

Formalizácia Darwinovej evolučnej teórie

Vlado Kvasnička
Katedra matematiky CHTF STU



Obsah

- I. Darwinova evolúcia
- II. Učenie a evolúcia, Baldwinov efekt
- III. Kultúra a evolúcia, Dawkinsove mémy
- IV. Tri etapy Darwinovej evolúcie

Jún 1999

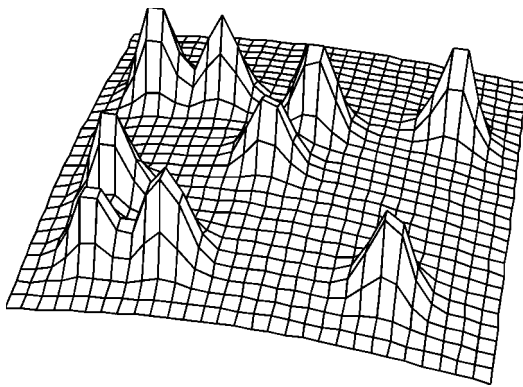
I. Darwinova evolúcia

Biologická evolúcia je progresívna zmena genetického obsahu jedincov - agentov populácie v priebehu mnohých generácií. Evolučný proces obsahuje tieto tri zložky:

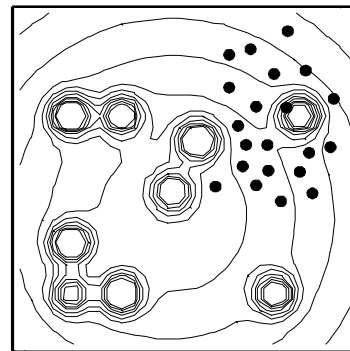
- (1) **Prirodzený výber** (Darwin), proces v ktorom "silnejší" agenti populácie majú viac potomkov v nasledujúcej generácii, ako "slabší" agenti.
- (2) **Náhodný genetický drift**, náhodné udalosti v živote agentov populácie. Takéto udalosti sú napr. náhodná mutácia alebo náhodná smrť zjavne "silného" agenta predtým, ako dostal príležitosť reprodukcie. Stochastické efekty náhodného genetického driftu sú významné hlavne pre malé populácie.
- (3) **Proces reprodukcie**, genetická informácia potomkov vzniká tak, že genetická informácia rodičov si vymení určité časti krížením, pričom môže dochádzať k jej poruche – mutácii.

Špecifikácie sily (fitness)

- V biológii je "sila" (fitness) definovaná ako relatívna schopnosť prežitia a reprodukovania sa v danom **prostredí** a v danej **populácii**. "Sila" môže byť chápaná ako atribút **genotypu**. Potomkovia rodičov s väčšou silou budú viac početnejší a "silnejší" ako potomkovia menej "silnejších" rodičov.
- **Povrch "sily"** (A) - vhodný prístup ako vizualizovať akty selekcie v populácii, ktorá je v evolúcii. Populácia je reprezentovaná ako "oblak" bodov (B) na povrchu "sily".



A



B

- Evolúcia môže byť interpretovaná ako **optimalizačný problém**, hľadá sa také „riešenie“, (jedinec z populácie), ktoré dosiahne najvyšší vrchol na povrchu sily.

Formalizácia evolúcie

(1) Agenti populácie sú reprezentovaní **chromozómami** – lineárnymi reťazcami symbolov

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$$

$$x \in \{a, b, c, \dots\}^k$$

(2) Každý chromozóm populácie je ohodnotený kladným reálnym číslom – **silou** (*fitness*)

$$f: P \rightarrow R_+$$

(3) **Reprodukčný proces** (párenie) – dvaja agenti sú kvázináhodne vybraní z populácie v závislosti na ich sile (silnejší **agenti** majú väčšiu pravdepodobnosť byť vybraní do reprodukcie) a produkujú potomkov (deti).

Reprodukčný proces má tieto tri zložky

- (1) *selekcia* rodičov,
- (2) *križenie* (crossover) a náhodné *mutácie*, a
- (3) *návrat* potomkov do populácie.

$$\mathbf{x}_1^{old} = O_{select}(P), \quad \mathbf{x}_2^{old} = O_{select}(P)$$

$$(\mathbf{x}_1^{new}, \mathbf{x}_2^{new}) = O_{cross}(\mathbf{x}_1^{old}, \mathbf{x}_2^{old})$$

1. **stratégia:** nová populácia Q úplne nahradí pôvodnú populáciu P .
2. **stratégia:** nová populácia Q vzniká z pôvodnej populácie P tak, že potomkovia vytesnia z P príslušný počet slabých agentov.

Pascalovský kód evolúcie s 1. stratégiou vzniku novej populácie

```
P:=náhodne vygenerovaná populácia
  chromozómov;
t:=0;
while t<tmax do
begin 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;
```

Pascalovský kód evolúcie s 2. stratégiou vzniku novej populácie

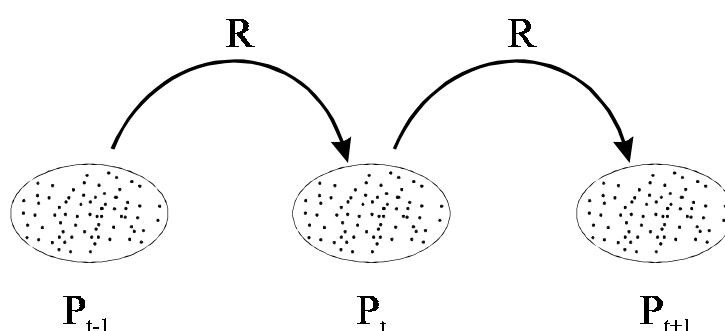
```
P:=náhodne vygenerovaná populácia
  chromozómov;
t:=0;
while t<tmax do
begin Q:=∅;
  while |Q|<|Q|max do
  begin x1:=Oselect(P);
    x2:=Oselect(P);
    (x1' , x2' ):=Orepro(x1 , x2) ;
    Q:=Q∪{x1' , x2' } ;
  end ;
  S:=Oweak(P) ;
  P:=(P-S)∪Q;
end ;
```

Poznámka: Operátor O_{weak} kvázináhodne vyberie z populácia predpísaný počet slabých agentov.

Evolúcia môže byť chápaná ako **rekurentný proces**, kde nasledujúca populácia je vytvorená reprodukciou predchádzajúcej populácie

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

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



Pascalovský kód všeobecnej evolúcie

```
P0 := randomly generated  
Population;  
t := 0;  
while t < tmax do  
begin all solutions of Pt are  
| evaluated by fitness;  
| t := t + 1;  
| Pt := R(Pt-1);  
end;
```

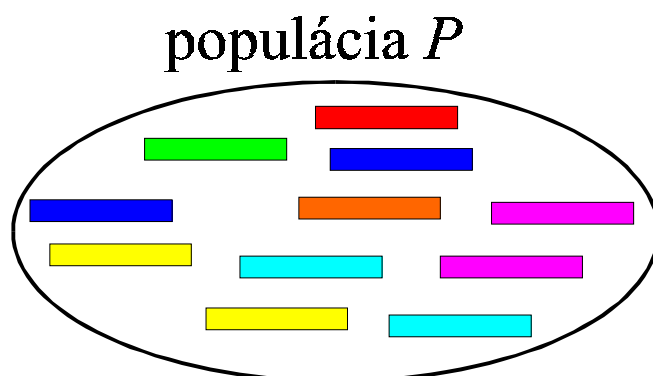

Formalizácia evolúcie smerom k evolučným algoritmom

1. Chromozómom x je reťazec znakov fixnej dĺžky k

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

2. Populácia P obsahuje p chromozómov (ináč povedaná, populácia obsahuje agentov, ktorí sú reprezentovaní chromozómami)

$$P = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p\}$$



3. Účelová funkcia f je definovaná nad množinou chromozómov

$$f : \{a, b, c, \dots\}^k \rightarrow R$$

4. Optimalizačná úloha

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

Poznámka: Použitím biologickej terminológie môžeme povedať, že chromozóm \mathbf{x} reprezentuje *genotyp* agenta, zatiaľ čo funkčná hodnota $f(\mathbf{x})$ reprezentuje jeho *fenotyp*. Mierou úspešnosti chromozómu je jeho funkčná hodnota. Pretože hľadáme minimum účelovej funkcie, chromozóm je tým úspešnejší – silnejší, čím je jeho funkčná hodnota (fenotyp) menšia. Na základe týchto úvah môžeme zaviesť ohodnotenie chromozómov silou.

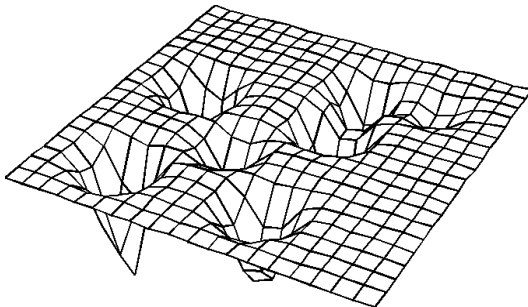
5. **Sila chromozómu** je zobrazenie F definované nad populáciou chromozómov P , ktoré ohodnotí každý chromozóm kladným reálnym číslom

$$F: P \rightarrow R_+$$

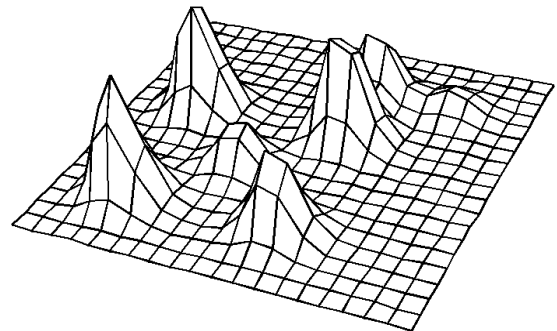
Zobrazenie F vyhovuje podmienke

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

Účelová funkcia f



Sila (fit)



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

6. **Selekcia** chromozómov z populácie do reprodukčného procesu je kvázináhodná s pravdepodobnosťou úmernou ich sile

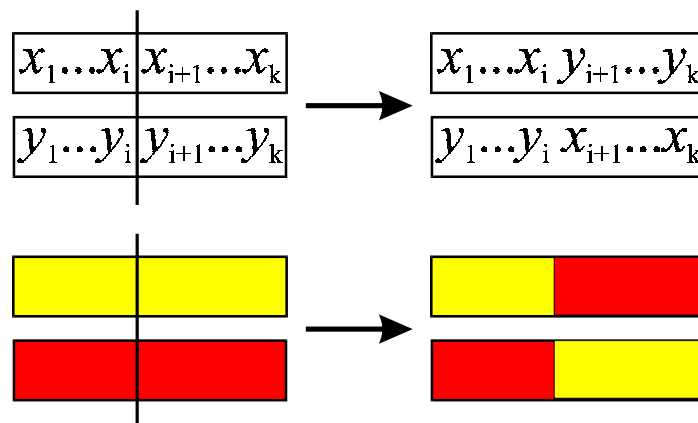
$$\mathbf{x} = O_{select}(P)$$

kde O_{select} je stochastický operátor, ktorý uskutočňuje kvázináhodný výber chromozómu.

7. **Kríženie chromozómov** je výmena častí medzi dvoma chromozómami \mathbf{x}_1 and \mathbf{x}_2

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

1-bodové kríženie



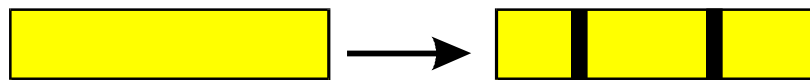
8. **Mutácia chromozómu** \mathbf{x} je náhodná zmena jeho znakov na iné znaky

$$\mathbf{x}' = O_{mut}(\mathbf{x})$$

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

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

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



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

$\tilde{x}_i \neq x_i$ 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 $P_{mut} \rightarrow 0$

$$\lim_{P_{mut} \rightarrow 0} O_{mut}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}$$

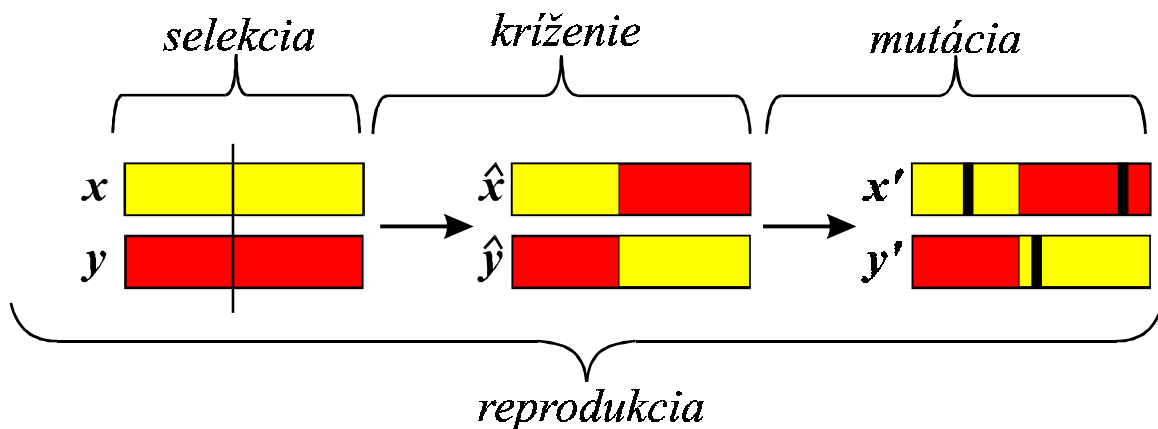
9. **Reprodukcia** dvoch rodičovských chromozómov je vyjadrená pomocou operátorov selekcie, kríženia a mutácie takto

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

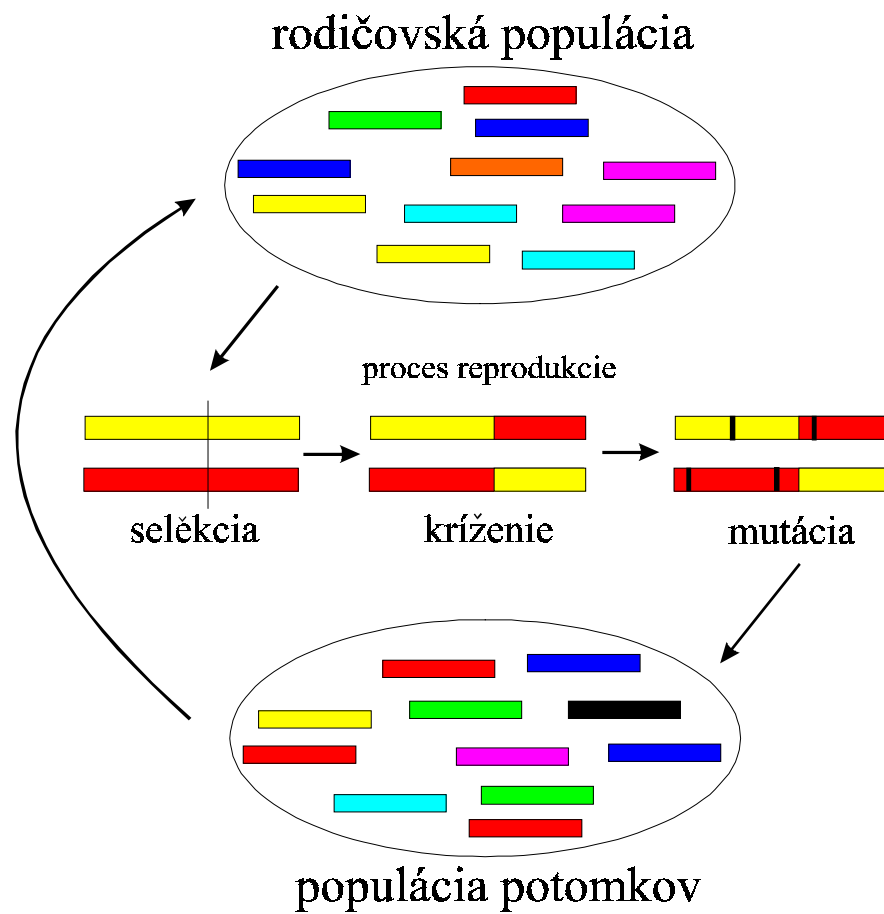
$$(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}) = O_{repro}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

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

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



Schematické znázornenie evolúcie



Význam kríženia v evolúcii

Predpokladajme, že funkcia f je separovateľná na dve nezávislé časti

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

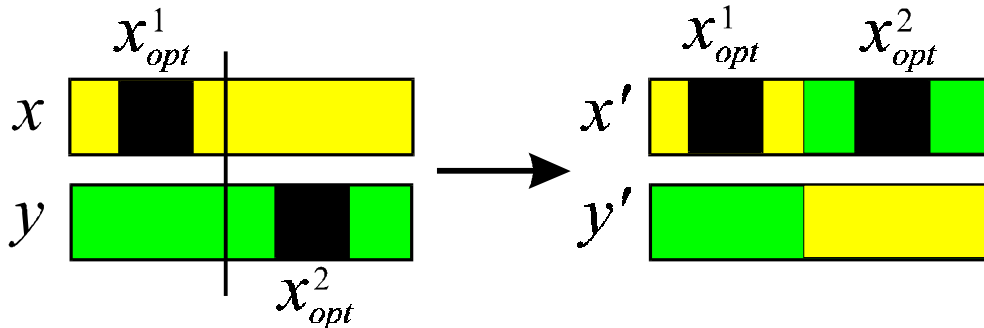
Optimalizačný problém pre funkciu f potom obsahuje dva nezávislé podproblémy

$$\mathbf{x}_{opt} = x_{opt}^1 \oplus x_{opt}^2$$

$$x_{opt}^1 = \arg \min_{x^1 \in \{a, b, c, \dots\}^j} f_1(\mathbf{x}^1)$$

$$x_{opt}^2 = \arg \min_{x^2 \in \{a, b, c, \dots\}^{k-j}} f_2(\mathbf{x}^2)$$

1-bodové kríženie



$$f(\mathbf{x}) > f(\mathbf{x}'), \quad f(\mathbf{y}) > f(\mathbf{x}')$$
$$f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{y}'), \quad f(\mathbf{y}) < f(\mathbf{y}')$$

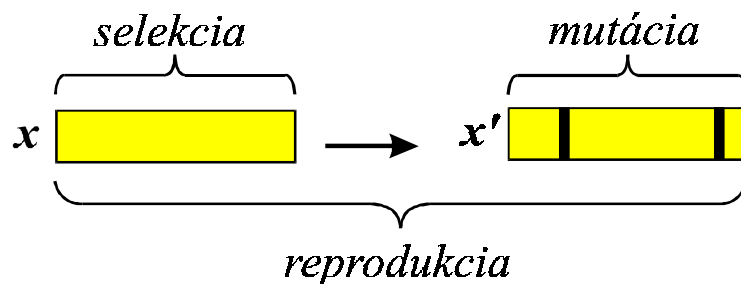
Záver

- (1) V prípade, ak sa gény v chromozóme dajú rozdeliť na dve susedné podskupiny, ktoré navzájom neinteragujú, potom **kríženie urýchl'uje 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 môže obsahovať len mutáciu pri kopírovaní otcovského chromozómu do chromozómu potomka.

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

$$\mathbf{x}' = O_{mut}(\mathbf{x})$$

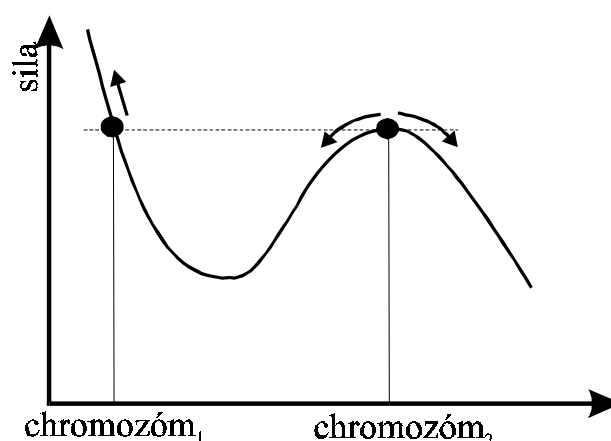


Poznámka: V teórii evolučných algoritmov existujú dva „antagonistické“ tábory, ktoré sú charakterizované tým, či sú **za** alebo **proti** zahrnutiu kríženia do procesu reprodukcie. Prvý tábor reprezentovaný napr. Hollandom (genetické algoritmy) verí, že kríženie patrí medzi základné črty evolučných algoritmov, jeho odstránenie redukuje evolučné algoritmy na slepé stochastické optimalizácie. Druhý tábor reprezentovaný napr. Fogelom (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.

II. Učenie a evolúcia – **Baldwinov efekt**

- ◆ V r. 1896 Baldwin rozšíril Darwinovu evolučnú teóriu 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** a preto je len s výhradami akceptovateľný evolučnou biológiou ako dôležitý faktor pre hlbšie pochopenie mechanizmov evolučného procesu. Predstava o ovplyvňovaní evolúcie fenotypovým procesom, akým je učenie, automaticky evokuje Lamarckov názor na evolúciu, podľa ktorého vlastnosti fenotypu získané adaptáciou sú dediteľné potomkami (svaly kováča dedia jeho deti !?!).

- ◆ Ortodoxný evolucionistický názor je, že zmeny fenotypu agenta získane 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: **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.**



$$F(\text{chromozóm}_1) > F(\text{chromozóm}_2)$$

Formalizácia Baldwinovho efektu

- 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.
- Sila 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 \mathbf{x} optimalizačného problému - v jeho blízkom okolí existuje iné lepšie riešenie \mathbf{x}' ,

$$f(\mathbf{x}) > f(\mathbf{x}')$$

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

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

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

$$(f(\mathbf{x}) > f(\mathbf{x}')) \Rightarrow (F(\mathbf{x}) \leftarrow F(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}'))$$

Jednotlivé etapy agenta v priebehu jednej generácie

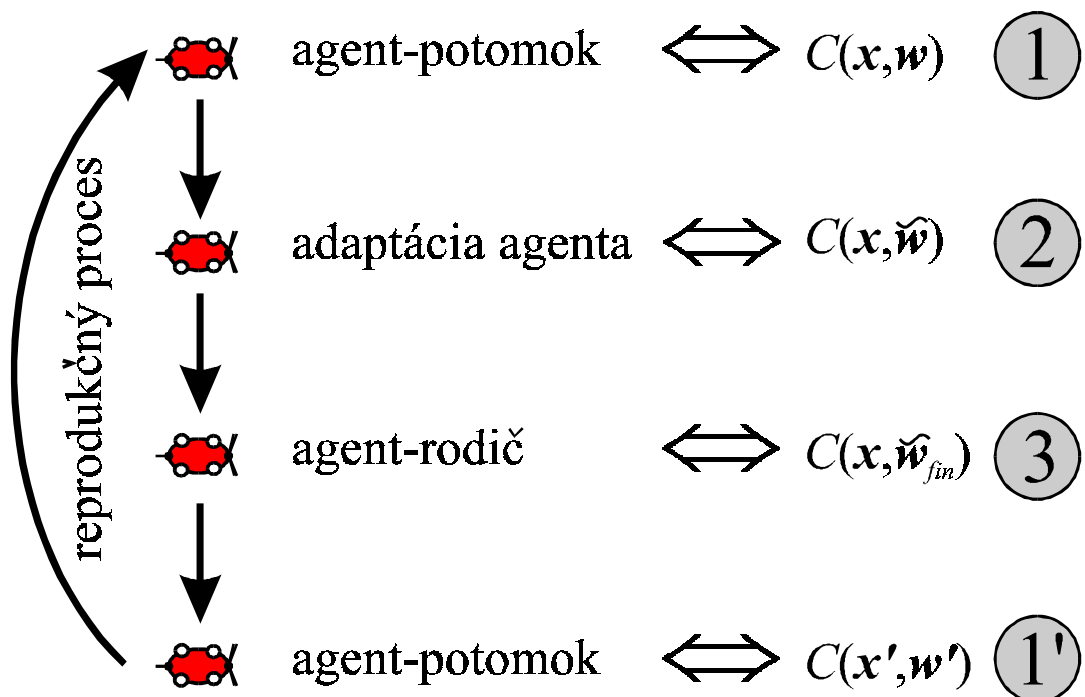
- (1) Nech $C(x;w)$ je kognitívny orgán agenta s chromozómom x , pričom parametre kognitívneho orgánu sú označené w , počiatočné hodnoty parametrov sú plne určené chromozómom x .

(2) 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.

(3) Záverečné hodnoty parametrov označíme \tilde{w}_{fin} . Takto adaptovaný agent môže vstupovať do reprodukčného procesu, stáva sa rodičom.

(1') Vzniknutý potomok dedí len pôvodný chromozóm x v ľahko zmutovanej forme x' a nové počiatočné hodnoty parametrov w' sú určené novým chromozómom x' .

Schematické znázornenie jednotlivých etáp agenta v priebehu jednej generácie



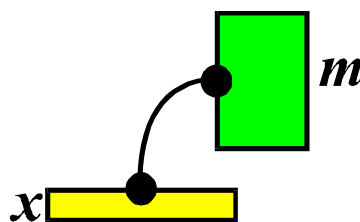
Parameter w' potomka nemá nič spoločné s adaptovanými parametrami \tilde{w}_{fin} rodiča

Zhodnotenie významu Baldwinovho efektu

- Baldwinov efekt je založený na existencii **kognitívneho orgánu**, ktorý je schopný jednoduchých kognitívnych aktivít – **učenia**.
- Agenti schopní efektívnejšieho učenia sú ohodnotení **väčšou silou** ako agenti s malou efektivitou učenia.
- Užitočná informácia, ktorá je predmetom učenia a je nemenná, môže byť prirodzeným výberom **geneticky zafixovaná**.

III. Kultúra a evolúcia. Dawkinsove mémy

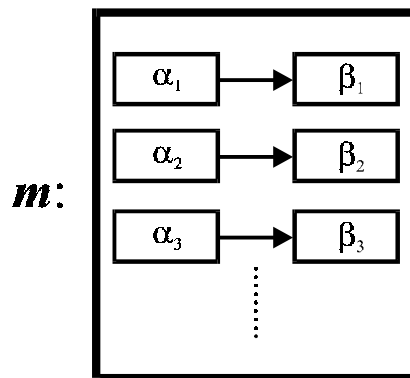
- ◆ Očakávanie, že dôležitá komplexná informácia pre úspešné prežitie agentov, ktorá je nemenná v priebehu mnohých generácií evolúcie, bude geneticky zafixovaná pomocou Baldwinovho efektu je **nereálne**.
- ◆ Koncept **mémov** bol zavedený Dawkinsom v jeho slávnej knihe „*The Selfish Gene*“ ako informácie a/alebo správy, ktoré zvyšujú silu chromozómov. V tomto prístupe sila 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 tvoria „životný priestor“ pre existenciu chromozómov.
- ◆ Agent je reprezentovaný dvojicou x/m (ktorý budeme nazývať **m-chromozóm**), kde x je chromozóm a m je mém.



Formálna štruktúra mému

- Pod mémom budeme rozumieť množinu pravidiel typu *if...then...*

$$m = \{ \alpha \Rightarrow \beta_{req} \} = \{ \alpha / \beta_{req} \}$$



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 silu agenta.

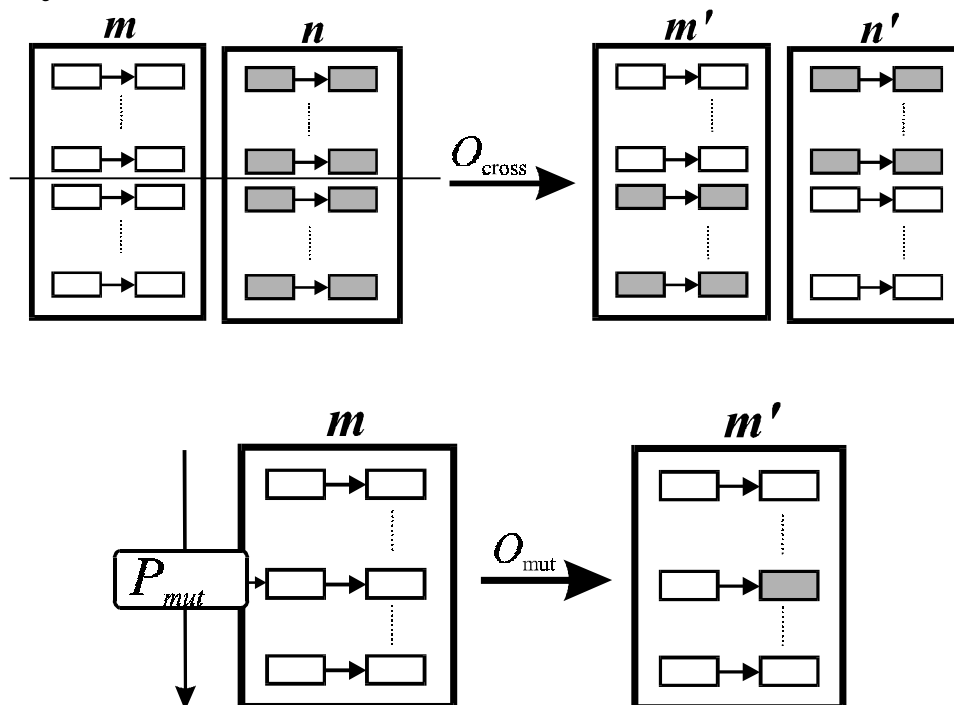
- Všetky mémy majú rovnaké ľavé strany pravidiel, ktoré tvoria **tréningovú množinu**

$$A = \{ \alpha \}$$

- **Kognitívny orgán** agenta $C(x,w)$ je interpretovaný ako **zobrazenie**, ktoré každému argumentu α priradí jeho obraz β (tvoria pravidlo $\alpha \Rightarrow \beta$), formálne

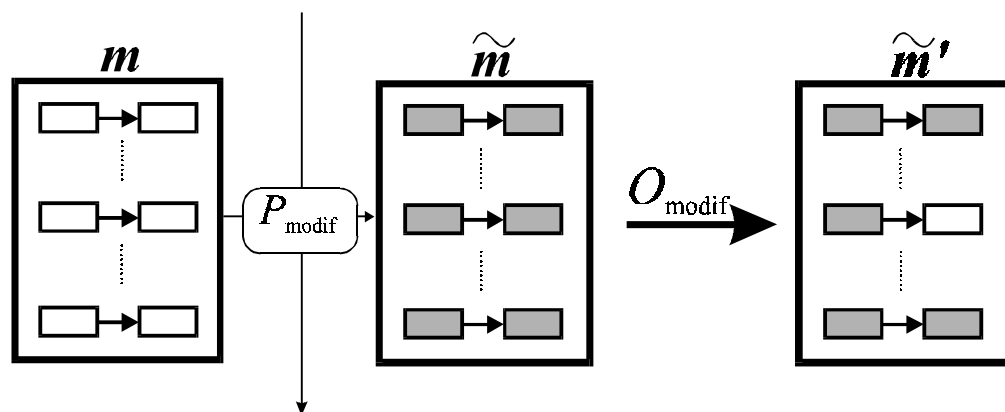
$$\beta = C(x,w;\alpha).$$

- 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 aplikovaná nielen na chromozómy, ale aj pre mémy m a n .



- Podľa Dawkinsa, mémy môžu „preskakovať“ z jedného agenta na iného agenta. Implementácia tejto predstavy sa realizuje pomocou „interakcie mémov“, ktorá je určená takto:

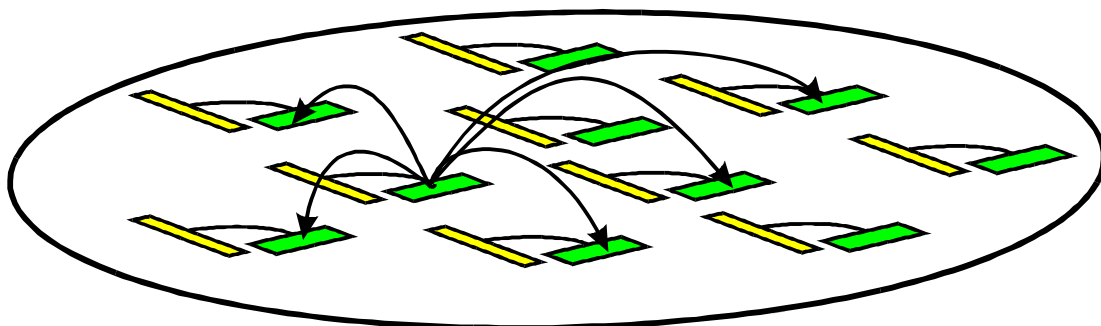
- (1) Kvázináhodne sa vyberie agent s veľkou silou, tento je reprezentovaný m -chromozómom x/m .
- (2) Náhodne vyberieme podpopuláciu $P' = \{\tilde{x}/\tilde{m}\} \subseteq P$ agentov, ktorým sa ponúkne mém m . Interakcia medzi vybraným mémom m a mémom agenta z podpopulácie P' sa realizuje operáciou 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

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

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.



Scenár životného cyklu m-chromozómov

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

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

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 $C(\mathbf{x}, \mathbf{w}_{fin})$.

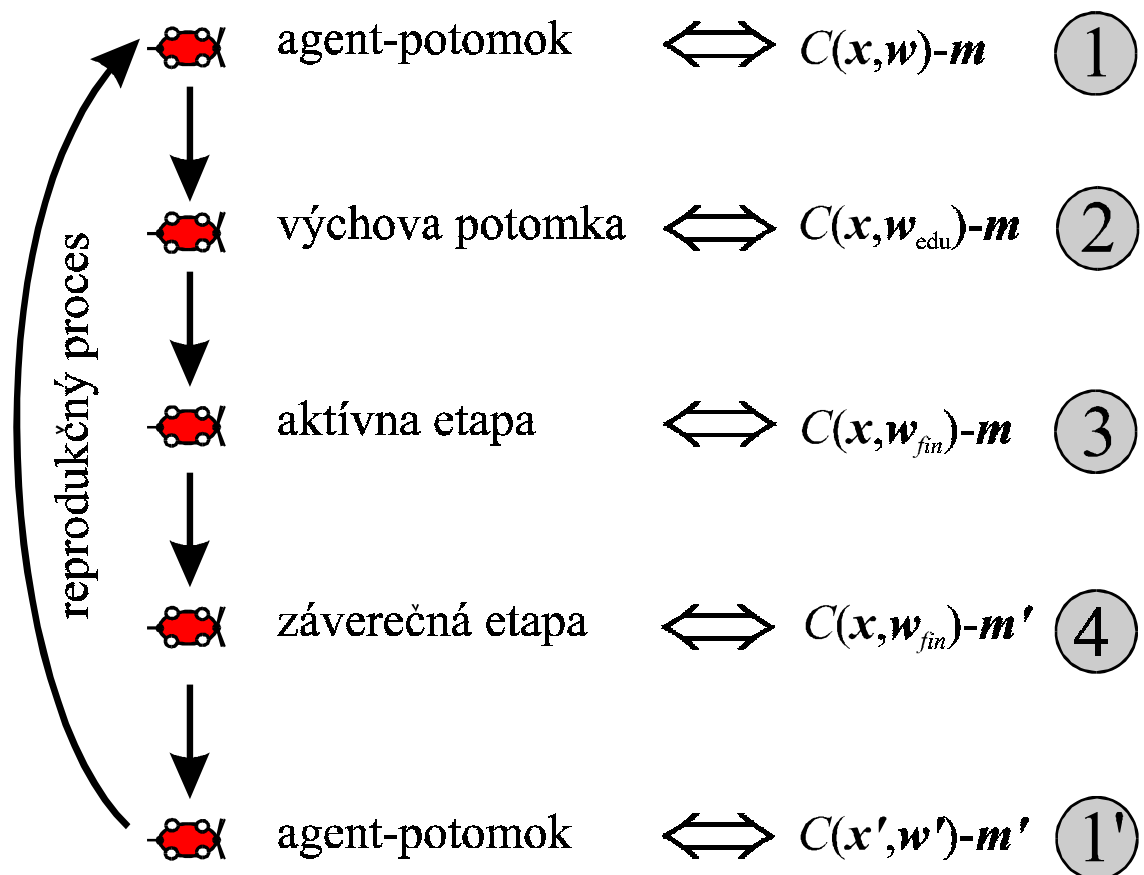
4. etapa. Na záver aktívneho života agent modifikuje svoj mém m , ktorý dostal od svojich rodičov, vytvára nový mém

$$m' = \{ \alpha \Rightarrow \beta_{req} = C(\mathbf{x}, \mathbf{w}_{fin}; \alpha) \}$$

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 interkciou tak, že vybraný mém m „preskočí“ na m' .

1'. etapa. Agent bol vybraný do reprodukčného procesu, vzniká nový potomok, ktorý je reprezentovaný chromozómom $\mathbf{x}' = O_{repro}(\mathbf{x})$, jeho kognitívny orgán má tvar $C(\mathbf{x}', \mathbf{w}')$, kde parametre ' sú plne určené chromozómom \mathbf{x}' .

Schematické znázornenie jednotlivých etáp agenta v priebehu jednej generácie



Poznámka: Mém m' odzrkadluje nielen skúsenosti daného agenta ale aj jeho bezprostredných predkov a do určitej miery (prostredníctvom mémovej interakcie) tiež aj celej populácie.

Zhodnotenie významu Dawkinsovových mémov

- 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...else....* Mémy sa nevyskytuje samostatne, ale vždy len vo dvojici s príslušným chromozómom.
- Mém interaguje s chromozómom nepriamo, prostredníctvom učenia kognitívneho orgánu agentov ovplyvňuje ohodnotenie chromozómov silou.
- Mém reprezentujú určitú sumu informácie – vedomostí, ktoré dostane agent – potomok od svojho rodiča. Táto informácia je už tak komplexného charakteru, že nemôžeme očakávať je genetickú fixáciu pomocou Baldwinovho efektu. Môžeme povedať, že mémy sú vhodným negenetickým transferom informácie z rodičov na potomkov.

IV. Tri etapy Darwinovej evolúcie

Podľa spôsobu ohodnotenia chromozómov silou môžeme rozlišovať nasledujúci tri etapy:

1. etapa. Sila chromozómov je určená len polohou chromozómu na povrchu sily, t.j. je určená výlučne len zložením chromozómu, žiadne iné efekty nie sú zahrnuté pri ohodnotení chromozómu silou. Tento prístup v informatike je reprezentovaný štandardnými evolučnými algoritmami, kde chromozóm je priamo zobrazený na kladné reálne číslo – sily, bez prechodných alebo skrytých úvah.
2. etapa. **Baldwinov efekt** sa podieľa na ohodnotení chromozómov silou. Sila chromozómov je ovplyvnená najbližším okolím chromozómu na povrchu sily. Agenti sú schopní učenia v ktorom sa prehľadáva najbližšie okolie chromozómov na povrchu sily.
3. etapa. Sila chromozómu je určená nielen najbližším okolím na povrchu sily ale tiež aj **mémami**, ktoré sú nositeľmi informácie, ktorá je dôležitá pre prežitie a reprodukciu agentov populácie.