reprodukcie pomocou kríženia a mutácie chromozómov.

Nech *chromozóm* \mathbf{x} je reťazec znakov dĺžky k

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k) \in \{a, b, c, \dots\}^k \quad (6)$$

Definujme *účelovú funkciu* f nad množinou chromozómov

$$f: \{a, b, c, \dots\}^k \rightarrow R \quad (7)$$

Táto funkcia priradí každému chromozómu reálne číslo. Použitím biologickej terminológie môžeme povedať, že chromozóm \mathbf{x} reprezentuje *genotyp* agenta, zatiaľ čo funkčná hodnota $f(\mathbf{x})$ reprezentuje jeho *fenotyp*. Táto interpretácia chromozómu a účelovej funkcie ako vzťahu medzi genotypom a fenotypom aj napriek svojej jednoduchosti, poskytuje dobré možnosti pre formalizáciu Darwinovej evolúcie smerom k evolučným algoritmom.

Študujme *optimalizačnú úlohu* pre účelovú funkciu

$$\mathbf{x}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \{a, b, c, \dots\}^k} f(\mathbf{x}) \quad (8)$$

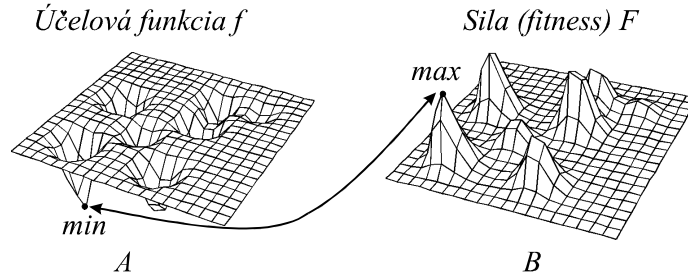
Riešením tejto úlohy je *globálne minimum* účelovej funkcie v priestore všetkých možných chromozómov. Budeme postulovať, že mierou úspešnosti chromozómu je jeho funkčná hodnota. Chromozóm je tým úspešnejší – silnejší, čím je jeho funkčná hodnota (fenotyp) menšia. Na základe týchto úvah môžeme zaviesť ohodnotenie chromozómov fitness ako zobrazenie chromozómov na kladné reálne čísla (pozri obr. 4)

$$F: P \rightarrow R_+ \quad (9)$$

ktoré vyhovuje podmienke

$$\forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in P: f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_2) \Rightarrow F(\mathbf{x}_1) \geq F(\mathbf{x}_2) \geq 0 \quad (10)$$

Vzťah medzi funkciou-fenotypom f a funkciou-fitness F vyjadruje úspešnosť daného agenta reprezentovaného chromozómom, čím je úspešnejší, tým je funkčná hodnota f menšia, alebo sprostredkované pomocou fitness, čím je agent úspešnejší, tým je fitness väčšia.



Obrázok 4. Chromozómy z populácie P sú ohodnotené fitness pomocou funkčných hodnôt účelovej funkcie tak, že čím je menšia funkčná hodnota, tým väčšia fitness je priradená chromozómu.

Chromozóm \mathbf{x} je vybraný do reprodukčného procesu s pravdepodobnosťou, ktorá je úmerná jeho fitness $F(\mathbf{x})$, tento kvázináhodný výber sa realizuje pomocou stochastického operátora *selektie* O_{select}

$$\mathbf{x} = O_{\text{select}}(P) \quad (11)$$

3.4 Kríženie a mutácia

Zavedieme stochastické operátory kríženia a mutácie [4], pomocou ktorých vyjadríme dôležitý operátor reprodukcie. Definícia týchto operátorov je založená na blízkej analógii s prírodou, kde sa podobné procesy vyskytujú v rámci reprodukcie jedincov. *Kríženie* chromozómov \mathbf{x} a \mathbf{y} je stochastický operátor, pomocou ktorého si chromozómy vymenia náhodne vybrané časti (pozri obr. 5)

$$(\mathbf{x}', \mathbf{y}') = O_{\text{cross}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (12)$$

Mutácia chromozómu \mathbf{x} je náhodná zmena jeho znakov na iné znaky (pozri obr. 5)

$$\mathbf{x}' = O_{\text{mut}}(\mathbf{x}) \quad (13a)$$

kde \mathbf{x}' je nový chromozóm vytvorený mutáciou

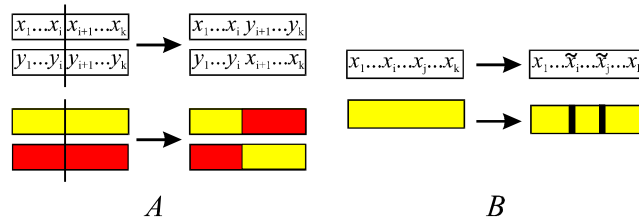
$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k) \quad \text{na} \quad \mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_k) \quad (13b)$$

Jednotlivé komponenty nového chromozómu \mathbf{x}' sú určené takto

$$x'_i = \begin{cases} \tilde{x}_i & (\text{pre } \text{random} < P_{\text{mut}}) \\ x_i & (\text{pre } \text{random} \geq P_{\text{mut}}) \end{cases} \quad (13c)$$

$\tilde{x}_i \neq x_i$ je náhodne vybraný znak, *random* je náhodné číslo z intervalu [0,1) generované s rovnomernou distribúciou a pravdepodobnosť P_{mut} určuje stochastičnosť operátora mutácie. V limitnom prípade, ak $P_{\text{mut}} \rightarrow 0$, potom operátor mutácie nemení chromozóm \mathbf{x} , formálne

$$\lim_{P_{\text{mut}} \rightarrow 0} O_{\text{mut}}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \quad (13d)$$



Obrázok 5. Schematické znázornenie operácie kríženia (A) a mutácie (B). Stochastičnosť kríženia a mutácie spočíva v náhodnom výbere bodu kríženia (vertikálna čiara v diagrame A) resp. v náhodnom výbere znakov v reťazci chromozóma, ktoré budú zmenené na iné znaky.

Reprodukcia dvoch rodičovských chromozómov je vyjadrená postupnosťou operátorov selekcie, kríženia a mutácie takto

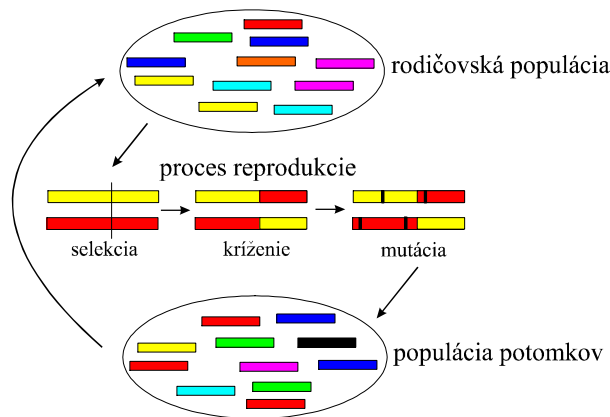
$$\mathbf{x} = O_{select}(P), \quad \mathbf{y} = O_{select}(P) \quad (14a)$$

$$(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}) = O_{repro}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (14b)$$

$$\mathbf{x}' = O_{mut}(\hat{\mathbf{x}}) \quad \text{a} \quad \mathbf{y}' = O_{mut}(\hat{\mathbf{y}}) \quad (14c)$$

$$(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}) = O_{cross}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (14d)$$

V algoritme 1 vyjadrujúcom pseudopascalovskú implementáciu Darwinovej evolúcie, pojmy chromozóm a operácia reprodukcie neboli bližšie špecifikované. Teraz už máme k dispozícii pojmový aparát k ich hlbšej špecifikácii. Menovite, operácia reprodukcie sa rozpadne na podoperácie selekcie, kríženia a mutácie, pozri obr. 6.



Obrázok 6. Schematické vyjadrenie Algoritmu 1 Darwinovej evolúcie, kde už operátor reprodukcie je rozložený na operácie selekcie, kríženia a mutácie.

V prvej časti tejto kapitoly už bolo naznačené, že sexuálna reprodukcia agentov populácie nie je jediný možný prístup k ich reprodukcii, existuje ešte možnosť tzv. asexuálnej reprodukcie, v ktorej len jeden agent - rodič vstupuje do procesu reprodukcie. Pomocou jednoduchého modelu ukážeme za akých podmienok je sexuálna alebo asexuálna reprodukcia výhodná pre Darwinovú evolúciu. Predpokladajme, že funkcia f je *separovateľná* na dve nezávislé časti

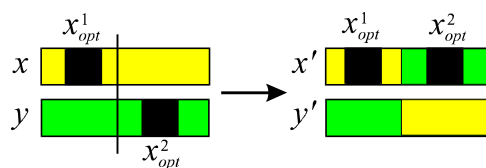
$$f(\mathbf{x}) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_j) + f_2(x_{j+1}, x_{j+2}, \dots, x_k) \quad (15)$$

Optimalizačný problém (8) pre funkciu f potom obsahuje dva nezávislé podproblémy

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{opt} &= \mathbf{x}_{opt}^1 \oplus \mathbf{x}_{opt}^2 \\ \mathbf{x}_{opt}^1 &= \arg \min_{\mathbf{x}^1 \in \{a,b,c,\dots\}^j} f_1(\mathbf{x}^1) \\ \mathbf{x}_{opt}^2 &= \arg \min_{\mathbf{x}^2 \in \{a,b,c,\dots\}^{k-j}} f_2(\mathbf{x}^2) \end{aligned} \quad (16)$$

Význam kríženia pre takto separovateľný optimalizačný problém je znázornený na obr. 7. Z tohto obrázku priamo vyplýva, že operácia kríženia môže podstatne urýchlovať evolúciu populácie, potenciálne môže spájať dve „podriešenia“ v jedno riešenie, ktoré obsahuje obe podriešenia.

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &> f(\mathbf{x}'), & f(\mathbf{y}) &> f(\mathbf{y}') \\ f(\mathbf{x}) &< f(\mathbf{y}'), & f(\mathbf{y}) &< f(\mathbf{y}') \end{aligned} \quad (17)$$



Obrázok 7. Význam kríženia pre separovateľnú účelovú funkciu. Operácia kríženia môže spojiť dve nezávislé riešenia – chromozómy v jedno riešenie, ktoré už je riešením oboch optimalizačných podproblémov.

V prípade, že účelová funkcia je separovateľná na dva alebo viac nezávislých častí, operácia kríženia zavádza do Darwinovej evolúcie *vnútorný paralelizmus*. Tento pojem, zavedený v teórii genetických algoritmov Hollandom [13], znamená, že v populácii chromozómov prebieha mnoho nezávislých optimalizácií, ktoré sú zamerané na len na jednu časť účelovej funkcie. Operácia kríženia môže spájať tieto nezávislé „podriešenia“ na nové riešenia, ktoré už majú charakter riešení pokrývajúcich dva alebo viac optimalizačných podproblémov. Na základe týchto jednoduchých úvah môžeme pristúpiť k formulovaniu nasledujúceho zovšeobecnenia platného pre umelú (a snáď aj pre Darwinovu) evolúciu:

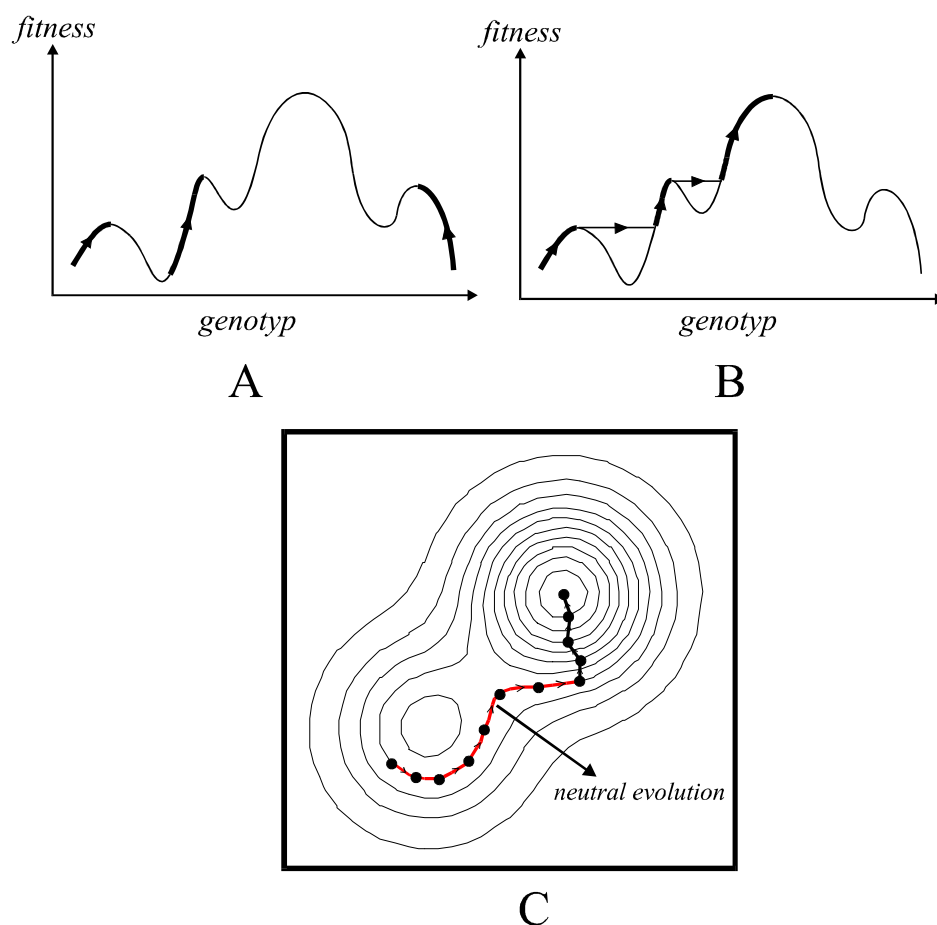
- (1) V prípade, ak sa gény v chromozóme dajú rozdeliť na dve susedné podskupiny, ktoré navzájom neinteragujú, potom *kríženie urýchľuje evolúciu*, t.j. hľadanie globálneho riešenia.
- (2) V opačnom prípade, ak gény v chromozóme nie je možné rozdeliť na dve susedné neinteragujúce skupiny, potom kríženie nie je dôležité pre urýchlenie evolúcie.

V 2. prípade (gény v chromozóme nie je možné rozdeliť na susedné neinteragujúce podskupiny) zahrnutie kríženia neurýchľuje evolúciu. Potom reprodukčný proces obsahuje len mutáciu pri kopírovaní otcovského chromozómu do chromozómu potomka.

V teórii evolučných algoritmov existujú dva „antagonistické“ tábory, ktoré sú charakterizované tým, či sú *za* alebo *proti* zahrnutiu kríženia do procesu reprodukcie. Prvý tábor reprezentovaný napr. Hollandom [13] (genetické algoritmy) verí, že kríženie patrí medzi základné črty evolučných algoritmov, jeho odstránenie redukuje evolučné algoritmy na slepé stochastické optimalizácie. Druhý tábor reprezentovaný napr. Fogelom [14] (evolučné programovanie) tvrdí, že zahrnutie kríženia do evolučných algoritmov nie je potrebné (kríženie je charakterizované ako gigantická mutácia). Podľa toho čo sme si už povedali o význame kríženia v evolúcii, môžeme povedať, že prvý (druhý) tábor má pravdu pre evolúciu definovanú s účelovou funkciou, ktorá je (nie je) separovateľná na neinteragujúce časti.

3.5 Neutrálne mutácie

Neutrálne mutácie (alebo neutrálna evolúcia) boli diskutované Kimurom [24] koncom 60-tych rokov, ako určité alternatívne vysvetlenie biochemickej evolúcie, kde je známym experimentálnym faktom skutočnosť, že štruktúra niektorých bielkovín (napr. cytochromu C) sa pri prechode z jedného živočícha na druhého v rámci danej vetvy fylogenetického stromu. Schuster [25] použil základné myšlienky neutrálnych mutácií k naznačeniu ich významu ako významného akceleračného mechanizmu Darwinovej evolúcie, umožňujú evolúciu chápanej ako optimalizačný algoritmus na povrchu fitness uniknúť z lokálnych maxim a pokračovať evolúciu v hľadaní potenciálneho globálneho maxima (pozri obr. 8).

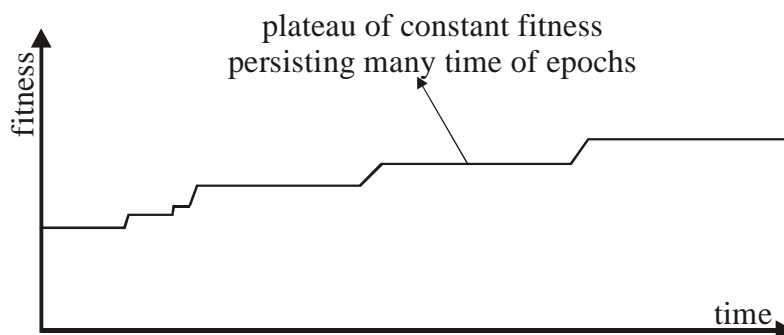


Obrázok 8. Schematické znázornenie priebehu Darwinovej evolúcie v prípade, že neutrálne mutácie (mutácia produkuje nový genotyp, ktorý má rovnakú fitness ako pôvodný genotyp) nie sú zapojené (diagram A), alebo neutrálne mutácie sú zapojené (diagram B). V prvom prípade Evolúcia skončí na najbližšom vrchole povrchu fitness (hovoríme, že Darwinova evolúcia je lokálny optimalizátor typu horolezeckého algoritmu - riešenie lezie po povrchu fitness do najbližšieho maxima). V prípade, že uvažujeme neutrálne mutácie, lokálny charakter optimalizácie Darwinovej evolúcie môže byť preklenutý práve neutrálnymi oblasťami, ktoré umožňujú efektívne preklenúť "údolia" s nižšou hodnotou fitness (diagram B). Týmto spôsobom Darwinova evolúcia má veľkú šancu dostať sa do globálneho maxima na povrchu fitness. Diagram C zobrazuje vrstevnicový graf hyperpovrchu fitness, obsahuje dve lokálne maximá, ľavé dolné má nižšiu funkčnú hodnotu, ako pravé horné maximá, pričom tieto maximá sú oddelené údolím. Vyznačená orientovaná cesta znázorňuje sled neutrálnych mutácií (ležia na rovnakej vrstevnici), ktoré umožnili preklopenie veľkej "vzdialenosti" medzi východným bodom na hyperpovrchu a pravým horným maximom.

K tomu, aby sme mohli diskutovať v rámci nášho formálneho modelu evolúcie koncept "neutrálnej evolúcie" budeme predpokladať, že zobrazenie (9) chromozómu na

fitness je vysoko *redundantné*. To znamená, že existuje "mnoho" rôznych chromozómov, ktoré majú rovnakú fitness. Formálne, nech $O(y) \subset \{a,b,c,\dots\}^k$ je množina všetkých chromozómov, ktoré sú ohodnotené rovnakou fitness, potom náš predpoklad redundantnosti je vyjadrený podmienkou $|O(y)| \gg 0$, t.j. množina $O(y)$ obsahuje "mnoho" chromozómov. Hovoríme, že chromozóm $x' = O_{mut}(x)$ vznikol z chromozómu x *neutrálnou mutáciou*, formálne $x' \in O(x)$, ak oba chromozómy sú ohodnotené rovnakou fitness, $F(x)=F(x')$. Postupnosť neutrálnych mutácií môže byť v evolúcii použitá na preklopenie veľkého údolia s malými hodnotami fitness, pozri obr. 8. Týmto jednoduchým spôsobom je evolúcia schopná vymaniť sa z lokálnych extrémov a hľadať globálny extrém. Pohyb "trajektórie" po neutrálnej časti hyperpovrchu fitness môže trvať relatívne dlhú dobu vzhľadom k predchádzajúcim zmenám fitness, týmto jednoduchým a názorným spôsobom dospievame ku skutočnosti, že "obdobia" medzi výraznými zmenami fitness môžu trvať dlhé obdobia vzhľadom k obdobiám, keď dochádza k podstatným zmenám priemernej fitness v rámci celej populácie, pozri obr. 9. Takto sme sa jednoducho a priamočiaro dostali k teórii "prerušovaných rovnováh", ktorá bola vypracovaná počiatkom 70-tych rokov Gouldom a Eldredgeom. Títo paleontológovia, vychádzajúc z fosílnych nálezov, postulovali, že vznik nových druhov pomocou evolučných zmien neprebíha pomaly a postupne v priebehu mnohých miliónov rokov, ale náhle v intervaloch niekoľkých tisícok rokov, po ktorých nasledujú dlhé periódy stability v priebehu ktorých organizmy sa menia len veľmi málo. Pomocou konceptu neutrálnych mutácií je možné pomerne jednoducho a logicky vysvetliť existenciu náhlych skokov v evolúcii, čo patrí jeden z najčastejšie opakovaných argumentov proti Darwinovej evolučnej teórii.

V emergencii adaptívnej zložitosti pomocou darwinovskej evolúcie je implicitne obsiahnutý predpoklad, že adaptívna zložitosť vzniká postupne, pomocou postupnosti malých zmien, a nie pomocou veľkých a náhlych prírastkov zmeny adaptívnej zložitosti. Z týchto dôvodov možno konštatovať, že súčasné názory na vznik adaptívnej zložitosti, ktoré sú tiež podporované simulačnými výpočtami pomocou evolučných algoritmov, sú principiálne gradulaistické. Práve prístup neutrálnych mutácií umožňuje preklenúť prirodzeným spôsobom požiadavku postupnosti zmeny adaptívnej zložitosti a skokové zmeny v jej "vonkajšom vzhľade". Genotyp adaptívnej zložitosti sa v priebehu evolúcie mení pomaly - postupne, však v dôsledku existencie neutrálnych mutácií sa skokovo mení fitness (fenotyp), pozri obr. 9.



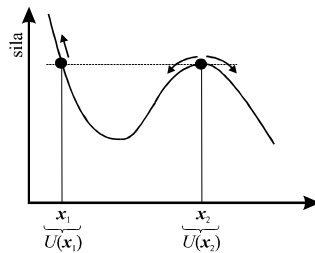
Obrázok 9. Graf maximálneho fitness v populácii chromozómov v priebehu dlhého časového úseku (t.j. evolúcie populácie). Fitness zostáva dlhé časové úseky nemenným, potom sa náhle zvýši o malú hodnotu a zasa zostáva nemenný dlhý časový úsek.

4. Učenie a evolúcia – Baldwinov efekt

V r. 1896 Baldwin [15-17] rozšíril Darwinovu evolúciu o hypotézu, že ak *učenie* napomáha prežitiu, potom agenti lepšie prispôsobení k učeniu majú viac potomkov, t.j. frekvencia génov zodpovedných za učenie sa zväčšuje. Ak prostredie v ktorom prebieha evolúcia zostáva konštantným, t.j. užitočná informácia, ktorá je predmetom učenia sa nemení, prirodzený výber môže viesť k genetickej fixácii vlastností, ktoré boli pôvodne predmetom učenia. Baldwin nazval tento mechanizmus „organický výber“, v súčasnosti sa nazýva *Baldwinov efekt*.

Fenomén učenia je silne holistického charakteru (skôr patrí do psychológie [21,22] než do biológie), preto je len s výhradami akceptovateľný evolučnou biológiou ako dôležitý faktor pre hlbšie pochopenie mechanizmov evolučného procesu. Predstava o ovplyvňovaní evolúcie získanými vlastnosťami typu učenia, automaticky evokuje Lamarckove predstavy o evolúcii, podľa ktorého vlastnosti organizmu získané adaptáciou v priebehu života sú dediteľné potomkami (svaly kováča dedia jeho deti !?). Ortodoxný evolucionistický názor je, že zmeny fenotypu agenta získané v priebehu života sa nededia. Baldwinov efekt poskytuje určitú možnosť, ako považovať tieto zmeny fenotypu (napr. učenie, alebo vo všeobecnosti, schopnosť adaptácie v danom prostredí) za dôležitý faktor ovplyvňujúci evolúciu.

Interpretácia Baldwinovho efektu, založená na simulačných výpočtoch, pochádza z r. 1987 od Hintona a Nowlana [18]: *proces učenia agenta v rámci jeho života môže byť formálne chápaný ako lokálne prehľadávanie priestoru parametrov kognitívneho orgánu s cieľom zistiť, či v blízkom okolí neexistuje lepšie riešenie ako to, ktoré je určené genotypom agenta* (pozri obr. 8).



Obrázok 8. Vysvetlenie Baldwinovho efektu podľa Hintona a Nowlana [18]. Majme dva chromozómy x_1 a x_2 , ktorých fitness je rovnaká. Učenie spočíva v prehľadávaní blízkeho okolia daného chromozómu. V prípade, že v blízkom okolí chromozómu x_1 existuje iný chromozóm, ktorý má väčšiu fitness ako pôvodný chromozóm x_1 , potom pre evolúcie je perspektívnejší chromozóm x_1 ako chromozóm x_2 (chromozóm x_1 má ešte šancu sa evolúciou vylepšovať na rozdiel od chromozómu x_2 , ktorý je lokálnym maximom).

V ďalšej časti tejto kapitoly pristúpime k formalizácii Baldwinovho efektu [11]. Predpokladajme, že agenti populácie sú vybavení kognitívnym orgánom, pomocou ktorého sú schopní vykonávať kognitívne aktivity požadované pri ich interakcii s iným agentom alebo s prostredím. Kognitívny orgán je schopný učenia, nutným dôsledkom tejto skutočnosti je jeho plasticita. Agent v priebehu učenia mení v určitom rozsahu parametre kognitívneho orgánu smerom k zvyšovaniu jeho efektivity. Fitness agenta je určená nielen samotným chromozómom, ale aj jeho blízkym okolím, schopnosťou kognitívneho orgánu nájsť v blízkom okolí lepšie riešenie. Nech agent je schopný pomocou svojho kognitívneho orgánu riešiť úlohu, či pre daný chromozóm - aktuálne riešenie x optimalizačného problému - v jeho blízkom okolí existuje iné lepšie riešenie x' ,

$$f(x) > f(x') \quad (19)$$

Nech $U(x)$ je blízke okolie chromozómu x a nech kapacita kognitívneho orgánu je taká, že agent je schopný riešiť optimalizačnú úlohu v blízkom okolí $U(x)$

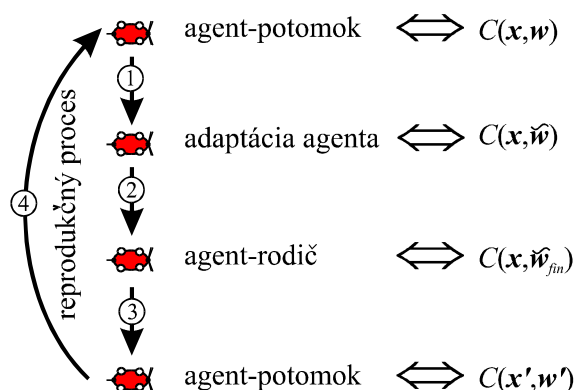
$$x' = \arg \min_{y \in U(x)} f(y) \quad (20)$$

V prípade, že toto riešenie x' je lepšie ako pôvodné x , $f(x) > f(x')$, potom aktuálnu fitness $F(x)$ zvýšime o $\delta(x, x')$

$$(f(x) > f(x')) \Rightarrow (F(x) \leftarrow F(x) + \delta(x, x')) \quad (21)$$

Nech $C(x;w)$ je kognitívny orgán agenta s chromozómom x , pričom parametre kognitívneho orgánu sú označené w . Počiatočné hodnoty parametrov sú plne určené chromozómom x . V priebehu života agenta sa parametre kognitívneho orgánu môžu zmeniť na \tilde{w} , tieto môžeme považovať za zmenu fenotypu agenta v dôsledku adaptačných procesov prebiehajúcich za jeho života. Záverečné hodnoty parametrov označíme \tilde{w}_{fin} . Takto adaptovaný agent môže vstupovať do reprodukčného procesu, stáva sa rodičom. Vzniknutý potomok dedí len pôvodný chromozóm x v ľahko zmutovanej forme x' a nové počiatočné hodnoty parametrov w' sú určené novým chromozómom x' (pozri obr. 9).

Záverom tejto kapitoly uvedieme niekoľko poznámok o význame Baldwinovho efektu pre evolúciu. Baldwinov efekt je založený na existencii *kognitívneho orgánu*, ktorý je schopný jednoduchých kognitívnych aktivít – *učenia*. Pod učením budeme rozumieť také procesy prehládávania v priestore parametrov kognitívneho orgánu, ktoré najlepšie riešia danú aktuálnu úlohu agenta. Agenti schopní efektívnejšieho učenia sú ohodnotení *väčšou fitness* ako agenti s malou efektívnosťou učenia. Pomocou Baldwinovho efektu jednoduchá užitočná informácia, ktorá je predmetom učenia a je nemenná, môže byť prirodzeným výberom *geneticky zafixovaná*.

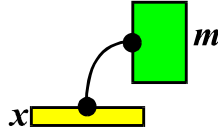


Obrázok 9. Jednotlivé etapy agenta v rámci jednej epochy evolúcie: (1) Zdedený chromozóm x agenta – potomka plne určuje architektúru a parametre w jeho kognitívneho orgánu. (2) V priebehu svojho života v rámci učenia agent mení parametre svojho kognitívneho orgánu na \tilde{w} . (3) V záverečnej etape agent má parametre označené \tilde{w}_{fin} , ktoré sa môžu podstatne líšiť od pôvodných parametrov w určených chromozómom x . Túto zmenu parametrov môžeme označiť za zmenu fenotypu agentov dôsledku procesu učenia prebiehajúceho v aktívnej fáze života agenta. V etape (1) vznikne z agenta - rodiča nový agent – potomok, ktoré ho chromozóm x' je plne určený aplikáciou reprodukčného operátora na rodičovské chromozómy. Parametre w' kognitívneho orgánu potomka sú plne určené chromozómom x' . Poznamenajme, že evolúcia je darvinovského typu, potomok nemôže dediť vlastnosti rodiča, ktoré boli získané v priebehu jeho života (v opačnom prípade, by sa jednalo o evolúciu lamarckovského typu).

5. Kultúra a evolúcia – Dawkinsove mémy [19,20]

Je nereálne očakávať, že dôležitá informácia pre úspešné prežitie agentov, ktorá je komplexného charakteru a je nemenná v priebehu mnohých generácií evolúcie, bude geneticky zafixovaná pomocou Baldwinovho efektu. Preklenutie tejto bariéry medzi zložitou informáciou a možnosťami Darwinovej evolúcie je možné pomocou *mémov*, ktoré boli zavedené Dawkinsom v jeho slávnej knihe „*The Selfish Gene*“ [19]. V tomto prístupe fitness chromozómov už nie je určená len chromozómom samotným, prípadne jeho blízkym

okolím, ale aj mémom, ktorý je pridružený chromozómu. Volne povedané, mémy môžeme chápať ako *kultúrne prostredie*, ktoré spolu s prirodzeným prostredím tvorí „životný priestor“ pre existenciu chromozómov. Agent je reprezentovaný dvojicou x/m (ktorý budeme nazývať *m-chromozóm*), kde x je chromozóm a m je mém, pozri obr. 10.



Obrázok 10. Schematické vyjadrenie m-chromozómu x/m ako komplexu chromozómu x a mému m .

Obráťme našu pozornosť na podrobnejšiu špecifikáciu mémov [11]. Mém je množina pravidiel typu *if...then...*

$$m = \{ \alpha \Rightarrow \beta_{req} \} = \{ \alpha / \beta_{req} \} \quad (22)$$

kde α je vstup do kognitívneho orgánu a β_{req} je požadovaný výstup z kognitívneho orgánu. Mém obsahuje množinu pravidiel, ktoré slúžia agentovi pre lepšiu orientáciu v danom prostredí. V prípade, že mém obsahuje „užitočnú“ informáciu, potom zvyšuje fitness agenta.

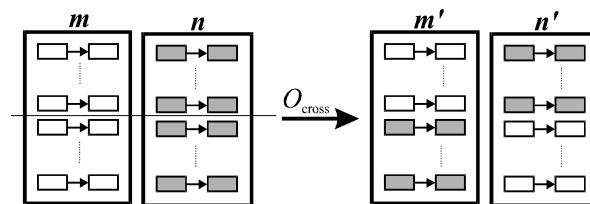
Predpokladajme, že všetky mémy majú rovnaké ľavé strany pravidiel, t.j. rôzne mémy poskytujú rôzne odpovede na rovnaké otázky. Množinu všetkých možných ľavých strán budeme nazývať *tréningová množina*

$$A = \{ \alpha \} \quad (23)$$

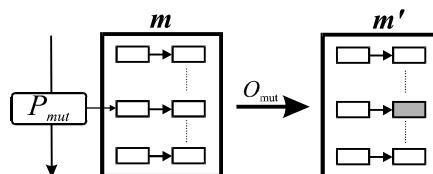
Kognitívny orgán agenta $C(x,w)$, ktorý bol zavedený v predchádzajúcej kapitole ako určitý aparát pomocou ktorého sa realizuje učenie agenta, v súvislosti s mémami môže byť teraz bližšie špecifikovaný ako *zobrazenie*, ktoré každému argumentu (ľavej strane) α priradí jeho obraz β (pravú stranu, spolu tvoria pravidlo $\alpha \Rightarrow \beta$), formálne

$$\beta = C(x,w;\alpha) \quad (24)$$

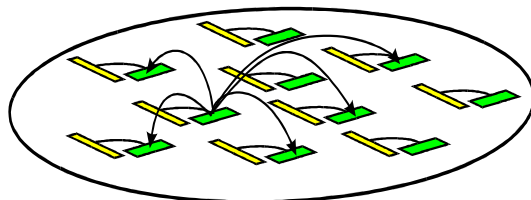
Ak dva m-chromozómy x/m a y/n vstupujú do spoločného reprodukčného procesu, potom vytvárajú dvojicu potomkov použitím operácií *kríženia* a *mutácie*. Tieto operácie môžu byť aplikované aj na mémy m a n (pozri obrázky 11 a 12).



Obrázok 11. Znázornenie operácie kríženia aplikovanej na mémy m a n , táto operácia kríženia spočíva v tom, že mémy si vymenia svoje časti od náhodne vybraného bodu kríženia.



Obrázok 12. Znázornenie operácie mutácie mému m . Idúc postupne zhora nadol, s pravdepodobnosťou P_{mut} meníme náhodne pravé strany pravidiel. V prípade, že pravdepodobnosť P_{mut} je veľmi malá, môže nastať prípad, že aplikácia stochastickej operácie mutácie sa neprejaví, rezultujúci mém m' je totožný s pôvodným mémom.

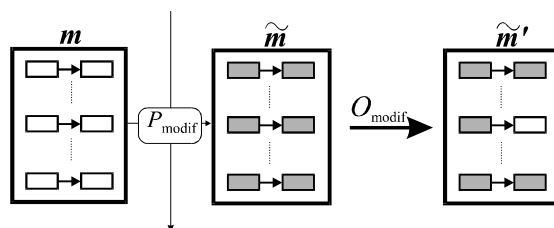


Obrázok 13. Znázornenie šírenia mémov v populácii. Kvázináhodne vybraný m -chromozóm s veľkou fitness ponúka svoj mém náhodne vybraným m -chromozómom. Mémetická interakcia s týmto mémom spočíva v tom, že m -chromozóm zmodifikuje svoj mém operáciou podobnou kríženiu.

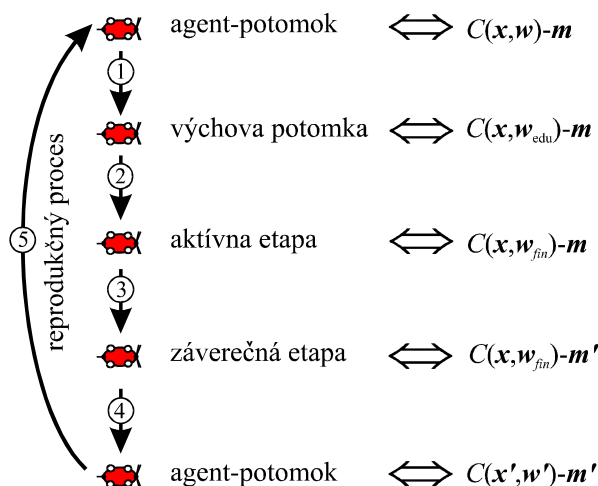
Podľa Dawkinsa [19], mémy sa môžu prenášať z jedného agenta na iného agenta, pozri obr. 13. Implementácia tejto predstavy sa realizuje pomocou *interakcie mémov*, ktorá je určená takto: (1) Kvázináhodne sa vyberie agent s veľkou fitness, tento je reprezentovaný m -chromozómom x/m . (2) Náhodne vyberieme podpopuláciu $P' = \{\tilde{x}/\tilde{m}\} \subseteq P$ agentov, ktorým sa ponúkne mém m . Interakcia medzi vybraným mémom m a mémom agenta z podpopulácie P' sa realizuje operáciou podobnou kríženiu, tak, že idúc po jednotlivých zložkách mému \tilde{m} s pravdepodobnosťou P_{modif} zameníme pravú stranu z \tilde{m} príslušnou pravou stranou z m . Touto stochastickou operáciou z mému \tilde{m} vznikne nový mém (pozri obr. 14)

$$\tilde{m}' = O_{modif}(m, \tilde{m}) \quad (25)$$

V záverečnej etape každej generácie dochádza k šíreniu mémov v populácii, ktoré obrazne môže byť charakterizované ako „preskakovanie“ vybraného mému z agenta na iného agenta.



Obrázok 14. Znázornenie interakcie medzi dvoma mémami m a \tilde{m} . Idúc zhora nadol, s pravdepodobnosťou P_{modif} nahradíme pravú stranu vybraného pravidla mému m pravou stranou mému \tilde{m} .



Obrázok 15. Jednotlivé etapy života agenta reprezentovaného m -chromozómom, pozri text pod týmto obrázkom.

Aký je scenár životného cyklu m -chromozómov? Môžeme ho rozdeliť na nasledujúce etapy (pozri obr. 15):

1. etapa. Agent – potomok v procese reprodukcie dostane od rodičov nielen genotyp reprezentovaný chromozómom x ale aj mém m . Kognitívny orgán potomka generovaný chromozómom x označíme $C(x,w)$, kde w sú počiatočné hodnoty parametrov.

2. etapa. V prvom štádiu života agent – potomok absolvuje „výchovu“, kde počiatočné parametre w jeho kognitívneho orgánu sa mu postupne zmenia na w_{edu} tak, že začne zobrazovať ľavé strany α z tréningovej množiny A na požadované pravé strany pravidiel z tréningovej množiny

$$\beta_{req} = C(x, w_{edu}; \alpha) \quad \forall \alpha \in A \quad (26)$$

3. etapa. V aktívnom štádiu života agent absolvovaním mnohých učiacich aktov (v rámci Baldwinovho efektu) adaptuje parametre svojho kognitívneho orgánu tak, aby čo najlepšie riešil evolučnú optimalizačnú úlohu; kognitívny orgán má potom tvar $C(x, w_{fin})$.

4. etapa. Na záver aktívneho života agent modifikuje svoj mém m , ktorý dostal od svojich rodičov, vytvára nový mém

$$m' = \left\{ \alpha \Rightarrow \beta_{req} = C(x, w_{fin}; \alpha) \right\} \quad (27)$$

Môžeme povedať, že tento mém obsahuje „kognitívne bohatstvo“, ktoré agent získal tak od svojich predkov, ako aj svojimi aktivitami v priebehu aktívnej životnej fáze. Nový mém m' sa môže ešte modifikovať mémovou interakciou tak, že vybraný mém m „preskočí“ na m' . Mém m' odzrkadluje nielen skúsenosti daného agenta, ale aj jeho bezprostredných predkov a do určitej miery (prostredníctvom mémovej interakcie) tiež aj celej populácie.

5. etapa. Agent bol vybraný do reprodukčného procesu, vzniká nový potomok, ktorý je reprezentovaný chromozómom $x' = O_{repro}(x, \dots)$, jeho kognitívny orgán má tvar $C(x', w')$, kde parametre w' sú plne určené chromozómom x' . Poznamenajme, že v tomto dôležitom kroku reprodukčného cyklu agentov, nový potomok ja vytváraný buď pomocou dvoch rodičov (sexuálne) alebo pomocou len jedného rodiča (asexuálne). Typ ktorý spôsob reprodukcie je vybraný závisí od typu účelovej funkcie f , ak táto funkcia je (nie je) separovateľná na neinteragujúce časti, potom kríženie je (nie je) dôležité pre akceleráciu - vnútorný paralelizmus evolúcie populácie agentov (pozri záverečnú časť druhej kapitoly).

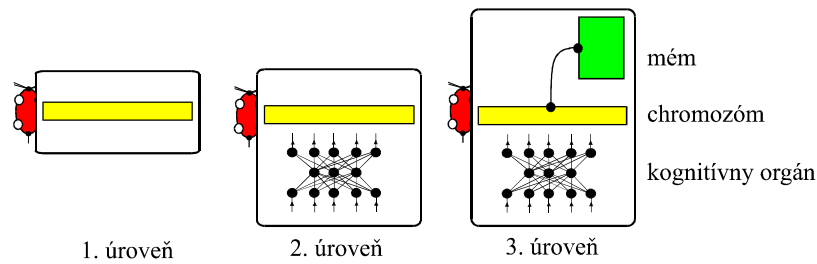
Na záver tejto kapitoly zhodnotíme prínos Dawkinsových mémov pre Darwinovu evolúciu. Mémy sa môžu chápať ako určité „kultúrne prostredie“ v ktorom spolu s „prírodným prostredím“ existujú chromozómy. K tomu, aby sme mohli operacionalizovať mémy, postulujeme, že sú reprezentované množinou pravidiel typu *if...then....* Mémy sa nevyskytujú samostatne, ale vždy len vo dvojici s príslušným chromozómom. Mém interaguje s chromozómom nepriamo, prostredníctvom učenia kognitívneho orgánu agentov ovplyvňuje ohodnotenie chromozómov fitness. Mémy reprezentujú určitú sumu informácie – vedomostí, ktoré dostane agent – potomok od svojho rodiča. Táto informácia je už tak komplexného charakteru, že nemôžeme očakávať genetickú fixáciu pomocou Baldwinovho efektu. Môžeme povedať, že *mémy sú vhodným negenetickým transferom informácie z rodičov na potomkov.*

6. Tri stupne „evolúcie“ Darwinovej evolúcie [10]

Na základe predchádzajúcich úvah o Darwinovej evolúcii a jej zovšeobecneniach, môžeme rozlišovať jej tri stupne „evolúcie“ alebo sofistikovanosti, táto klasifikácia vychádza zo spôsobu určenia fitness chromozómov (pozri obr. 16).

1. stupeň. Fitness chromozómov je určená len polohou chromozómu na povrchu fitness, t.j. je určená výlučne len zložením chromozómu, žiadne iné efekty nie sú zahrnuté pri ohodnotení chromozómu fitness. Tento prístup v informatike je reprezentovaný štandardnými evolučnými algoritmi, kde chromozóm je priamo zobrazený na kladné reálne čísla – fitness, bez prechodných alebo skrytých úvah.

2. stupeň. Agenti populácie majú *kognitívny orgán*, pomocou ktorého môžu vykonávať jednoduché aktivity spočívajúce v efektívnejšej orientácii sa v prostredí. Kognitívny orgán sa v priebehu života adaptuje - učí tak, aby aktivity agenta v prostredí boli progresívne efektívnejšie. Schopnosť ovplyvňovať evolúcie procesmi učenia kognitívneho orgánu sa v evolučnej biológii nazýva Baldwinov efekt. Interpretácia tohoto efektu podľa Hintonu a Nowlana [18] spočíva, že ohodnotenie agentov fitness závisí od ich schopnosti učenia sa, pri ktorom sa prehľadáva najbližšie okolie chromozómov na povrchu fitness (pozri obr. 8). Ak prostredie v ktorom prebieha evolúcia zostáva konštantným, t.j. užitočná informácia, ktorá je predmetom učenia sa nemení, prirodzený výber môže viesť ku genetickej fixácii vlastností, ktoré boli pôvodne predmetom učenia. Etapizácia životného cyklu agentov s kognitívnym orgánom je znázornená na obr. 9. Počiatočné parametre kognitívneho orgánu sú plne determinované chromozómom agenta, v priebehu aktívnej životnej etapy agent adaptuje svoj kognitívny orgán tak, aby správanie sa agenta v prostredí bolo efektívnejšie. Učiacie aktivity, ktoré sú integrálnou súčasťou kognitívneho orgánu, menia jeho parametre tak, že kognitívny orgán sa progresívne stáva efektívnejším v priebehu životného cyklu príslušného agenta. Na záver životného cyklu, keď agent vstupuje do reprodukčného procesu, svojmu potomkovi odovzdáva len svoj chromozóm v ľahko zmutovanej forme, t.j. agent - potomok nededí od rodičov adaptovaný kognitívny orgán (t.j. evolúcia je striktne darwinovská), ale jeho "architektúru" zakódovanú v chromozóme.



Obrazok 16. Diagramatická ilustrácia troch úrovní evolúcie (na diagramoch, kognitívny orgán je reprezentovaný jednoduchou neurónovou sieťou). **Prvá** úroveň je jednoduchá Darwinova evolúcia, kde fitness agenta, ktorý je reprezentovaný chromozómom, je určená priamo jeho vlastnosťami bez použitia dodatočných úvah o možnom ovplyvňovaní fitness agenta inými skutočnosťami než zloženie chromozómu. V **druhej** úrovni agent reprezentovaný chromozómom je vybavený kognitívnym orgánom. Pomocou tohto orgánu je schopný realizovať procesy učenia v priebehu svojho životného cyklu v prostredí, t.j. je schopný meniť v určitom rozsahu parametre svojho kognitívneho orgánu tak, že jeho efektívnosť v prostredí sa progresívne zvyšuje. V **tretej** úrovni, agent okrem toho, že je vybavený kognitívnym orgánom, od rodičov preberá aj mém obsahujúci užitočné informácie (kultúru) pre jeho kognitívny aparát. Takýto agent má už pomerne zložitú etapizáciu svojho životného cyklu. Na jeho začiatku musí absolvovať učenie, v ktorej je jeho kognitívny orgán „učení“ tak, aby čo najlepšie simuloval mém prevzatý od svojich rodičov. Na záver svojho životného cyklu upravuje svoj mém tak, aby bol v súhlase s procesom učenia prebehnutým v aktívnej etape agentovho životného cyklu. V rámci jednej epochy evolučného procesu je ešte možné zapojiť proces šírenia mémov, keď mém patriaci kvázináhodne vybranému agentovi začne „preskakovať“ na iných agentov populácie.

3. úroveň. Agenti vybavení kognitívnym orgánom žijú v určitom "kultúrnom" prostredí, ktoré im zabezpečí transfér vedomostí (kultúrneho dedičstva) z rodičov na potomkov. K tomu, aby sme pojem kultúry operacionalizovali a formalizovali, obrátili sme našu pozornosť na *Dawkinsove mémy*. Postulovali sme, že mém je integrálnou súčasťou chromozómu (spolu vytvárajú tzv. *m-chromozóm*), má štruktúru jednoduchého súboru obsahujúceho pravidlá typu $\alpha \Rightarrow \beta$. Etapizácia životného cyklu takýchto agentov, ktorí sú súčasne vybavení tak kognitívnym aparátom, ako aj mémom, je pomerne zložitá, pozri obr. 15. V inicializačnej etape životného cyklu agent absolvuje "vzdelávací výcvik", v ktorom adaptuje svoj kognitívny orgán tak, aby dobre reprodukoval pravidlá obsiahnuté v jeho méme. V aktívnej životnej etape sa správa podobne, ako agent z druhého stupňa obsahujúci len kognitívny orgán, t.j. adaptuje ho tak, aby jeho aktivity v prostredí boli progresívne efektívnejšie. Na záver životného cyklu agent upraví svoj mém tak, aby bol v súhlase s jeho adaptovaným kognitívnym orgánom, takto upravený mém (obsahujúci "životné skúsenosti" rodiča a v určitom rozsahu aj predchádzajúcich generácií agentov) je poskytnutý agentom - potomkom. To znamená, že mémy vlastne slúžia ako určité premostenie neschopnosti v rámci štandardných mechanizmov dedičnosti poskytovať potomkom vedomosti rodičov a predchádzajúcich generácií.

7. Lamarckova evolúcia

Pretože sa v texte budeme dovoľávať mnohokrát Lamarckovej evolučnej teórie, uvedieme jej základné postuláty: adaptívne zložitosti vznikajú tak, že (1) orgány často využívané sa stávajú perfektnejšími (a orgány málo používané zanikajú alebo sa zmenšujú), (2) pričom získané vlastnosti sa dedia. Diskutujme prvú časť tejto evolučnej teórie, podľa ktorej adaptácia orgánov smerom k ich vylepšeniu prebieha ich častejším používaním. Pre názornosť študujme evolučné vylepšenia, ktoré musia prebiehať pri evolúcii takého orgánu, akým je napr. oko a ktoré sú založené na tom, či daný orgán je často alebo nie je využívaný. Tak napr. môžeme položiť otázku, či používaním oka sa zvyšuje priepustnosť šošovky a jej optické vlastnosti, ktoré majú zásadnú dôležitosť pre efektivitu používania oka, napr. pre rozpoznávaní predátora na dostatočne veľkú vzdialenosť. Odpoveď je veľmi jednoduchá - nie. Darwinovská

evolúcia nemá žiadne obtiaže s vysvetlením nárastu perfektnosti oka. Optické vlastnosti oka sú plne určené geneticky, náhodné zmeny - mutácie spolu s prirodzeným výberom sú dostatočnou príčinou graduálneho zvyšovania perfektnosti oka. Nie všetky získané vlastnosti sú výhodné, ich prenos pomocou dedičnosti do nasledujúcej populácie by mohol mať katastrofálne následky pre potomkov. Preto pre odlišenie pozitívnych získaných vlastností od negatívnych v lamarckovskej evolúcii chýba selekčný mechanizmus akým je prirodzený výber v darwinovskej evolučnej teórii. Možnosť genetického prenosu získaných vlastností z rodičov na potomkov

8. Záverečné poznámky

Navrhnutý prístup k štúdiu umelej evolúcie vychádza zo základných princípov Darwinovej evolúcie, ktorá bola rozšírená o ďalšie dva netradičné aspekty, a to Baldwinov efekt a Dawkinsove mémy. Rozšírenie o Baldwinov efekt spočíva v tom, že agenti majú tzv. kognitívny orgán, ktorého architektúra a počiatočné hodnoty parametrov sú špecifikované chromozómom agenta. V druhom rozšírení, agenti sú reprezentovaní dvojicou komplex a mém (nazývanou m-chromozóm), kde mém (podľa Dawkinsa) je nosičom informácie, ktorá zvyšuje agentovu efektívnosť v priebehu jeho aktívneho životného cyklu.

Tieto rozšírenia štandardnej Darwinovej evolúcie môžeme s určitým nadsadením chápať ako aplikáciu evolučných predstáv na samotnú Darwinovú evolúciu. V prvej úrovni, evolúcia ma štandardný Darwinovský priebeh, agenti populácie sú plne determinovaní len obsahom svojho chromozómu. Architektúra agentov a ich vlastnosti (fenotyp) je určená len chromozómom, volne povedané, správanie sa agentov v priebehu ich životného cyklu je plne determinované geneticky. Pokiaľ existujú nejaké odchýlky v správaní sa agentov, tak tieto sú plne určené variáciou chromozómov populácie.

V druhej úrovni, do evolúcie je zapojená aj schopnosť agentov učiť sa. V tomto prípade, agenti majú tzv. kognitívny orgán, ktorý je schopný elementárnych kognitívnych aktivít, v priebehu adaptácie - učenia agentov sa parametre tohto orgánu menia. Agenti, ktorí sú schopní efektívnejšieho učenia, majú selekčnú výhodu pred agentami, ktorí nie sú menej schopní učenia. Týmto spôsobom sa dostávame do oblasti platnosti Baldwinovho efektu, podľa ktorého, elementárne kognitívne problémy, ktoré musí riešiť agent pri orientácii sa v prostredí, môžu byť geneticky zafixované v prípade, že prostredie je dlhé obdobie nemenné.

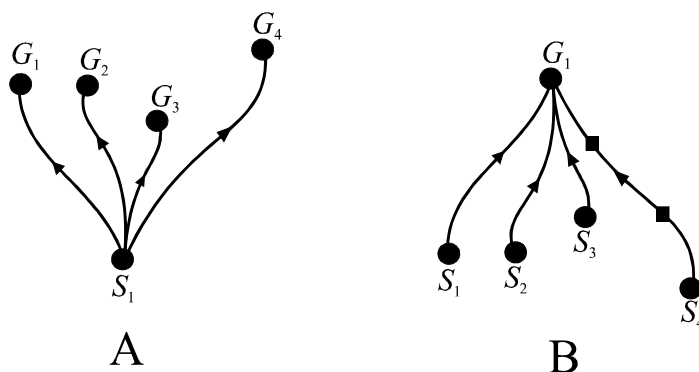
V záverečnej úrovni, vstupuje do evolúcie aj kultúra. Agenti, aby v priebehu svojho aktívneho života získali dostatočnú fitness potrebnú pre prežitie a vstup do reprodukčného procesu, musia už získať od svojich rodičov a predchádzajúcich generácií určitú sumu vedomostí (kultúrnych a/alebo kognitívnych artefaktov). Táto nutnosť rozšírenia Darwinovej evolúcie nielen o učenie, ale aj o potrebné vedomosti bola v našom prístupe formalizovaná pomocou Dawkinsových mémov. Obrazne povedané, od určitého stupňa rozvoja agentov, evolúcia už musí okrem štandardného darwinovského prirodzeného výberu obsahovať aj ďalšie komponenty akými je „učenie“ a „kultúra“. Táto potreba je vyvolaná nemožnosťou dedičných mechanizmov prenášať na potomkov získané vlastnosti (a teda aj vedomosti, ktoré sú uložené v kognitívnom orgáne prostredníctvom jeho parametrov). Prenos skúsenosti z rodičov na potomkov sa realizuje pomocou Dawkinsových mémov a znamená prekonanie informačnej bariéry, ktorú pripravila evolúcia pre svoje objekty – agentov tým, že zakázala genetický prenos získaných vlastností (teda aj vedomostí) z rodičov na potomkov.

Ďakujem Dušanovi Gálikovi (Filozofický ústav SAV) a Andrejovi Lúčnemu (Ústav informatiky MFF UK) za kritické prečítanie rukopisu tejto práce a upozornenie na množstva preklepov, chýb a formulačných a pojmových nejasností.

Dodatočné poznámky

1. Walter Fontana (z Ústavu teoretickej chémie Viedenskej univerzity a z Ústavu Santa Fe, USA) vo svojej prednáške "On Organization" (ktorá na internete je dostupná na adrese ftp://math.chtf.stuba.sk/pub/vlado/Artificial_chemistry/fontana_Milan.pdf) uvádza, že aj navšeobecnejšie formulácie darvinovskej evolúcie (t.j. napríklad pomocou evolučných algoritmov) majú jeden principiálny nedostatok, a to neschopnosť vysvetliť nárast zložitosti (komplexity) v priebehu evolúcie. Darwinovská evolučná teória totiž predpokladá *a-priornú* existenciu entít, ktorých evolúciu sa snaží sama vysvetliť. V celej teórii sa napr. nevyskytuje reprezentácia organizmu, modely evolúcie sú striktne vypracované na úrovni genotypu organizmu, fenotyp organizmu sa používa len nepriamo, a to pri ohodnotení chromozómov populácie silou - fitness). Z týchto dôvodov nemôžeme očakávať, že darwinovská teória nám poskytne bezprostredné vysvetlenie nárastu zložitosti v priebehu evolúcie (napr. prechod prokaryotických buniek na eukaryotické a pod.). Preto, jeden z najbližších cieľov teoretického rozvoja evolučných algoritmov je ich rozšírenie do podoby, ktorá už bude explicitne obsahovať model organizmu, t.j. formálny aparát, ktorý sa nazýva zobrazenie (funkcia - mapping) genotypu na fenotyp. Záverom tejto poznámky musíme konštatovať, že vyššie uvedené problémy darvinovskej evolúcie sú často využívané ako základ pre jej kritiku, zdôrazňujú sa jej problémy s vysvetlením nárastu zložitosti v priebehu evolúcie.

2. Evolúcia (evolučné algoritmy) majú silne stochastický charakter. V dôsledku existencie genetického driftu (napr. náhodných mutácií, náhodného vyhynutia jednotlivca populácie s vysokým fitness pred jeho vstupom do reprodukčného procesu, a pod.) evolučné algoritmy nemajú deterministický charakter, t.j. nemôžeme presne predvídať evolúciu populácie. Na obrázku sú znázornené dva rôzne prípady, ktoré môžu nastať pri interpretácii výsledkov evolučných algoritmov. Diagram A znázorňuje prípad, v ktorom sledujeme rôzne priebehy



evolúcie pre jeden východzí bod S_1 , v dôsledku stochastického charakteru evolúcie z tohoto východzieho stavu môžeme dostať rôzne finálne stavy G_1 , G_2 , G_3 a G_4 . Predpovedať, ktorý z týchto finálnych stavov dostaneme je skoro nemožné pre enormú kombinatoriálnu zložitosť problému (obrazne môžeme povedať, že nepoznáme také výpočtové zariadenie, ktoré by bolo schopné v reálnom čase vykonať vyčerpávajúcym spôsobom rekonštrukciu všetkých možných evolučných trajektórií. Diagram B odpovedá opačnej situácii, poznáme konečný stav evolúcie a hľadáme možné evolučné trajektórie s počiatočnými stavmi S_1 , S_2 , S_3 a S_4 , ktoré by

vedli k danému finálnemu stavu G_1 . Podobne, ako v predchádzajúcom inverznom prípade, aj táto rekonštrukcia evolúcie so zadaným finálnym stavom je enormne zložitý kombinatoriálny problém. Určité zachytané body (reprezentované plnými štvorcami na trajektórii vedúcej z počiatočného stavu S_4) môžu nám podstatne zjednodušiť rekonštrukciu evolučnej trajektórie, tie trajektórie, ktoré neobsahujú tieto body sú automaticky vylúčené z našich úvah.

3. V kapitole 5 sme uviedli tri rôzne stupne darvinovskej evolúcie. V prvom stupni je fitness jedincov plne určený genotypom, čo odpovedá štandardným evolučným algoritmom. V druhom stupni evolúcie existencia kognitívneho orgánu v jedincoch populácie podstatne ovplyvňuje ohodnotenie jednotlivcov fitness. Schopnosť učiť sa je zakódovaná v genotype organizmu, tie jedinci, ktoré majú túto schopnosť vyššiu lepšie prežívajú a častejšie vstupujú do reprodukcie, t.j. majú väčšie fitness. Posledná tretia etapa evolúcie diskutovaná v kapitole 5, obsahuje možnosť určitého kultúrneho dedičstva - mémom, ktoré potomkovia získavajú od svojich rodičmi v rámci "výchovy" v mladosti. Túto možnosť sme pokladali za najvyššie štádium rozvoja darvinovskej evolúcie, kde súčasťou "prostredia" sa stávajú už aj kultúrne artefakty - mémy, ktoré môžu podstatne zvyšovať šancu prežitia a vstupu do reprodukčného procesu. Snáď ako štvrté štádium darvinovskej evolúcie môže byť pokladaná možnosť používania genetických manipulácií so svojim genotypom, v ktorom si jedinci budú sami upravovať (manipulovať) svoj genotyp, jeho zmena nebude už výlučným predmetom dlhodobej evolučnej zmeny. Pri uvažovaní nad možnosťami tohto "najvyššieho" štádia darvinovskej evolúcie vynárajú sa problémy naznačené v predchádzajúcom odseku týchto dodatočných poznámok, kde bolo uvedené, že v dôsledku enormnej kombinatorickej zložitosti problému nie sme schopní s dostatočnou spoľahlivosťou predpovedať priebeh evolúcie po aplikovanej genetickej manipulácii. A práve táto neschopnosť predpovedať v dostatočne dlhom období výsledok evolúcie predstavuje hlavné nebezpečenstvo tohto "posledného" štvrtého štádia darvinovskej evolúcie.

4. Teória mémov (memetika) prezentovaná v kapitole 4 má podstatne obmedzenejší charakter, než ako sa uvádza v súčasnej literatúre o memetike [20]. Mémy sú charakterizované ako nezávislé jednotky, ktoré sa voľne "pohybujú" nad populáciou, kognitívne orgány jedincov populácie využívajú ako "reprodukčný orgán" mému pri jeho šírení sa nad populáciou. V našom prístupe sú mémy striktné viazané na genotyp organizmu, hovoríme, že tvoria komplex nazývaný m-chromozóm. Tento ohraničenejší prístup musíme chápať len ako učitý model memetiky, ktorý sa dobre operacionalizuje a simuluje pomocou evolučných algoritmov.

Referencie

- [1] C. Darwin (1859), *The Origin of Species*. Reprinted Penguin: London, 1985. Táto kniha je tiež dostupná v elektronickej forme na <http://www.tbi.univie.ac.at/Origin/index.html>.
- [2] T. Dobzhansky, F. J. Ayala, G. L. Stebbins, and J. W. Valentine (1977). *Evolution*, W. H. Freeman Co., San Francisco.
- [3] V. Kvasnička, L. Beňušková, J. Pospíchal, I. Farkaš, P. Tiňo a A. Král (1997): *Úvod do teórie neurónových sietí*. IRIS, Bratislava.
- [4] V. Kvasnička, J. Pospíchal a P. Tiňo (2000). *Evolučné algoritmy*. STU vydavateľstvo, Bratislava.
- [5] C. Langton (1995). *Artificial Life: An Overview*. MIT Press, Cambridge, MA.

- [6] D. W. Green et al. (1996). *Cognitive Science, An Introduction*. Blackwell Publishers, Oxford.
- [7] Ľ. Beňušková, V. Kvasnička, a J. Pospíchal (zostavovatelia) (2000). *Hľadanie spoločného jazyka v kognitívnych vedách*. IRIS, Bratislava.
- [8] V. Kvasnička and J. Pospíchal (1999). GA Simulation of Evolution of Cognitive Artefacts, *Neural Network World* (in press).
- [9] V. Kvasnička and J. Pospíchal (1999). Simulation of Evolution of Dawkins Memes. *Evolution and Cognition* (in press)
- [10] V. Kvasnička and J. Pospíchal (1998). Simulation of Baldwin effect and Dawkins memes by genetic algorithm. In *Advances in Soft Computing - Engineering Design and Manufacturing*. Edited by Roy, R., Furuhashi, T., & Chawdhry, P.K., Springer-Verlag, London, pp. 481-496
- [11] V. Kvasnička and J. Pospíchal (2000). An Emergence of Coordinated Communication in Populations of Agents. *Artificial Life* (in press).
- [12] S. Wright (1931). Evolution in Mendelian Populations. *Genetics* **16**, 97-159.
- [13] J. H. Holland (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [14] D. B. Fogel (1995). *Evolutionary Computation. Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. The IEEE Press, New York
- [15] J. M. Baldwin (1986). A New Factor in Evolution. *American Naturalist* **30**, 441-451.
- [16] R. K. Belew and M. Mitchel, editors (1996). *Adaptive Individuals in Evolving Populations: Models and Algorithms*. Addison-Wesley.
- [17] Evolution, Learning, and Instinct: 100 Years of the Baldwin Effect. (1996). Special issue of journal *Evolutionary Computation* **4** (3).
- [18] G. E. Hinton and S. J. Nowlan (1987). How learning can guide evolution. *Complex System* **1**, 495-502.
- [19] R. Dawkins (1998). *Sobecký gen*. Mladá fronta, Praha.
- [20] S. Blackmore (1999). *The Meme Machine*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- [21] J. Piaget (1978). *Behaviour and Evolution*. Random House, New York.
- [22] H. C. Plotkin (1988). Learning and Evolution. In *The Role of Behaviour in Evolution*, ed. by H. C. Plotkin. MIT Press, Cambridge, MA.
- [23] D. C. Bennett: *Darwin's Dangerous Idea - Evolution and the Meaning of Life* , Penguin Press, London, 1995
- [24] M. Kimura: *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1983.
- [25] P. Schuster:

