

## 9. kapitola

# Umelý život

### 9.1. Čo je to umelý život?

Otázka je, **čo je to vlastne umelý život** ("Artificial Life"). Pretože definícia tejto novej exponenciálne sa rozvíjajúcej vednej oblasti nie je vôbec jasná, dá sa umelý život definovať skôr tým, čo doňho rôzni ľudia zahrňajú. Najčastejšie ide o simuláciu životných prejavov jednotlivcov alebo skupín. Umelý život zasahuje do viacerou už zavedených oblastí, okrem biológie a informatiky aj do fyziky, sociológie, psychológie, ekonómie (modelovaní situácií kedy si firmy konkurujú alebo kedy spolupracujú, zapojenie teórie hier, riadenie priemyselných komplexov) a filozofie. Témou umelého života sa zaoberajú tak populárne vedecké knihy [1-4], vedecké knihy [5], ako aj početné odborné konferencie [6-14] a časopisy [15-18]. Centrom aktivít skupín pracujúcich v "umelom živote" je USA, presnejšie povedané inštitút v Santa Fe, laboratóriá Los Alamos a MIT, a Japonsko. No v Európe sa tiež v tomto smere niečo robí [19-21].

V zásade sa vydeľujú dva prístupy k tejto téme.

Prvý je vizionársky, tvrdiaci že umelý život znamená vytvorenie a vylepšovanie účinnosti **nových foriem života**, iba v inom médiu ako sú uhľovodíky, teda väčšinou na báze silikónových čipov v počítačoch (ako napr. počítačové vírusy), alebo v "železe" predstavovanom (nano)robotmi. Proces biologickú evolúciu viedol k genotypu, vytvárajúcemu fenotyp, schopný manipulovať s vlastným genotypom priamo: kopírovať ho, meniť alebo vytvárať celkom nový. Tento prístup síce funguje zatiaľ iba u umelého života prezentovaného počítačovými programami, no pri terajšom prudkom rozvoji biotechnológií a génových manipulácií možno predpovedať, že v polovici budúceho storočia už môže byť reálny aj "biologický" umelý život (teda pokiaľ ako taký nebudeme brať do úvahy už dnes vytvárané rastlinné druhy s geneticky vnesenou informáciou pre vytváranie protilátok proti škodcom, alebo produkujúce látky použiteľné ako vakcína proti cholere či malárii). Spolu s týmto prístupom sa prelína s opačnej strany aj "technizácia" ľudského života, od existujúcich transplantátov končiacich reagujúcich na nervové povely alebo "pacemakerov" v srdcu až po ešte vzdialenú možnosť priameho napojenia človeka na počítač, doposiaľ realizovanú iba primitívnymi prostriedkami virtuálnej reality.

Druhý, viac "prízemný" smer tvrdí, že cieľom umelého života je vypracovať nové metódy pre **štúdium života**, vedúce k lepšiemu pochopeniu tohto biologického fenoménu. Umelý život poskytuje možnosť robiť experimenty, ktoré by boli v tradičnej biológii extrémne komplikované alebo nemožné. Výhodná je tu možnosť presne opakovať experiment a tiež rýchlosť simulácií v porovnaní s experimentmi. Zatiaľ čo klasická biológia sa snaží život analyzovať, umelý život smeruje k syntéze aspoň niektorých črt života zo základných vlastností živej hmoty. Základným rysom tohto oboru je formulovanie základných pravidiel správania sa jednotlivých "organizmov" a ich replikácie, pričom cieľom je dosiahnuť evolúcie organizmov rovnako ako vzťahov medzi organizmami ("emergent behavior") ako je súperenie, spolupráca alebo treba parazitizmus a vzťah dravec-korist', vývoj druhov. Veľa práce je smerované k počítačovej simulácii umelých bytostí a umelých svetov, v ktorých tieto bytosti žijú. Predmetom štúdia je teda nielen napodobovanie pozemského života, ale aj simulácia, ak by život mohol vyzeráť za iných podmienok.

Zakladateľ umelého života Christopher Langton [6] definuje umelý život ako štúdium umelých systémov ktoré vykazujú správanie charakteristické pre prírodné živé systémy: samoorganizáciu, adaptáciu, evolúciu, ko-evolúciu, metabolizmus ... Je to hľadanie vysvetlenia života v akejkoľvek forme, bez ohľadu na špecifické príklady, ktoré sa vyvinuli na Zemi. To zahŕňa biologické a chemické experimenty, počítačové simulácie, a čisto teoretické rozbor. Subjektom výskumu sú procesy prebiehajúce na molekulárnej, sociálnej a evolučnej úrovni. Cieľom je extrahovať logickú formu organizácie živých systémov a pokusne abstrahovať základné princípy vývoja.

Vytvorením týchto procesov odzovom v iných fyzických médiách (ako v počítačoch) ich sprístupňuje novým druhom experimentálnej manipulácie a testovania. Popritom evolúcia hardware a syntetická evolúcia v chémii pre farmakológiu sú zaujímavé aj priamo pre prax. Na druhej strane populácie dátových štruktúr v počítači sú použité k reprezentovaniu biologických jedincov (dravca a koristi, mravcov, buniek apod.). Vo väčšine príkladov umelého života populácie dátových štruktúr nereprezentujú priamo žiaden žijúci organizmus alebo proces, ale skôr sa podriaďujú umelo vytvoreným zákonom abstrahovaným zo zákonov platných pre živé organizmy. Najväčší nadšenci popritom tvrdia, že tieto dátové štruktúry sú fakticky živé. Steven Levy [1] dôvodí takto: "Život je dynamický fyzikálny proces, a keď dokážete duplikovať tieto procesy na inak neživom

materiále - stvorili ste život. Ten môže byť nezávislý na materiálu. Môže dokonca vzniknúť v počítači." Vzhľadom k tomu, že dosiaľ neexistuje žiadna celkom kvalitná definícia života, je toto tvrdenie zdrojom búrlivých diskusií.

## 9.2. Definície života

Základnou otázkou, na ktorú nevieme odpovedať, je teda už tá počiatočná: **ako definovať život?** Na to, že už s touto otázkou budú problémy, prišli v 50-tých rokoch vedci, chystajúci sa hľadať život vo vesmíre, ktorí zrazu zistili, že nedokážu definovať, čo vlastne hľadajú. Samozrejme, bolo veľa definícií, no všetky mali svoje výnimky a obmedzenia. Napríklad: život musí byť schopný sebareprodukcie - mul (sterilný kríženec kobyly a osla, ktorý nie je principiálne schopný ďalšieho rozmnožovania) teda nie je živý?

Vlastnosti definujúce život môžu byť napr. nasledujúce:

1. Život je skôr určitý vzor v čase a priestore, ako špecifický materiálny objekt.
2. Je schopný sa reprodukovať, nech už sám, alebo s pomocou hostiteľského organizmu.
3. Obsahuje informáciu, pomocou ktorej je vybudovaný.
4. Obsahuje metabolizmus premeny jedného druhu hmoty na iný spojený s produkciou energie.
5. Funkčne interaguje s okolím.
6. Jeho časti sa navzájom funkčne dopĺňajú.
7. Je stabilný v meniacom sa prostredí.
8. Je schopný sa vyvíjať.
9. Rastie alebo expanduje.

Obrazy organizmu ako stroja a stroja ako organizmu sú staré stáročia. No až teraz sa obidva tieto obrazy pomaly začínajú prekrývať.

Základnými vlastnosťami života, ktoré sa snažíme vytvoriť umelo sú sebareplikácia, samostatné rozhodovanie = seba-riadenie, limitovaná seba-obnova, evolúcia a učenie. Týmto približujeme stroje živým organizmom. No zatiaľ sa nedarí napodobniť všetky tieto vlastnosti naraz. Väčšina príkladov umelého života sa zameriava na simuláciu aspoň jednej vlastnosti charakteristickej pre život. V obecnom hľadisku môže príkladom životu podobných výtvorov slúžiť celosvetová telefónna sústava, vývoj počítačových vírusov, virtuálna realita v počítači, alebo počítačové modely rozvoja ekonomie a/alebo ekológie. Priemysel smeruje k používaniu na biologických princípoch založených metód, lebo potrebujú menej materiálu, sú menej energeticky náročné, a zložitost' vytváraných vecí a procesov dosahuje hraníc biologickej previazanosti.

Na druhej strane narábanie s genetickým inžinierstvom, aj keď po stáročia prakticky prevádzané šľachtiteľmi ovocia alebo holubov či hovädzieho dobytká, robí život až teraz inžiniersky spracovateľným.

Živé systémy majú vnútornú štruktúru vykazujúcu niekoľko základných vlastností:

- Absenciu striktného centrálného riadenie
- Čiastočnú autonómiu nižších podštruktúr
- Vysokú úroveň prepájania medzi podštruktúrami
- Nelineárne vzájomné ovplyvňovanie podštruktúr v sieti

Z týchto vnútorných vlastností potom vyplývajú vonkajšie vlastnosti živých systémov:

- adaptabilita (v rámci učenia jedného živočícha, drobné "taktické" zmeny)
- vývoj (v rámci druhu, zmena základných génových vlastností, alebo zmena celkového zamerania vývoja - z adaptácie génov k adaptácii kultúry)
- odolnosť spôsobená redundanciou
- schopnosť narastania systému bez nutnosti meniť jeho základné vlastnosti (křdeľ vtákov alebo kobyliiek môže narastať rádovo bez nutnosti meniť systém správania sa - jediná topológia schopná neobmedzeného rastu a neriadeneho učenia je sieť)

Vývoj je podporovaný prepájaním jednotlivcov s exponenciálnym nárastom možných kombinácií tohto prepájania a zároveň variácie jednotlivcov, akokoľvek väčšinou nevýhodné pre jednotlivcov, v dlhodobom merítke sú výhodné pre druh ako celok - keď je 99% variácií neúspešných, zvyšné úspešné percento sa rozšíri do celého druhu.

No tento systém má zároveň aj neodstrániteľné nedostatky:

- neoptimálnosť - vzhľadom k tomu, že je systém určený pre neustále sa meniace podmienky, neustále hľadanie výhodnejších ciest a kontrola novej zmeny podmienok znižuje jeho výkonnosť vtedy, keď sú podmienky stabilné a systém našiel optimum.
  - nekontrolovateľnosť - zložité systémy sa nedajú pre svoju zložitosť priamo riadiť, ich riadenie je možné iba okľukou. Prítomnosť "emergentného" správania sa vylučuje priame riadenie.
  - nepredviedateľnosť - keďže systém nedokážeme dokonale chápať a riadiť, nemôžeme ani na 100% predpovedať jeho správanie sa
  - dlhé a postupné budovanie systému, nutný vývoj potrebuje čas
- Živý systém využíva pri učení drobné chyby, čo mu umožňuje vyhnúť sa väčším zlyhaním.

Štúdie zložitého správania sa, vychádzajúceho z jednoduchých pravidiel, sľubujú byť základom pre štúdie komplikovaného kolektívneho správania sa zložitejších organizmov, ktoré by mali schopnosť je tiež lepšie pochopiť a predpovedať. Ďalším cieľom je rozvoj nových metód pre distribuované výpočty.

Popritom objavené princípy môžu byť užitočné aj pre praktické účely softwarovej evolúcie inteligentných robotov, nanotechnológie (robotiky a výroby počítačových komponent alebo napríklad lekárskeho "nástroja" na molekulárnej úrovni) a robustných a adaptabilných počítačových programov pri vložení života podobných procesov. Predovšetkým týmto praktickejším smerom sa budeme zaoberať v tejto kapitole.

### 9.3. Umelá inteligencia a agenti

Vo vzťahu ku klasickej umelej inteligencii je umelý život orientovaný "opačným smerom". Umelá inteligencia postupuje "zhora nadol", základom je dopredu zadaný komplexný problém s presne stanovenými pravidlami, ako hranie šachov, chápanie textu alebo diagnóza. Program musí byť inteligentný hneď od začiatku, a je na programátorovi, ako toho dosiahnuť. Umelý život na rozdiel od predošlého vzniká "zdola nahor", začína od najjednoduchších elementárnych jednotiek, a postupne sa dostáva k vývoji a emergentným javom. Je určený na "prežitie" v komplexnom prostredí s meniacimi sa podmienkami. Umelý život sa snaží vytvoriť iba základné pravidlá, ktoré budú tak dobre vybrané, že zložité správanie sa (a možno v budúcnosti aj tá "inteligencia") sa vytvorí po čase sama.

Umelá inteligencia a umelý život majú k sebe najbližšie v typu programov nazvaných **autonómny agent** [22,23]. To je program, ktorý obsahuje nejaký druh vnímania okolitého prostredia a na základe týchto informácií ovplyvňuje vlastný stav, stav susedných agentov alebo prostredie samotné. Agent pracuje v operačnom systéme, databáze alebo v počítačovej sieti. Agent alebo zberá informácie alebo ovplyvňuje svoje okolie, individuálne aj "v tímovej práci", a po počiatocnom nastavení pracuje bez ďalšieho ovplyvňovania programátorom. V Amerike má tento prístup nálepku "distribuovaná umelá inteligencia", je programovaný profesionálmi vo veľkom štýle a za veľké peniaze a je zvyčajne sústredený na praktické problémy, kde môže byť použitý napr. v riadení letového prevádzky alebo prevádzky továrne, kedy každý stroj má svojho "agenta" starajúceho sa o dodávky energie, surovín a odvoz hotových produktov.

Zatiaľ najrozšírenejšími príkladmi umelého života (aj keď mnohí by ich za umelý život nepovažovali) sú počítačové vírusy a celulárne automaty (ako najjednoduchší prípad reprezentované Conwayovou hrou "život").

Počítačový vírus [24,25] môže byť považovaný aj za autonómneho agenta. V praxi sa počítačový vírus líši od autonómneho agenta tým, že je jednoduchší a má len jeden hlavný cieľ: rozmnožovať sa a rozširovať do ďalších počítačov. Okrem toho je tu otázka ničivých vedľajších účinkov vírusov. Pre umelý život sú vírusy špeciálne zaujímavé tým, že majú vlastnosti veľmi podobné biologickým vírusom. Akcie vírusov by teoreticky mohli byť aj pozitívne, napríklad udržiavanie integrity databázy.

Základným dôvodom pre to, aby boli počítačové vírusy považované za živé je ich schopnosť autoreplikácie. Počítačový vírus je sekvenciou strojového kódu, ktorá sa skopíruje na jeden či viac "hostovských" programov, keď sú tieto zaktivované. Keď sú tieto infikované programy spustené, kód vírusu je aktivovaný a vírus sa šíri ďalej. Podobne ako biologické vírusy aj počítačové vírusy nie sú schopné "žiť" samotné, potrebujú hostiteľa.

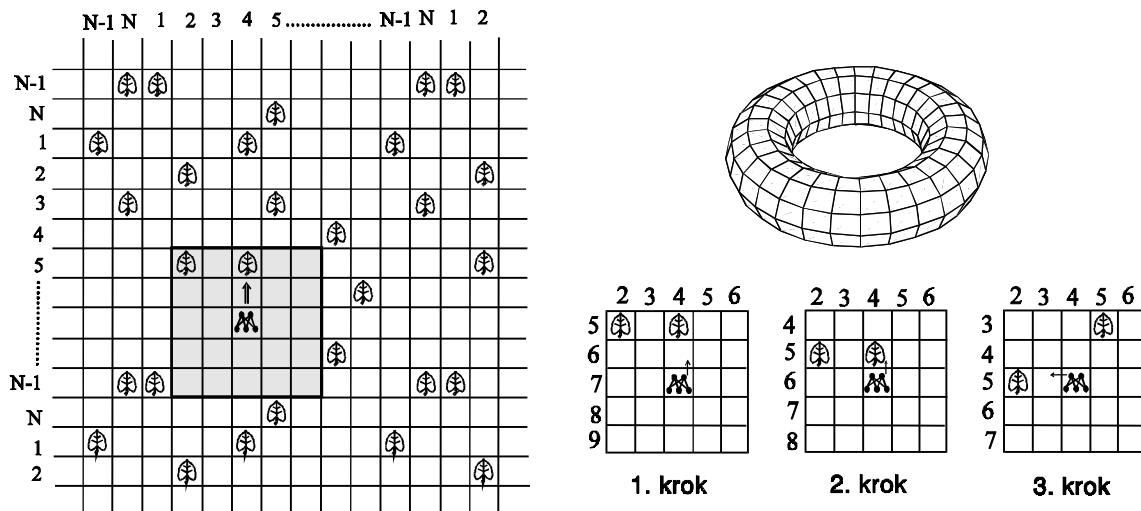
Podobný typ programov, "červy" (worms, Internet Worm 1988) môžu žiť nezávisle a cestovať sieťou. Nepripájajú sa na cudzie programy, a nemusia ani poškodzovať ostatné programy. Teoreticky môžu rôzne časti "červa" bežať na rôznych strojoch.

Základná vlastnosť, ktorá vírusom aj červom chýba, je schopnosť samostatne sa vyvíjať. Vírus, ktorý by toho bol schopný, by musel byť príliš veľký, a teda ľahko rozpoznateľný a zničiteľný antivírusovými programami.

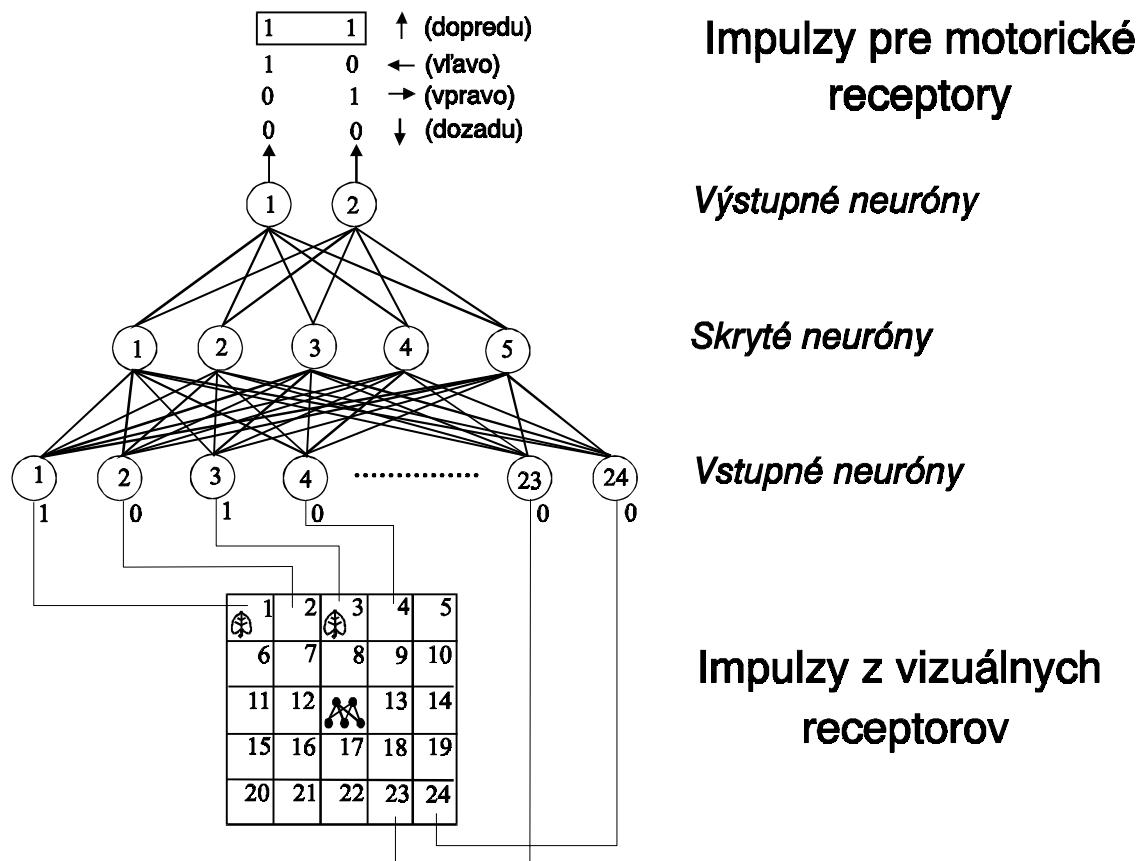
**Virtuálna realita** [26] má tiež blízko k umelému životu. Na rozdiel od umelého života vo virtuálnej realite je užívateľ aktívnym účastníkom procesov v umele vytvorenej simulácii reality, zatiaľ čo v simulácii umelého života jedinci-programy po počiatočnom nastavení zvyčajne už nekomunikujú s užívateľom, ten je potom len pozorovateľom dejov vo virtuálnom svete, do ktorých nezasahuje.

Základom väčšiny simulácií umelého života sú algoritmy dovoľujúce umelým "bytosťami" vyvíjať sa a/alebo meniť svoje prostredie. Každý z týchto algoritmov je vedným oborom sám o sebe zo širokými vedeckými a priemyselnými aplikáciami. Základné algoritmy spadajú do dvoch odvetví: učiace sa algoritmy, reprezentované neurónovými sieťami a evolučné algoritmy, reprezentované predovšetkým genetickými algoritmi.

**Neurónové siete** [27] majú svoju hodnotu samy o sebe ako univerzálne aproximátory a dá sa povedať, že samy predstavujú pole výskumu ďaleko rozsiahlejšie ako v súčasnej dobe umelý život. Pre autonómnych agentov potom neurónové siete predstavujú jednu z možných metód rozhodovania a súčasne učenia sa ako komunikovať s okolitým prostredím alebo rozpoznávať informácie.



**Obrázok 9.1.** Organizmus riadený neurónovou sieťou sa nachádza na pravouhlej mriežke typu  $N \times N$ , a živí sa potravou znázornenou náhodne rozmiestnenými listkami - má za cieľ dostať sa za svoj život (daný počtom horizontálnych alebo vertikálnych krokov na susedné pole) k čo najväčšiemu počtu listkov. Je ale schopný vnímať iba svoje najbližšie (vytíeňované) okolie. Musí teda určiť, kde je najviac najbližších listkov a pohybovať sa tým smerom. Pravouhlá mriežka je stočená do tvaru pneumatiky, aby sa nemohlo stať, že organizmus dojde na okraj mriežky. Vpravo dole sú znázornené prvé tri kroky, pričom predpokladáme, že neurónová sieť vždy rozhodla správne, a organizmus získal jeden listok.



**Obrázok 9.2.** Znáročenie trojvrstvej neurónovej siete organizmu. Vstupné neuróny získavajú signály z vizuálnych receptorov pre okolité políčka (0 pre neprítomnosť listku, inak 1). Skryté neuróny pomáhajú spracovať prijatú informáciu pre výstupné neuróny, ktoré rozhodujú o smere budúceho pohybu organizmu. Spoje medzi neurónmi sú ohodnotené váhami, ktoré tak ovplyvňujú "inteligenciu" neurónovej siete. Takých organizmov je viac, ich úspešnosť v zbere potravy sa ohodnocuje, neúspešné zanikajú a tie najúspešnejšie sa množia, vymieňajú si vzájomne časti "dedičnej informácie" - váhy medzi neurónmi, takže organizmy sa stávajú stále efektívnejšími v zbere potravy.

Veľa aplikácií umelého života vybavuje svoje organizmy neurónovou sieťou, ktorá slúži ako umelý mozog, schopný sa natréňovať z príkladov s dopredu zadaným výsledkom. Typicky je neurónová sieť zostavená zo vstupných neurónov, napojených na informácie získavané z vonkajšieho prostredia, skrytými vrstvami neurónov, robiacimi väčšinu výpočtov, a výstupnými neurónmi, ktoré určujú ďalšiu akciu organizmu-agenta, vid' obr. 9.1 a 9.2. Tréning neurónovej siete potom pozostáva z určovaní sily spojenia medzi jednotlivými neurónmi. To je možné robiť rôznymi prístupmi, medzi iným aj genetickými algoritmi.

Zaujímavé je aj použitie simulátorov umelého života vo výučbe princípov biológie pre deti. Výrazného úspechu tu dosiahol napr. Mitchell Resnick [28]. Najpopulárnejší v tomto ohľade je najskôr program SimLife [29].

**Evolučné algoritmy**, ktorým sme sa venovali v predchádzajúcich kapitolách, potom slúži pre prenos informácií medzi individuami a pre vývoj celej generácie-týmu organizmov-agentov.

## 9.4. Evolúcia pravidiel a Lindenmeyerovy systémy

Okrem genetických algoritmov, programovaní a ďalších metód existujú aj tzv. **Lindenmeyerovy systémy** [30] produkčných pravidiel používaných k modelovaniu rastu a rozvoja organizmov. Tieto systémy sa vyskytujú v mnohých simulátoroch, rovnako ako v počítačovej animácii. Pri simulácii týchto systémov zanedbávame vnútornú štruktúru skúmaných systémov a nahradzujeme ju zjednodušenými pravidlami tak, aby výsledný efekt bol čo najbližší skúmanému biologickému efektu. Príkladom môže byť tvorba "kríka", kde L-systém je daný nasledovnými pravidlami:

Štartovný bod F

$$\text{Produkčné pravidlo } F \rightarrow F [+F][-F] \quad (9.1)$$

F znamená nakresli čiaru (začíname kolmou čiarou zo počiatočného bodu o súradniciach 0,0 do koncového bodu o súradniciach 0,10)

[ znamená zapamätať si súradnice koncového bodu a odpovedajúcu zmenu súradníc

$$dx = x_{\text{koncový}} - x_{\text{počiatočný}}, dy = y_{\text{koncový}} - y_{\text{počiatočný}}$$

] znamená vrátiť sa na zapamätané súradnice bodu a odpovedajúce dx a dy

+ znamená otočiť sa doľava (použili sme prepis pre súradnice nového bodu

$$x_{\text{koncový}} = x_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\cos(40^\circ) dx - \sin(40^\circ) dy)$$

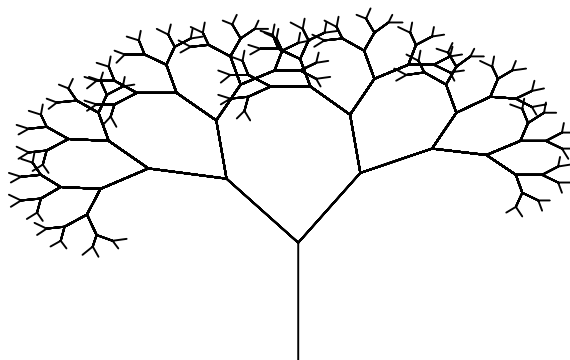
$$y_{\text{koncový}} = y_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\sin(40^\circ) dx + \cos(40^\circ) dy) \quad (9.2)$$

- znamená otočiť sa doprava (použili sme prepis pre súradnice nového bodu

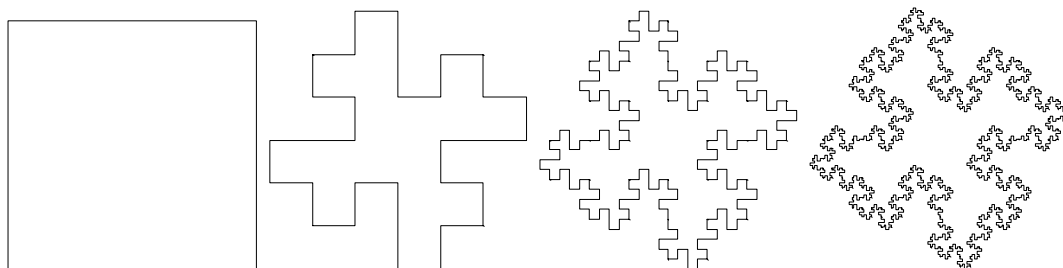
$$x_{\text{koncový}} = x_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\cos(33^\circ) dx + \sin(33^\circ) dy)$$

$$y_{\text{koncový}} = y_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\sin(33^\circ) dx - \cos(33^\circ) dy) \quad (9.3)$$

Pre obrázok 9.3 sme použili rekúziu pravidiel do úrovne 7. Fraktálovú štruktúru vytvorenú pomocou trocha pozmenených pravidiel môžeme vidieť na obr. 9.4.



**Obrázok 9.3.** Lindenmayerov systém daný rovnicou 9.1 interpretovaný ďalej uvedenými pravidlami a rovnicami 9.2 a 9.3, s rekúziou do úrovne 7.



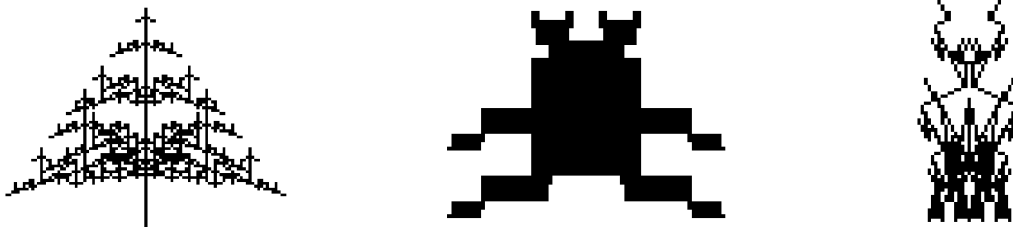
**Obrázok 9.4.** Lindenmayerov systém pre štartovný bod  $F+F+F+F$ , produkčné pravidlo  $F \rightarrow F+F-F-FF+F+F-F$ . Úhol otáčania bude  $90^\circ$  a zmenšenie sa použije iba pri rekúzii. Dostávame tzv. Kvadratický Kochov ostrov [31], čo je fraktálová štruktúra (môžeme ísť s rekúziou ľubovoľne hlboko, a pokiaľ dostaneme zobrazený odsek obrázku bez daného merítka, nie je možné povedať, aký veľký je to odsek). To je podobné ako u predchádzajúceho stromu, pokiaľ dostaneme obrázok odrezaného konca vetvičky bez merítka, nie je možné povedať, či rekúzia na obr. 9.3 išla do 7 úrovne alebo do milióntej.

**Príklad 9.1.** Vytvorte obdobný trojrozmerný stromček, kde jednotlivé vetvi sa nebudú skracať faktorom 0.7, ale náhodným číslom s gaussovským rozložením pravdepodobnosti so stredom napr. v 0.7, kde aj hrúbka kmeňa sa bude zmenšovať a bližšie vetvi budú vyzeráť tlstšie, kde uhly vetví v priestore tiež budú dané náhodne. Vyskúšajte aj iné produkčné systémy, napr. počet vetví bude daný náhodným číslom od 2 do 3.

Netypickým prístupom u výberové funkcie evolučných algoritmov je estetické kritérium, ako ho napr. uplatňuje Karl Sims pri generovaní obrázkov [32]. Sims [33] tiež použil genetický systém k vývoji "umelých bytostí" zložených z blokov, spojených kĺbmi, poháňaných svalmi a riedených "obvodmi". Tieto umelé bytosti boli potom testované na schopnosť pohybovať sa po povrchu, skákať, plávať apod., pričom sa vyvinula veľká variabilita bytostí a nových typov pohybov.

V skutočnosti začal s podobným vývojom obrázkov "bytostí" zoológ Richard Dawkins [34] v svojej populárnej knižke "Blind Watchmaker". Tieto "bytosti" sa volali 'Biomorph' podľa surrealistických zvieratám

podobným obrázkom Desmonda Morrise. Pomocou náhodných mutácií sa vždy vytvorila sada obrázkov, z ktorých si užívateľ vybral ten, čo sa mu najviac páčil, a z toho bola generovaná ďalšia sada. Tieto stromom podobné štruktúry boli zakódované vo forme génov, kódujúcich uhol vetvenia, dĺžku vetví, hĺbku rekurzie, tvar ako priamka, ovál, obdĺžnik apod. Takto vznikli napr. nasledujúce obrázky ihličnatého stromu, žaby alebo samuraja, vid'. obr. 9.5.



**Obrázok 9.5.** Strom, žaba a samuraj, obrázky vytvorené algoritmom založeným na rekurzii a pravidlách podobných Lindenmayerovým systémom, kde sú ale pravidlá zakódované chromozómami, ktoré prechádzajú drobnými zmenami. Užívateľ má napr. na výber z 8 možných obrázkov, a ten, ktorý si vyberie, tvorí základ pre ďalších 8 obrázkov vytvorených pomocou náhodne pozmenených pravidiel. Po niekoľkých desiatkach cyklov výberov sa potom dajú získať zaujímavo vyzerajúce obrázky.

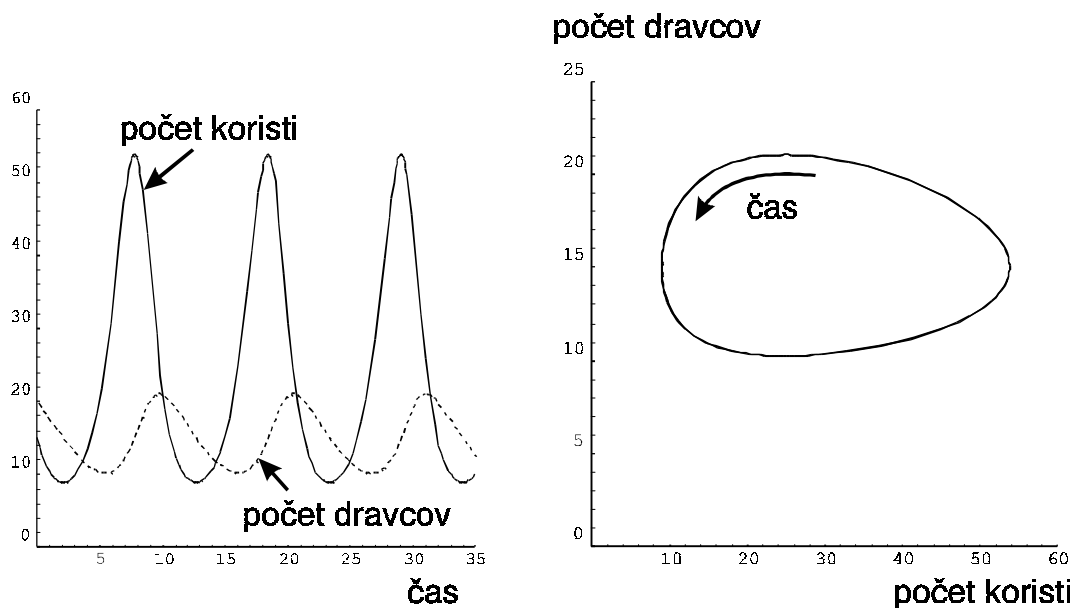
## 9.5. Evolučná dynamika a modelovanie krídľa

Skôr analytickému spôsobu riešenia problémov sa venuje ekologická a **evolučná dynamika**. Jedným z najznámejších príkladov je najskôr vzťah dravec-korist', vyjadrený Lotka-Volterrovou rovnicou [35-37]. Ide o vyjadrenie vzťahu medzi počtom dravcov a počtom lovej zveri v závislosti na čase. Ideálne by tieto počty mali byť stabilné, no pri určitej efektívite útokov dravcov a rozmnožovaní dravcov aj koristi nastávajú oscilácie množstva koristi, nasledované osciláciami počtu dravcov. Dá sa to vysvetliť nasledovne: pri počiatkovej chorobe sú dravci zdecimovaní a koristi sa premnožia. Dravci potom majú veľa koristi, bez problémov sa môžu (po zániku choroby) rozmnožovať a ich počet sa tak zväčší ešte výraznejšie ako množstvo koristi. Teraz sú zasa premnožení dravci, ktorým sa podarí natoľko zredukovať množstvo koristi, že sami začnú umierať hladom. Oscilácie množstva koristi a dravcov sa potom opakujú už bez nutnosti počiatkovej odchýlenia počtu dravcov z rovnovážneho stavu nejakou chorobou. Takéto oscilácie možno napríklad pozorovať u počtov ulovených králikov a rysov vo viac ako storočie starých záznamoch Hudson's Bay Company, kedy sú maximá počtov ulovených králikov vzdialené od seba vždy desať rokov, nasledované maximami počtov ulovených rysov.

Nech  $N_1(t)$  je počet kusov koristi (alebo hostiteľa), a  $N_2(t)$  je počet kusov dravcov (alebo parazitov) v čase  $t$ . Predpokladajme, že za neprítomnosti dravcov sa koristi rozmnožuje rýchlosťou  $r_1$  zatiaľ čo za absencie koristi dravci hynú rýchlosťou  $r_2$ . Nech  $b_1$  odpovedá schopnosti dravcov požívať koristi a  $b_2$  vplyv množstva koristi (a teda nasýtenia dravcov) na ich rozmnožovanie. Najjednoduchšie vyjadrenie je potom

$$\begin{aligned} dN_1(t)/dt &= N_1(r_1 - b_1 N_2) \\ dN_2(t)/dt &= N_2(-r_2 + b_2 N_1) \end{aligned} \quad (9.4)$$

Nech  $r_1 = 1.5$ ,  $b_1 = 0.1$ ,  $r_2 = 0.25$ ,  $b_2 = 0.01$  a  $N_1(0) = 15$  a  $N_2(0) = 20$ . Potom môžeme znázorniť priebeh zmien počtov dravcov a koristi v závislosti na čase na jednom grafe, vid' obr. 9.6, kde počet dravcov je vyznačený čiarkovane, počet kusov koristi plnou čiarou. Druhý graf zobrazuje vzájomnú závislosť počtu dravcov a kusov koristi, kde sa tieto počty pohybujú v čase po zobrazenej trajektórii stále dookola.



Obrázok 9.6. Prvá závislosť ukazuje oscilácie počtu dravcov a množstva koristi na čase, druhý obrázok je trajektóriou sústavy diferenciálnych rovníc (9.4).

Takýto priebeh vzájomného ovplyvňovania dvoch živočíšnych druhov sa dá modelovať nie len diferenciálnymi rovnicami, no aj počítačovým experimentom, kedy vytvoríme na mriežke dravcov a koristi, pričom koristi sa rozmnožuje stabilnou rýchlosťou, zatiaľ čo rozmnožovanie dravcov závisí na hustote koristi.

Pre názornosť ale najskôr uvedieme príklad simulácie populačného procesu jedného druhu. Keď zanedbáme takmer všetko včítane plošného rozšírenia druhu, dostávame iba dva procesy" zrodenie a smrť.

Keď predpokladáme, že príliš veľká populácia má inhibičný efekt na ďalší rast, a tento inhibičný efekt je lineárny, pre zmenu počtu populácie  $N$  dostávame pre nejaké kladné konštanty  $r$  a  $s$  Verhulst-Pearlovu logistickú rovnicu, rozpracovanú v [37]. Verhulst túto rovnicu navrhol už r. 1838 [38], no bola ignorovaná až do roku 1920, kedy ju Pearl a Reed znovu objavili [39]

$$dN / dt = N(r - sN) \quad (9.5)$$

Táto rovnica by mala ideálne fungovať napr. pre kultúru kvasiniek, no prekvapujúco dobre funguje aj pre oveľa zložitejšie problémy. Túto rovnicu si môžeme rozdeliť na rýchlosť rastu  $B(N)$  a vymierania  $D(N)$ , kedy

$$dN / dt = B(N) - D(N) = N[(a_1 - a_2) - (b_1 + b_2)N] \quad (9.6)$$

kedy  $r = a_1 - a_2$  a  $s = b_1 + b_2$  pre kladné konštanty  $a_1, a_2, b_1, b_2$  a môžeme písať

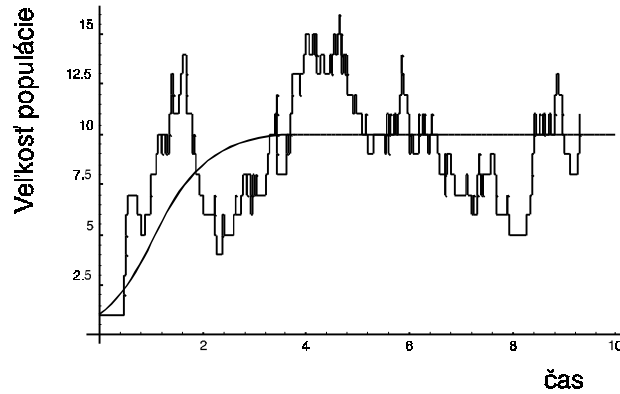
$$B(N) = N(a_1 - b_1N) \text{ a } D(N) = N(a_2 + b_2N) \quad (9.7)$$

Pretože rýchlosť rastu populácie  $B(N)$  nemôže byť záporná, vyplýva z toho, že  $1 \leq N \leq a_1/b_1$ . Čas  $S$  medzi jednotlivými udalosťami, teda zrodením alebo smrťou v populácii je nepriamo úmerný súčtu rýchlostí rastu a vymierania. V simulácii obsahuje tiež náhodnú premennú  $Y_2$  s uniformnou distribúciou z intervalu  $(0, 1)$ , teda

$$s = \frac{-\ln Y_2}{B(N) + D(N)} \quad (9.8)$$

Na rozdiel od deterministického modelu, stochastický model má sice rovnovážny stav, no po čase stochastickými zmenami populácia vymrie. U deterministického modelu sa berie veľkosť populácie ako reálne číslo, ktoré pri daných parametroch rovnice nikdy nemôže klesnúť na nulu. U stochastického modelu je veľkosť populácie celé číslo, a keď sa náhodou dostane na nulu, už sa z nej nikdy nedostane. Stochastický model je opísaný algoritmom 9.1, ktorého výsledok je na obr. 9.7.





**Obrázok 9.7.** Zobrazenie stochastickej realizácie zmien veľkosti populácie v závislosti na čase podľa rovnice 9.5 a algoritmu 9.1 (schodovitá krivka) a súčasne deterministickej krivky podľa riešenia diferenciálnej rovnice  $N'(t) = N(t) ((a_1 - a_2) - (b_1 + b_2) N(t))$  s okrajovou podmienkou  $N(0) = 1$  (hladká krivka).

Ako ďalší príklad simulácie môžeme uviesť súťaženie dvoch druhov, kde nárast populácie jedného druhu je inhibovaný súčasne tak veľkosťou populácie jedného druhu, ako aj veľkosťou populácie druhého druhu. Na rozdiel od Volterrových-Lotkových rovníc by teda u každého druhu samostatne nastal nárast až do stabilného bodu, zatiaľ čo u Volterrových-Lotkových rovníc by sa koristi bez dravcov rozmnožovala donekonečna, zatiaľ čo dravci bez koristi by zahynuli. Zároveň nárast koristi spôsobuje nárast dravcov, zatiaľ čo pri súťaživom vzťahu je to naopak, druhy sú si navzájom dravcami, aj keď sa nepožierajú, stačí keď spotrebovávajú rovnaký druh obmedzených zdrojov. Keď  $N_1(t)$  a  $N_2(t)$  označíme množstvá prvého a druhého druhu v čase  $t$ , môžeme písať

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= N_1(r_1 - s_{11}N_1 - s_{12}N_2) \\ dN_2/dt &= N_2(r_2 - s_{21}N_1 - s_{22}N_2) \end{aligned} \quad (9.9)$$

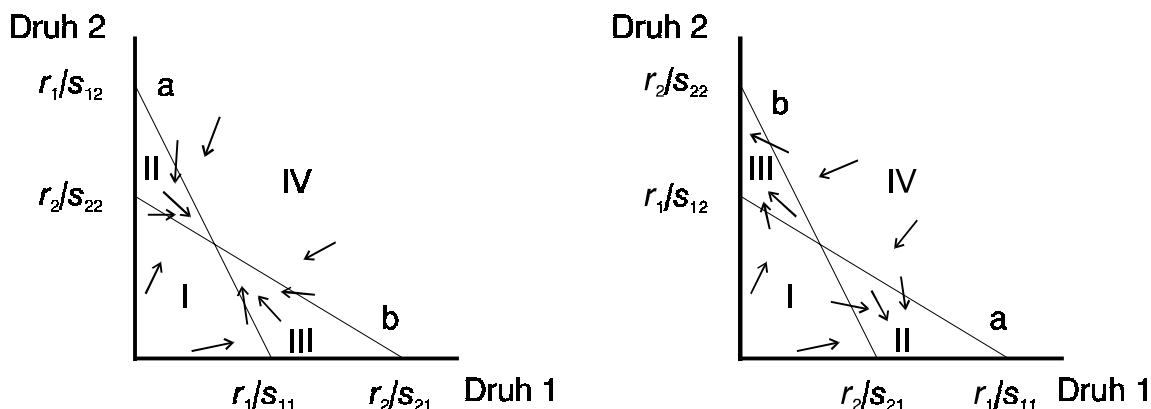
```

a1=2.2; a2=0.2; b1=b2=0.1;
function B(n) := n (a1-b1 n);
function D(n) := n (a2+b2 n);
n:=1;
time:=0;
draw N(0) :=1;
for step:=0 to step<200 do
begin
  if n=0 break;
  Y1=random(); Y2=random();
  s=-ln(Y2) / (B(n)+D(n));
  time+=s;
  draw N(time)=n;
  if 0<=Y1<=B(n) / (B(n)+D(n)) then n:=n+1 else n:=n-1;
  draw N(time)=n;
end;
```

**Algoritmus 9.1.** Generovanie veľkosti populácie v závislosti na čase pomocou stochastických zmien. Výsledok algoritmu je znázornený na Obr. 9.7.

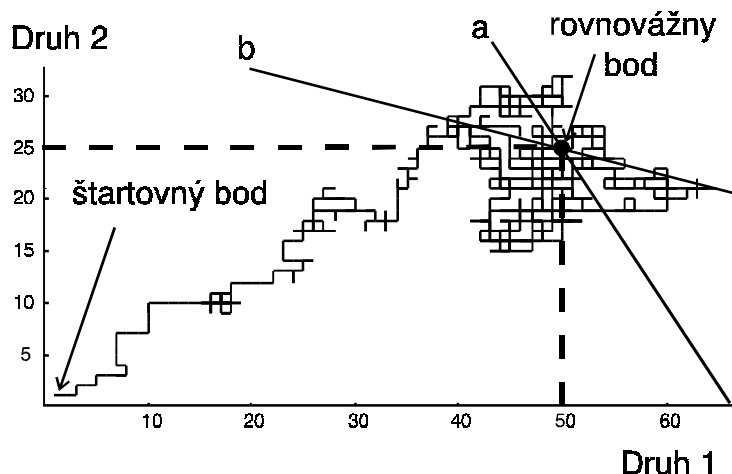
Dajú sa rozlíšiť štyri prípady:

1. Keď  $r_1/r_2 > s_{12}/s_{22}$  aj  $s_{11}/s_{21}$ , potom druh 1 vyhráva.
2. Keď  $r_1/r_2 < s_{12}/s_{22}$  aj  $s_{11}/s_{21}$ , potom druh 2 vyhráva.
3. Keď  $s_{12}/s_{22} < r_1/r_2 < s_{11}/s_{21}$ , potom existuje stabilné rovnovážne riešenie s veľkosťami populácie  $N_1^*, N_2^*$  (viď prvý diagram z obr. 9.8).



**Obrázok 9.8.** Diagramy stability pre súťaženie dvoch živočíšnych alebo rastlinných druhov. V prvom prípade dostávame stabilnú rovnováhu v mieste prekríženia dvoch priamok *a* a *b*, v druhom prípade dostávame nestabilnú rovnováhu v mieste prekríženia - pri akomkoľvek vychýlení jeden z druhov vymrie, záleží iba na smeru vychýlení. V prípade, že by sa priamky *a*, *b* nepretínali, a priamka *a* je nad *b*, vymrie druh 2, v opačnom prípade vymrie druh 1.

1. Keď  $s_{11}/s_{21} < r_1/r_2 < s_{12}/s_{22}$ , potom existuje nestabilné rovnovážne riešenie. Keď sa veľkosti populácie vychýlia z tohto riešenia, začnú sa vychyľovať tým viac, až pokiaľ jeden z druhov nevyhynie. Ktorý z druhov vyhynie, to závisí na počiatočnom stave, a pri stochastickej simulácii čiastočne aj na náhode, (viď druhý diagram z obr. 9.8).



**Obrázok 9.9.** Modelovanie prvých 1000 zmien veľkostí populácií pri súťažení dvoch druhov pomocou algoritmu 9.2. Populácie prvého aj druhého druhu začínajú s veľkosťami  $N_1=N_2=1$ . Kľukatou čiarou sú zobrazené postupné zmeny veľkostí populácií, ktoré sa po približnom dosiahnutí rovnovážneho stavu "potulujú naokolo". Žiaľ, nie je tu zobrazený časový priebeh a jednotlivé zmeny z rozdielnych časových odsekov sa prekrývajú, tvoriac nepravidelnú mriežku. Obrázok odpovedá prvému diagramu stability z predchádzajúceho obr. 9.8 pre konštanty  $r_1=2.0$ ;  $s_{11}=0.03$ ;  $s_{12}=0.02$ ;  $r_2=1.5$ ;  $s_{21}=0.01$ ;  $s_{22}=0.04$ .

```

r1=2.0; s11=0.03; s12=0.02; r2=1.5; s21=0.01; s22=0.04;
function B1(n1):=n1 r1;
function D1(n1,n2):= n1 (s11 n1 + s12 n2);
function B2(n2):=n1 r1;
function D2(n1,n2):= n2 (s21 n1 + s22 n2);
n1:=1; n2:=1;
draw {1,1};
for step:=0 to step<1000 do
begin
Y1=random();
R=B1(n1)+D1(n1,n2)+B2(n2)+D2(n1,n2);
if 0<=Y1<=B1(n1)/R then n1 = n1+1 else
if Y1<=(B1(n1)+D1(n1,n2))/R then n1 = n1-1 else
if Y1<=(B1(n1)+D1(n1,n2)+B2(n2))/R then n2 = n2+1 else n2 = n2-1;
draw {n1,n2};
end;

```

**Algoritmus 9.2.** Generovanie stochastických zmien veľkostí dvoch súťažiacich populácií. Vzhľadom k počiatočným hodnotám konštánt  $r$  a  $s$  má systém stabilné riešenie  $n_1=50$ ,  $n_2=25$ , okolo ktorého sa veľkosti populácií budú pohybovať. Výsledok algoritmu je znázornený na obr. 9.9.

Na čo modelovať vývoj pomocou stochastických procesov, keď u vyššie uvedených príkladov existuje aj jednoznačné analytické riešenie odpovedajúcich diferenciálnych rovníc? Stačí jednoducho pridať priestorové vzťahy, t.j. umiestniť jednotlivých "živočíchov" na toroidálnu mriežku ako u celulárnych automatov (viď ďalej), a diferenciálne rovnice prestávajú platiť. Problémy sa jednoduchým pridaním priestorovej interakcie stávajú vo väčšine prípadov analyticky neriešiteľnými.

**Príklad 9.2.** Namodelujte priebehy množstva dravcov a koristi ukázané v predchádzajúcich obrázkoch 9.6 nie pomocou diferenciálnych rovníc, ale vytvorením stochastického modelu, kde množstvá dravcov a koristi a ich prírastky/úbytky budú dané celými číslami; v prípade, že zmena nie je vyjadrená celým číslom, berte neceločíselnú časť ako pravdepodobnosť, a rozhodnite o zaokrúhlení hore/dolu na základe porovnania tejto pravdepodobnosti s náhodným číslom z intervalu  $(0,1)$ .

Typickým cieľom mnohých simulačných programov je **modelovanie kolónie mravcov** [40]. Je veľa programov ktoré napodobňujú takéto správanie. Mravce totiž pri relatívnej jednoduchosti svojich jednotlivcov vykazujú komplikované skupinové chovanie. Sú tak schopní vykonávať úkoly, ktoré idú ďaleko mimo možnosti jednotlivého mravca. Robia tak bez vzájomného spojenia "telefónnou linkou", bez centrálného riadenia a pri častých poruchách informácie alebo zmenách prostredia. Mravčie kolónie stavia cesty medzi hniezdom a zdrojom potravy, alebo vytvárajú živé mosty pri migrácii.

Ďalším príkladom vynárajúcich sa vlastností je správanie sa krdľa bez centrálného riadenia, skúmané v prácach Craiga Reynoldsa [41]. Ten vytvoril základný model "vtáka", nazvaný "**boid**". Do počítačového modelu bola potom vložená populácia "vtákov" riadiacich sa tromi základnými vlastnosťami:

- vyhýbať sa kolízii s okolitými "vtákmi"
- prispôbiť rýchlosť okolitým "vtákom"
- snažiť sa držať sa blízko okolitých "vtákov"
- (môže sa pridať základný smer, ktorým vtáky letia, nutnosť vyhýbať sa prekážkam, pridať malé náhodné zmeny smeru a rýchlosti vtákov apod.)

Každý "vták" pritom vidí iba svojich najbližších susedov. Tieto základné vlastnosti sú dostačujúce na vytvorenie prirodzeného správania sa krdľa. Napríklad keď sa objaví prekážka, krdel sa bez akéhokoľvek centrálného riadenia rozdelí na dve časti, ktorí sa po obtečení prekážky spoja. Tieto princípy boli napr. použité na realistické animovanie netopierov vo filmoch Batman sa vracia a Cliffhanger.

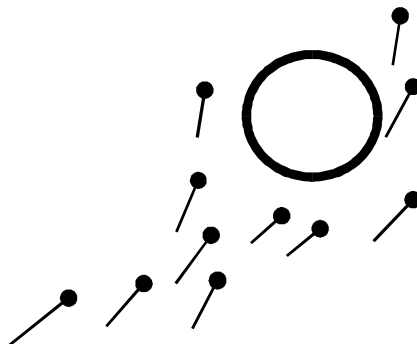
**Príklad 9.3.** Vytvorte program, animujúci pohyb žubrienok na obrázku 9.10, kde veľký kruh je prekážka, "hlavička žubrienok" predstavuje umiestnenie žubrienky v dvojrozmernom priestore a dĺžka a smer chvostíku určujú rýchlosť a smer pohybu žubrienky. Pridajte "dravca", teda inofarebnej žubrienky, ktorá sa pohybuje smerom k ostatným žubrienkam, no ktorému sa žubrienky snažia vyhýbať.

## 9.6. Celulárne automaty

**Celulárne automaty** [42,43] môžu tvoriť samostatnú kapitolu umelého života. Sú to diskrétné dynamické systémy zložené z rovnakého typu "buniek", ktorých správanie sa je kompletne špecifikované ich momentálnym vlastným stavom a stavmi "buniek" v ich najbližšom okolí. Čo je považované za okolie závisí na definícii. Čas, priestor a stav systému je tu diskrétny. Bunky nemajú pamäť a sú rozložené na pravidelnej mriežke (jedno či viacrozmernej, a v dvojrozmernom môže ísť o štvorcovú, trojuholníkovú alebo šesťuholníkovú mriežku). Mriežka mení svoj vzhlľad po krokoch. Môžeme si predstaviť, že stavy všetkých buniek sa v priebehu jedného časového kroku menia súčasne. Stav bunky v mriežke je menený z "generácie na generáciu" pomocou pravidiel berúcich do úvahy blízke okolie bunky. Bunky majú konečný počet stavov. Stav každej bunky je charakterizovaný zopár bitmi informácie; čas sa posúva v diskrétnych krokoch, pričom nový stav bunky je definovaný napr. podľa "tabuľky" obsahujúcej všetky možné stavy "centrálnej" bunky a jej susedov v predchádzajúcom časovom kroku. Každému prípadu v tabuľke odpovedá nový stav "centrálnej" bunky.

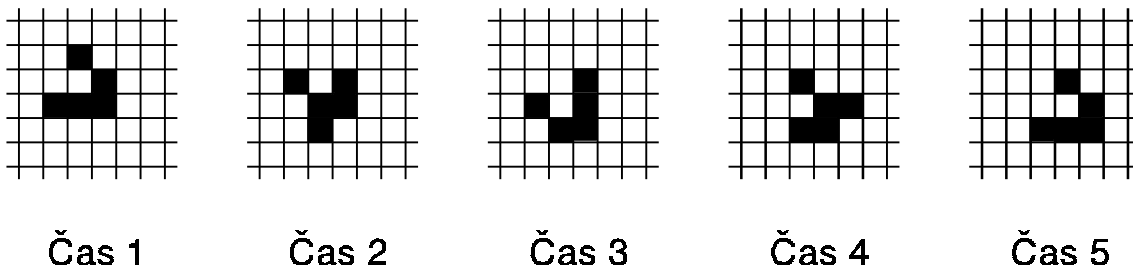
Zákony zmien sú teda lokálne a uniformné. Na základe veľmi jednoduchých zákonov ale vznikajú veľmi zložité štruktúry a vzory správania sa vyšších celkov (zložitých vzorov) jednoduchých buniek. Ako jeden z prvých sa takýmito "hrami" zaoberal matematik Stanislaw M. Ulam v Los Alamos.

Evolúcia je základným kameňom výskumu v umelom živote. Jeden z najväčších otvorených problémov dneška je vznik života. Ako vznikli sebareplikujúce organizmy, nutné k evolúcii? Ulam navrhol John von Neumannovi, aby skonštruoval na "nekonečnej šachovnici" systém pre štúdium strojovej reprodukcie, operujúci iba so základnými strojovými príkazmi. Každá štvorcová bunka mohla byť v akomkoľvek stave odpovedajúcom častiam "stroja". Stroj bol potom vzorom zloženým z takýchto častí. Pravidlá správania sa častí stroja boli vytvorené na základe zjednodušenej fyziky. Takýto celulárny automat bol Von Neumannom "zostrojený" koncom štyridsiatych rokov [44]. Jeho reprodukčný automat pozostával z obdĺžnikovo usporiadaných buniek, nasledovaných dlhým "chvostom". Vnútri obdĺžnika existovalo množstvo "podorganizmov". Spracovateľské podorganizmy spracovali materiál z okolitého prostredia, duplikátorové podorganizmy čítali sadu inštrukcií a kopírovali ich. Každá bunka mala 29 možných stavov bola sada pravidiel prechodov z jedného stavu do druhého. Jeden z hlavných von Neumannových prínosov bol, že reprodukčný proces používal inštrukcie pre spracovanie dvoma rôznymi spôsobmi: ako interpretovaný kód v priebehu vlastnej stavby, a ako kopírované dáta - kopírovanie príkazov pre stavbu do potomka. Pozdnejšie sa ukázala existencia tohto rozdelenia aj v



**Obrázok 9.10.** Zobrazenie "žubrienok" (čiernych bodov s "chvostikom"), ktoré sa pohybujú smerom vpravo hore a vyhýbajú sa prekážke (kruhu). Model je inšpirovaný správaním sa krdľa podľa Craiga Reynoldsa [41].

prírode inštrukcie na spracovanie (DNA) sú používané k vytvoreniu vlastného "systému" - proteínov. V



**Obrázok 9.11.** Štruktúra "klzák" zo hry "Life" (primitívneho celulórneho automatu). Táto štruktúra sa vždy po štyroch krokoch opakuje, pričom sa pohybuje vpravo dolu. Existuje veľa takýchto objektov, ktoré vzájomnými zrážkami môžu zanikať alebo tvoriť iné druhy štruktúr. "Klzák" si možno predstaviť ako bit 1 (jeho neprítomnosť ako bit 0), a smer jeho pohybu ako drôt. Z takýchto a podobných štruktúr potom ide zostaviť celý virtuálny počítač.

celulórných automatoch môžu byť objekty chápané aj ako pasívne dáta, ktoré sa podrobujú operáciám, aj ako výpočtové prostriedky.

Na tom istom mieste, v University of Michigan začal potom používať John Holland celulórne automaty na problémy adaptácie a optimalizácie.

Najpopulárnejším celulórnym automatom je hra "Život" (Life), navrhnutá r. 1970 Johnom Hortonom Conwayom, mladým matematikom z Gonville and Caius College v Cambridgi, a rozšírená "rubrikami" Martina Gardnera v časopise Scientific American [45,46]. Von Neumannov automat síce bol univerzálnym počítačom (mohol simulovať akúkoľvek opísateľnú funkciu akéhokoľvek počítača pomocou súboru logických pravidiel), no bol zbytočne zložitý. Conway zjednodušil počet možných stavov bunky z Von Neumannových 29 iba na 2: bunka mohla byť alebo živá, alebo mŕtva.

Pravidlá: Hráč tu vlastne nerobí nič, iba pozoruje štruktúry, ktoré vytvára počítač.

Conway skúsil veľa pravidiel pre vznik a prežitie bunky. Chcel pritom dosiahnuť, aby veľmi jednoduché vzory automaticky nerástli donekonečna, no niektoré s "divokým" a nepravidelným správaním sa by mohli rásť do nekonečna, a mali by existovať aj stabilné štruktúry. Conwayove bunky sú rozmiestnené na štvorcovej mriežke, a za susedov štvorčeka (bunky) považujeme nielen tých priamo susediacich hranou, teda horný, dolný, vľavo a vpravo, no aj štyroch susediacich "rohom".

Pravidlá:

1. STABILNÝ STAV: Keď daná bunka má dvoch živých susedov, tak ostáva v rovnakom stave, ako bola, aj v ďalšej generácii.
2. RAST: Keď má bunka presne troch živých susedov, bude v ďalšej generácii živá, bez ohľadu na jej momentálny stav.
3. SMRŤ: Keď má bunka počet susedov 0, 1, 4-8, bude v nasledujúcej generácii "mŕtva". Bunka teda "zomrie na podchladenie alebo na prehriatie, keď má málo, alebo veľa susedov".

Populácia buniek sa mení z generácie na generáciu, a je možné tvoriť najrôznejšie štruktúry. Conway sa zaujímal o možnosť rastu donekonečna. Ako jednu z hypotetických možností navrhol tzv. "klzákovú pušku" (glider gun), stabilný objekt, ktorý by "vystreľoval" vzory volané "klzák" (glider), vid' obr. 9.11. Na základe výzvy v Scientific Americanu R.W. Gosper vytvoril na počítači takúto štruktúru, a veľa ďalších.

Pri použití "klzákov" ako reprezentácie bitov bol Conway schopný vytvoriť ekvivalenty "and"-brán, "or"-brán a "not"-brán, sčítač, ako aj analóg vnútornej pamäte počítača. Bolo tak preukázané, že hra Life je jednoducho Turingovým počítačom [47,48], rovnako, ako môžu byť aj iné celulórne automaty [49].

Príklad iného typu správania sa je na obrázku 9.12, kde z náhodného rozloženia buniek na toroide (zobrazenom ako štvorec) pri štarte vznikajú podlhovasté, kruhové alebo špirálovito sa rozširujúce vzory. Takéto "vlny" potom ostávajú na mieste alebo cestujú, rozširujú sa alebo zanikajú. Aj keď pravidlá sú deterministické, výsledkom je stav pripomínajúci chaos. Nasledujúci obrázok vznikol z náhodného stavu, kde každá z buniek bola v jednom zo 7 stavov (0-6). Za susedné bunky tu považujeme tie susediace hranou. Pravidlá v poradí ich uplatňovania: Bunka susediaca s bunkou v stave 0 prechádza na stav 0. Bunka v stave  $c$  prechádza na stav  $c+1$ , pokiaľ je niektorý z jej susedov v stave  $c+1$ . Inak bunka ostáva v pôvodnom stave. Podobné systémy sa používajú na modelovanie fibrilácií srdca, alebo oscilačných chemických reakcií.

**Príklad 9.4.** Zobrazte sadu stavov jednorozmerného celulárneho automatu, kde sú bunky iba v jednom riadku (formálne spojenom do cyklu, t.j. začiatok riadku susedí s koncom) a možné stavy buniek 0 = biela, a 1 = čierna. Prechodové pravidlá pre stav buniek berú do úvahy iba momentálny stav bunky (v prostriedku) a jej ľavého a pravého suseda. Pravidlá sú zadané takto:  $1,1,1 \Rightarrow 1$ ;  $1,1,0 \Rightarrow 1$ ;  $1,0,1 \Rightarrow 1$ ;  $1,0,0 \Rightarrow 0$ ;  $0,1,1 \Rightarrow 1$ ;  $0,1,0 \Rightarrow 0$ ;  $0,0,1 \Rightarrow 0$ ;  $0,0,0 \Rightarrow 1$ . Napr. pravidlo  $1,1,0 \Rightarrow 1$  znamená, že čierna bunka s čiernym ľavým a bielym pravým susedom bude v ďalšom časovom kroku čierna. Zobrazte sadu riadkov v časovej postupnosti, t.j. riadok v čase 0, pod ním riadok v čase 1 atď. Počiatočný stav riadku v čase 0 nech je generovaný náhodne.

**Príklad 9.5.** Zostrojte model celulárneho automatu s 4 stavmi:

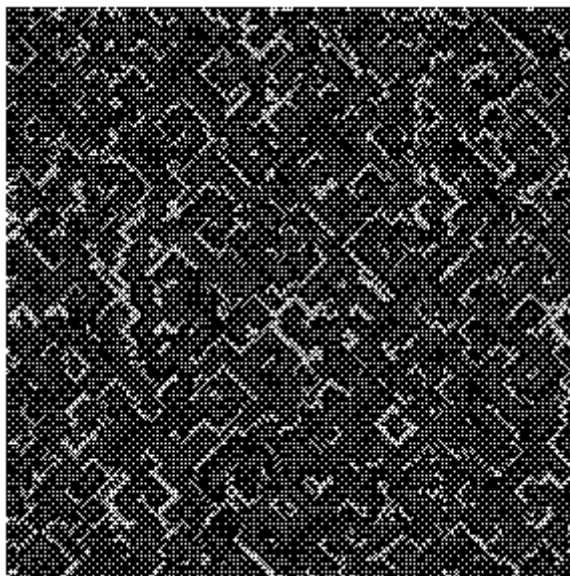
1. Prázdna bunka
2. Mravec
3. Ihličie
4. Mravec s ihličím

Pravidlá: Na počiatku dvojrozmerná mriežka (na okrajoch spojená do torusu, aby neboli problémy s ohraničením) obsahuje náhodne rozmiestnené ihličie a mravce. Mravec sa pohybuje vždy náhodným smerom, no tak, aby dvaja mravce neboli v jednej bunke. Keď narazí na ihličie, zoberie ho. Keď mravec s ihličím narazí na iné ihličie, upustí svoje ihličie. (Môže tak aj z "kôpky" odoberať.)

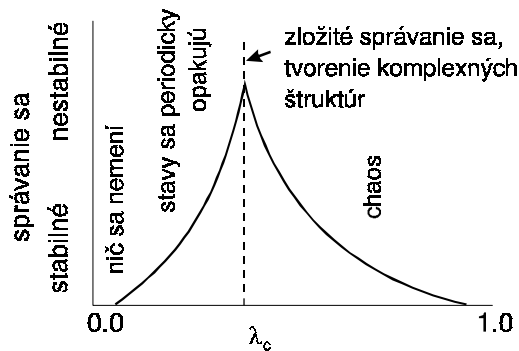
Pozorujte, ako sa takýmto distribuovaným procesom budú vytvárať "kôpky", až nakoniec vznikne jedna veľká kopa.

Uvedené celulárne automaty vyzerajú ako hračky, no sú spojené s hlbokými filozofickými otázkami, ako napr. ako je možné, že zložité systémy ako sú živé organizmy môžu vzniknúť vo svete, kde základným zákonom je zvyšovanie entropia, teda "dezorganizácie". Dynamika zmien riadených informáciou v živých systémoch prevzala kontrolu nad dynamikou zmien určených tokom energie.

## 9.7. Vznik komplexných javov



Obrázok 9.12. Modelovanie vzorov celulárnym automatom.



**Obrázok 9.13.** Schematické znázornenie komplexnosti oproti parametru  $\lambda$  v priestore celulárnych automatov, ukazujúce vzájomný vzťah medzi Wolframovými triedami [51] (idúcimi od nemenného stavu cez periodicitu a komplexné správanie sa po chaos) a fázovým prechodom. Je treba poznamenať, že "meritko stability" celulárneho automatu pred a za fázovým prechodom označeným  $\lambda_c$  sa líši spôsobom merania.

Celulárne systémy sú priestorovo rozložené nelineárne dynamické systémy schopné vykazovať stabilitu, cyklické správanie sa aj chaos. Zároveň sú schopné modelovať univerzálny počítač. Pritom sú jednoznačne definované pomocou "look up table". Zároveň do značnej miery môžu predstavovať fyzikálny model. Kedy u takýchto systémov začne prevažovať dynamika informácie vykazujúca komplexné správanie sa?

Christopher Langton považoval niektoré z celulárnych automatov za "nudné", pretože po niekoľkých generáciách všetky bunky vymreli alebo sa usporiadali do jednoduchých pravidelných štruktúr - boli vysoko usporiadané. Iné automaty zase boli príliš chaotické a nepredpovedateľné, nedali sa rozpoznať od náhodne vygenerovaného šumu. Niektoré celulárne automaty ale vykazovali zaujímavé komplikované správanie sa na hranici medzi poriadkom a totálnym chaosom. Ladgdon definoval parameter nazvaný lambda, pomocou ktorého sa dá predpovedať, či daný celulárny automat bude usporiadaný, chaotický, alebo na pomedzí medzi poriadkom a chaosom [50].

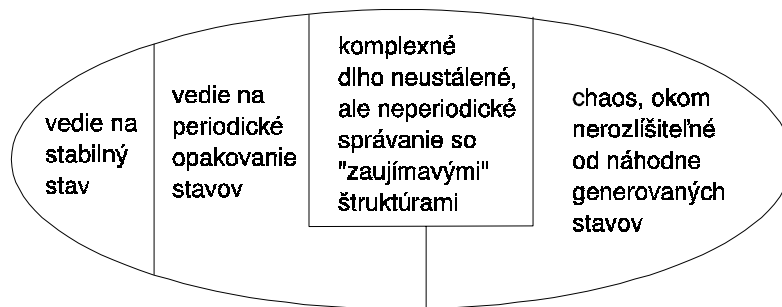
Nech ďalšie správanie sa bunky je určené funkciou so vstupom stavov buniek v okolí o počtu buniek  $N$  (včítane bunky samotnej), a výstupom funkcie je nový stav bunky. Nech celkovo existuje  $K$  možných stavov bunky. Vyberme si jeden stav bunky, ktorý nazvime "neaktívny". Nech počet pravidiel funkcie, ktoré vedú na tento neaktívny stav, je  $n$ . Nech ostatných  $K^N - n$  prechodových pravidiel funkcie je vybraných náhodne a uniformne zo zvyšných  $K - 1$  stavov bunky. Potom je parameter lambda

$$\lambda = \frac{K^N - n}{K^N} \quad (9.10)$$

Keď je  $n = K^N$ , lambda je 0, všetky bunky okamžite vymierajú. Pre  $n=0$ , potom lambda je rovné 1 a žiadna bunka nevymiera. Keď sú prechody na všetky stavy rozložené rovnomerne v pravidlách funkcie, potom  $\lambda=1.0-1/K$ . Medzi lambda rovnou nule (usporiadaným "mŕtvym" stavom) a rovnomerne rozloženými stavmi v pravidlách (chaosom) leží oblasť zaujímavého správania sa - na hrane chaosu.

Parameter lambda dobre opisuje zmeny dynamických režimov iba pre väčšie  $K$  a  $N$ , pre príklad 9.4 sú tieto hodnoty príliš malé, aby sa dosiahlo pravidelného prechodu ukázaného v grafe 9.13. Okrem toho je v obrázku 9.13 na osi y "počet času k dosiahnutiu stabilného stavu, ale stabilný stav je rôzne definovaný pre hodnoty pred a za fázovým prechodom. Pred fázovým prechodom je dosiahnutie stabilného stavu definované tak, že sú všetky bunky v stave, ako boli už v niektorom z predchádzajúcich časových odsekov, a teda sa začína situácia periodicky opakovať (s väčšou či menšou periódou). Naproti tomu pre lambda po fázovom prechode je stabilný stav štatisticky vyjadrený pomocou histórie tak, že priemerná "hustota" obsadenia buniek sa usadila tak, že sa nelíši viac ako o 1 percento od svojho dlhodobého priemeru. Je treba poznamenať, že parameter lambda nie je dokonalou charakteristikou pravdepodobnosti vzniku komplexného správania sa. Začnime z náhodného stavu buniek a so všetkými pravidlami vedúcimi na "mŕtvý" stav, a postupne náhodne po jednom modifikujeme pravidlá tak, že vedú na "živý" stav namiesto mŕtveho, a vždy znovu spustíme automat a zisťujeme jeho správanie sa. Uvidíme, že správanie niekedy "preskočí" z periodického na chaotické správanie bez fáze tvorby komplexných štruktúr, a inokedy sa môže objaviť komplexné správanie sa aj mimo "fázového prechodu" (schematicky na obr. 9.14).

Treba zdôrazniť, že oblasť komplexného správania sa je v skutočnosti veľmi malá v porovnaní s množstvom chaoticky sa správajúcich automatov, alebo s periodicky sa opakujúcimi stavmi. (Treba tiež zdôrazniť, že vzhľadom ku konečnosti pravidiel a automatu sa každý automat správa periodicky, otázka je iba, či sa rovnaký stav opakuje hneď v ďalšej iterácii, za desať iterácií, alebo za milión iterácií. Zaujímavé štruktúry sú také, kde



**Obrázok 9.14.** Schematické znázornenie priestoru pravidiel celulárnych automatov (podľa Langdona [50]).

aj keď nepoznáme pravidlá a poznáme iba momentálny stav, sme schopní s nenáhodnou pravdepodobnosťou odhadnúť budúci krok, no nie s príliš veľkou pravdepodobnosťou).

Je otázkou, či celulárne automaty nemôžu byť použité okrem modelovania výsledného správania sa nášho sveta tiež na modelovanie základných zákonov fyziky. Špeciálne upravené celulárne automaty môžu zachovávať aj najzákladnejšie rysy fyziky, ako je reversibilita. Celulárne automaty boli použité ako extrémne jednoduché modely obyčajných diferenciálnych rovníc, ako tepelné a vlnové rovnice [52] a Navier-Stokesovy rovnice [53,54].

Celulárne automaty tiež môžu slúžiť ako diskkrétne modely pre štúdium dynamických systémov vykazujúcich emergentné javy spôsobené "kolektívnymi" vzťahmi, ako je usporiadanie, turbulencia, chaos, fraktály [55,56], alebo modelovanie biologických fenoménov, ako sú hmyzie spoločenstvá, bunčné združenia, retina, alebo imunitný systém [57].

Evolúcia celulárnych automatov môže slúžiť aj pre návrh hardwarových riešení [58]. Tzv. **evolware** je systém založený na celulárnom programovaní, v ktorom sú paralelné celulárne automaty (s implementovaným genetickým algoritmom, kde nie všetky pravidlá musia byť rovnaké pre všetky bunky) použité na riešení výpočtových problémov. Takéto systémy sú už pokusne implementované aj hardwarovo. Výhodou takých systémov je okrem iného aj väčšia tolerancia k vstupným chybám aj k chybám pri výpočte, ktoré pri stovkách tisíc výpočtových prvkov ("mikroprocesorov") nemusia byť až také zanedbateľné

Problémom spojeným so "siet'ovými" systémami, je, že pri určitej úrovni zložitosti pravdepodobne nie je žiaden matematický model dopredu schopný presne predpovedať správanie sa systému, jeho vynárajúce sa (emergentné) vlastnosti (ako je vytvorenie "kôpky"). Zacyklené kľbká spojení sú natoľko zamotané, a formálne modely opisujúce ich natoľko nemotorné, že jediným možným spôsobom ako zistiť správanie sa modelu je "spustiť" ho. Zdá sa, že sa väčšinou systém "bráni" riešeniu pomocou spriahnutých nelineárnych rovníc. Z fyzikálno-chemického charakteru molekuly vody je ťažké odhadnúť vznik vírov, zo zrnka piesku existenciu lavín, a z jednej molekuly užitočnosť pojmu teplota (skupinovej vlastnosti molekúl), zo semena nemožno odhadnúť konečnú podobu rastliny. Najrýchlejším spôsobom ako zistiť "výstup" semena je nechať ho vyklíčiť. Podobné problémy, spojené s "motýlim" efektom, kde malá zmena vo vstupe môže spôsobiť veľkú zmenu výstupu, sa vyskytujú všade v "siet'ovej matematike". Do tohto termínu môžeme zahrnúť paralelné distribuované procesy, Boolovské siete, neurónové siete, spinové sklá, celulárne automaty, klasifikačné systémy, genetické algoritmy, a "rojové" (swarm) výpočty. Všetky obsahujú vzájomný vplyv tisícok simultánne interagujúcich funkcií, kde ide o masívne paralelné systémy často s lokálnym prepojením a relatívne primitívnymi základnými prvkami. V aplikáciách sa systémy tohto typu využívajú napr. vo fyzike na simuláciu kritických stavov, turbulencie alebo toku kvapaliny cez porózne média, difúzie energie v plynách, v biológii na modelovanie biologických rytmov, rastu nádorov, epidémií, ekologických rovnováh, premiestňovania živočíchov, v chémii u polymerácií, oscilačných chemických reakcií, agregácií koloidov alebo vzniku kryštálov, difúzných reakcií, v geológii pre zemetrasenia, sopky a pretváranie zemského povrchu, v ekonomike u fluktuácií cien, v sociológii modelovanie šírenia správ, imitačného správania sa, rastu populácie, vývoja mesta alebo dopravných zápch.

V robotike sa pokladajú za budúcnosť mikroroboty - rýchle, lacné, a neriadené. Využitie: planetárny výskum, baníctvo a žne, výstavba "na diaľku".

V tradičnej **robotike** sa programátori pokúšajú predpovedať a riadiť každý aspekt akcie robota. Takéto systémy sú potom v koncoch, keď je robot postavený pred nepredvídanú situáciu. Na rozdiel od klasického prístupu je adaptívna kontrola pohybu robota schopného sa učiť v premenlivom prostredí typickou praktickou aplikáciou "umelého života" [59].

Rodney Brookovo laboratórium pre výskum robotov stanovilo tieto zásady [60,61]:

1. Z začať s jednoduchými úkolmi.
2. Naučiť sa ich robiť bezchybne.



3. Pridávať ďalšiu úroveň riadenia nad výsledky jednoduchých úkolov.
4. Nemeniť jednoduché základné veci, vyššie úrovne môžu maximálne potlačiť výstup nižších vrstiev.
5. Naučiť novú vrstvu vykonávať veci tak dobre, ako len to bude možné.
6. Opakovať dookola.

Naproti tomuto sú zatiaľ priemyselné roboty direktívne riadené. Pokusy vytvoriť "inteligentného" robota pomocou klasickej umeljej inteligencie zlyhávajú - "úspešné" roboty sú po dvadsiťročnom úsilí vo výskume maximálne schopné sa pohybovať po rovnej ploche s krabicovitými prekážkami. "Geneticky" riadené roboty sú zatiaľ predstavované maximálne desaťcentimetrovými hračkami, ktoré sú vzhľadom na podstatne kratší čas ich vývoja schopné zvládnuť približne podobné "úlohy".

Zásadou je postupné budovanie zložitého systému, nie budovanie zložitého systému naraz. Príkladom je napríklad ľudský mozog základné funkcie ako riadenie dýchania a vyššie úrovne myslenia. Riadenie musí byť čo najviac decentralizované, a komunikácia obsahovať iba najnutnejšie príkazy - podobne ako je tomu v objektovo orientovanom programovaní.

Inteligentné riadenie vyzerá ako slobodné správanie sa. Jediný spôsob, ako je možné inteligentne riadiť mechanizmy je dať im slobodu.

## 9.8. Kooperácia alebo súťaženie?

Evolúcia je adaptácia zameraná na naplnenie vlastných potrieb. Koevolúcia je vo väčšom merítku adaptácia na naplnenie potrieb navzájom medzi druhmi. Koevolučná ekológia je zbierkou organizmov, ktoré fungujú ako svoje životné prostredie. Je proti záujmu ak dravej zveri, tak aj koristi, aby bol druhý druh vyhubený. Aj keď pre koristiť na prvý pohľad vyzerá zánik nepriateľa priaznivo, dravá zver v skutočnosti väčšinou likviduje najslabšie kusy koristi a tým prispieva k zdokonaľovaniu genofondu a zamedzuje degenerácii. Ako vyplýva z teórie hier v ekonómii, aplikovanej tiež často na analýzu závodov v zbrojení medzi štátmi, zjednodušenej na zo skúmaní "problému väzňov" (prisoner's dilemma, viď [62,63]), kooperácia sa môže vynoriť z sebeckého záujmu, keď je výhodná pre oboch. Väzenské dilema (angl. prisoner's dilemma) vzniká, keď sa dvaja väzni dohodnú na úteku a nič sa pokazí. Keď obidvaja spolupracujú - zatúkajú, vyjdú z toho relatívne dobre - vyjadrené ohodnotením plus X bodov. Keď jeden z nich zhodí druhého, zradca dostane plus Y bodov, prezradený nula bodov. A keď obidvaja zradia, dostanú každý Z bodov. (V tabuľke na obr. 9.15 sú tieto hodnoty X=3, Y=5 a Z=1.) Ide teda v podstate o štyri prípady kombinácie dvojíc C (cooperative - spolupracuje so spoluväzňom) a D (defect - zradca spoluväzňa), teda CC, CD, DC a DD, kde prvé písmeno vždy značí, ako sa zachoval prvý spoluväzeň a druhé písmeno označuje správanie sa druhého spoluväzňa. Pri iba jednej iterácii by samozrejme bolo vždy výhodné zradiť, no keď sa iterácie s tým istým spoluväzňom opakujú a dopredu nie je povedaný počet iterácií, metóda ako sa zachovať nie je jasná. Väčšinou sa výhodne uplatňuje "tit-for-tat" - prvý krát spolupracovať, a prestať spolupracovať s tým, čo nespupracuje. Metóda "tit-for-tat" sa dá vyjadriť na základe správania sa dvojice spoluväzňov pri predchádzajúcej príležitosti, čo určuje správanie sa prvého spoluväzňa teraz. Teda: CC⇒C, CD⇒D, DC⇒C, DD⇒D. Pokiaľ sú predchádzajúce prípady správania sa jednoznačne usporiadané, potom ide toto správanie sa vyjadriť reťazcom pravých strán CDCD. Keď zoberieme stratégiu pamätajúcu si správanie sa pri troch predchádzajúcich príležitostiach, máme 64 možností:

	Väzeň č. 1 zatúka	Väzeň č. 1 zradca
Väzeň č. 2 zatúka	3, 3 obidva sú "odmenení" za vzájomnú spoluprácu prípady C,C	0, 5 väzeň č. 2, ktorý poctivo zatúkal, nedostane nič, väzeň č. 1, ktorý zradil, bude dozorcami odmenený prípady D,C
Väzeň č. 2 zradca	5, 0 väzeň č. 1, ktorý zradil, bude dozorcami odmenený väzeň č. 2, ktorý poctivo zatúkal, nedostane nič, prípady C,D	1, 1 obidva sa navzájom zradili a sú mierne potrestaní prípady D,D

Obrázok 9.15. "Payoff matrix", teda výplatná tabuľka pre problém dvoch väzňov závislá na ich rozhodnutí.

CC CC CC (prípád 1), CC CC CD (prípád 2), CC CC DC (prípád 3), ... , DD DD DC (prípád 63), DD DD DD (prípád 64). Stratégia ako sa zachovať nabudúce by teda bola zakódovaná reťazcom 64 písmen CDCDD... Pri plánovaní stratégie na základe predchádzajúcich skúseností s protihračom sa často používa genetického algoritmu, čo prvý krát vyšlo zo spolupráce politológa Roberta Axelroda s Johnom Hollandom [64], ďalej rozvíjané pre zložitejšie modely medzinárodnej bezpečnosti, odpovedajúce napr. na otázku, koľko z rozpočtu vydávať na obranu. Axelrod zbral zakódovanie stratégie reťazcom ako chromozóm genetického algoritmu, nechal každú stratégiu súťažiť s ostatnými stratégiami, a súčet výsledkov pre jednotlivú stratégiu vždy odpovedal jej ohodnoteniu. Na základe ohodnotenia sa potom reťazce vyberali, a potom dochádzalo k ich kríženiu a mutácii analogickej bitovému reťazcu (pretože máme vždy iba dva prípady C a D, išlo vlastne o bitový reťazec). V časovom priebehu je potom zaujímavé sledovať vývoj kooperatívnych a nekooperatívnych stratégií. Kooperatívne stratégie sa spočiatku ukázali menej výhodné, no v pozdnejších štádiách prevládali.

Evolúcia nie je "hra s nulovou sumou výhier", kedy výhoda jedného prináša nevýhodu druhému - vzájomná kooperácia môže priniesť výhodu obidvom druhom, bez toho, že by nejakému tretiemu škodila.

Výhoda kooperácie nemusí byť hneď vo všeobecnosti zrejmalá - keď v zvieracích rodinách "strýčkovia a tety" nezaložia vlastnú rodinu, ale pomáhajú súrodencom s výchovou synovcov a neterí, pomáhajú tým podporiť rozšírenie svojho genofondu (lebo ich príbuzní majú časť genetickej informácie zhodnú) rovnako, ako keby sebecky založili vlastnú rodinu.

Takéto zdanlivo biologické koncepty ako koevolúcia môžu byť s výhodou použité napr. pri evolúcii programov. Hillis [65] sa pokúšal vyvíjať sortovacie algoritmy pre zoznamy čísel, kde algoritmy boli ohodnocované podľa toho, koľko zoznamov zoradili správne. Takto vyvinuté algoritmy ale boli ďaleko od optima. Keď sa ale zároveň nechali vyvíjať aj zoznamy, ktoré boli ohodnotené tým lepšie, čím viac algoritmov ich nezoradilo správne, výsledné algoritmy boli oveľa efektívnejšie. O podobný prístup sa pokúsil aj Olsson [66] pri optimalizácii sortovacích sietí.

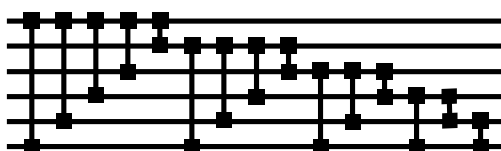
Sortovacia sieť opisuje algoritmus na zoradovanie sady čísel podľa veľkosti od najmenšieho (hore) k najväčšiemu (dole). Každá vodorovná linka v sieti reprezentuje umiestnenie čísla v zoznamu. Každá kolmá úsečka zakončená štvorčkami predstavuje porovnanie dvoch čísel v daných umiestneniach a ich prípadnú výmenu, pokiaľ je v "hornej pozícii" väčšie číslo ako v "dolnej". V prípade, že je zoradovací mechanizmus korektný, mal by správne zoradiť všetky možné permutácie danej veľkosti, viď. obr. 9.16. Keď je sieť minimálna, neexistuje korektný algoritmus s menším počtom porovnávaní.

Testovanie všetkých možných sortovacích sietí, ktoré dokážu korektné porovnať iba 16 čísel pomocou povedzme 64 porovnaní by vyžadovalo vyskúšať  $10^{154}$  sietí. Preto sa skúša použitie evolučných algoritmov na vyhľadanie takýchto sietí. Ako je vidno z obr. 9.16, sortovacia sieť vyhľadaná pomocou evolúcie môže byť lepšia ako tá získaná zápisom algoritmu, no v žiadnom prípade nepripomína pravidelnosť zvyčajne obsiahnutú v algoritme.

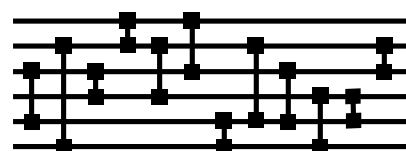
Život je charakterizovaný **neprestajnou zmenou** spôsobovanou samoorganizáciou. Časť zákonov riadiacich tieto zmeny a ich smerovanie bola síce v princípe vysvetlená Darwinovskou teóriou, no veľa vecí zostáva ešte nevyjasnených.

Život je charakterizovaný nerovnováhou, odklonom od tendencie smerovania systému k väčšej entropii (samozrejme, za zmenšenie entropie v živých organizmoch sa platí zvýšením entropie inde). Táto stabilná nerovnováha je charakteristickou pre "živé" systémy, nech už v ekonómii, prírodnom ekosystéme, zložitej počítačovej simulácii, imunitnom alebo evolučnom systéme. David Layzer v knihe Cosmogensis [67] tvrdí, že centrálnou vlastnosťou života nie je reprodukcia nemennosti, ale **reprodukováaná nerovnováha**. Živé organizmy musia vyrovnávať tendenciu "investovania do budúcnosti" - t.j. množstvo mutácií a inovačných trendov, s tendenciou využívať už vyskúšané a fungujúce. Keď sa takéto zmeny premietnu do kooperácie alebo vzťahu dravec/korist' s ostatnými druhmi, vzniká koevolúcia.

Chyby bránia koevolučný vzťah pred príliš tesným spojením. Takéto spojenie by mohlo pri zániku



**Bublínkové triedenie**



**Výsledok evolúcie**

**Obrázok 9.16.** Korektné sortovacie siete na triedenie sady čísel podľa veľkosti. Bublínkové triedenie dokáže porovnať 6 čísel za použitia 15 porovnaní, zatiaľ čo jednej z minimálnych korektných sietí napravo stačí iba 12 porovnaní. Takýchto minimálnych korektných sietí existuje viac (môžeme napríklad prehodiť prvé dve porovnaní).

jedného druhu spôsobiť lavínovitý zánik celého spoločenstva. Udržiavaním určitého stupňa "univerzálnosti" (napr. schopnosti živiť sa viacerými druhmi koristi alebo byť opelený viacerými druhmi hmyzu) sa spoločenstvo stáva odolné voči zmenám životných podmienok (napr. podnebia), aj keď nie je ideálne "zoptimalizované" pre dané životné podmienky.

Výsledok mutácií môže byť prirovnaný k bielemu šumu, zatiaľ čo aplikácia vyskúšaných pravidiel vedie k opakovaniu vzorov podobných pravidelnosťou kryštalickej štruktúre. Zaujímavá oblasť typická pre "život" sa nachádza medzi týmito dvoma extrémami. Zo svojich experimentov s modelmi roje Chris Langton zo Santa Fe odvodil tzv. lambda parameter, ktorý mu pomáha určovať nastavenie systému tak, aby sa prejavovali "životu podobné" vlastnosti, t.j. nepravidelné opakovanie vzorov. Tento jav sa dá porovnať k fázovému prechodu (napr., z tekutiny na páru alebo na ľad) v termodynamike. Zaujímavé je, že systém má automatickú tendenciu zdržať sa v takýchto oblastiach čo najdlhšie. Takýto systém má najlepšiu schopnosť sa vyvíjať, a pritom neskĺznuť do "anarchie", ktorou je v termodynamickom zmysle smrť.

Roku 1990 Kristian Lindgren [68], pracujúci v Inštitúte Nielsa Bohra v Kodaňi, rozšíril koevolučný experiment "väzeňského problému" na populáciu 1000 hráčov, zaviedol do hry náhodný šum, a nechal evolúciu bežať do 30000 generácií. V takomto merítku sa napríklad prejavili krivky typické z ekologických oscilácií dravca a koristi, kde množstvá jedincov v populácii oscilujú, a oscilácie sú spriahnuté - maximum koristi je nasledované maximumom dravcov - kde korisť je predstavaná kooperujúcimi väzňami a dravci zrádzajúcimi väzňami. Okrem toho sa prejavili aj ďalšie efekty, ako parazitizmus, symbióza, a dlhodobá kooperácia medzi skupinami - "zvieracími druhmi". Táto práca tiež zaujala biológov, lebo sa tu prejavili obdobia dlhej stability, nasledované krátkymi obdobiami nestability, kde veľa "druhov" vyhynulo, a nové sa vytvorili. Obdobný vývoj je známy zo sledovania skamenelín, čiastočne oponujúci zjednodušenej Darwinovskej predstave stabilného postupného vývoja.

## 9.9. Vznik života evolúciou neživého

Virtuálny svet Toma Raya z University of Delaware volaný **Tierra** [69] je prechodom od jednoduchých kódov ničiacich počítačových vírusov k experimentálnemu štúdiu evolúcie umelých organizmov na úrovni genómu. Snaží sa poskytnúť prostredie, v ktorom Darwinovská evolúcia môže prebiehať v počítači bez priameho riadenia alebo intervencie človeka. Ray vytvoril zjednodušený "počítač" v počítači s menším množstvom inštrukcií v strojovom kóde, pre ktorý potom vyrobil 80 bytového "víra", ktorý bol schopný rozmnožovania. Organizmus je tak lineárnym reťazcom inštrukcií a žije postupným vykonávaním sekvencie svojich príkazov. No Ray urobil aj niečo navyše - pri kopírovaní víra predal s určitou pravdepodobnosťou náhodné preklopenie niekoľko bitov, čo odpovedá mutácii v prírode. Základná sada strojových príkazov je vhodne vybraná tak, že pri akejkoľvek mutácii ostane organizmus vykonateľným programom. Organizmy sa teda môžu vyvíjať pomocou genetických operátorov. Každému "vírusu" bol pridelený určitý strojový čas na beh a teda rozmnožovania. Na druhú stranu Ray pridal vek, takže staršie vírusy boli pravdepodobnejšie programom odstránené. V *Tierre* nie je presne definovaná účelová funkcia. Vírusy potom súťažili o "prírodné zdroje" svojho prostredia, teda o CPU čas a pamäť. *Tierra* sa potom stáva umelým prostredím, v ktorom sa organizmy riadi vlastnými zákonmi. Organizmy, ktorým sa nejakým spôsobom podarí zabrať väčšinu týchto zdrojov majú vyššiu schopnosť prežitia. Potom, čo sa pamäť zaplní organizmami, operačný systém "zabíja" najmenej schopné organizmy, teda napríklad tie, ktorých kód v nejakom kontexte generuje chybu. "Svet" bol do tej miery umelo vytvorený, že pokiaľ si vírus napr. vytvoril nekonečnú slučku, bol umelo zastavený. Skoro sa v programoch objavili lepšie "vírusy", ako bol schopný sám Ray zostrojiť, a dokonca sa objavil aj "parazitizmus" - vírus bol krátky a využíval časť kódu iného vírusu. Žiaľ, implementácia vyšších funkcií ako inteligencia, vnímanie a komunikácia je v organizmoch *Tierra* obtiažna. Získanie týchto vlastností prirodzeným vývojom *Tierra* by trvalo veky. Zatiaľ sa nepokročilo významne ani k programovej verzii viacbunecných organizmov. Roku 1996 A. Pargellis vytvoril podobný virtuálny svet s ešte obmedzenejším počtom inštrukcií, v ktorom sa vytvoril sebareplikujúci sa "vírus" sám, bez nutnosti vytvoriť prvého víra "božským" zásahom človeka [70].

Umelá evolúcia ale nie je obmedzená iba na nepraktické pokusy s počítačovými vírusmi. V súčasnej dobe sa prakticky využíva na hľadanie nových typov **liečiv vo farmaceutickom priemysle**. Aktívny mechanizmus, ktorý má droga odštartovať, väčšinou spočíva v spustení reakcie molekulou, ktorá bude zapadať do receptoru a reagovať s jeho aktívnymi miestami. Nestačí iba mať v liečivu jednotlivé aktívne skupiny odpovedajúci skupinám v akceptoru-lidskej molekule, no treba ich rozmiestiť priestorovo. Organických molekúl je veľa, no spôsobom, akým jednotlivé molekuly poohýbať okolo "otáčavých" väzieb v priestore je faktoriálne viac. Dlhé reťazce aminokyselín sa dajú poskladať do takého kĺbka, že z neho trčia tie správne aktívne skupiny na správnych miestach.

V minulosti sa hľadanie liečiva riešilo metódou pokusu a omylu. Teraz, v tzv. **kombinatorickej chémii** [71,72], sa vyskúšajú milióny variácií molekúl - tá molekula, ktorá sa zachytí aspoň na jednom mieste, je úspešná. Táto úspešná molekula sa zachytí a spraví sa jej variácie - jedna z nich sa zachytí možno na dvoch aktívnych miestach. Tá sa vezme, urobí sa jej variácie ... atď., dokiaľ nemáme molekulu, ktorá perfektne pasuje na aktívne miesta receptora.

### Cesty evolúcie

Vzhľadom k tomu, že evolúcia je jedným zo základných predmetov skúmania umelého života, a zároveň praktické aplikácie jej princípov umožňujú vytvárať optimalizačné algoritmy, je vhodné zaoberať sa evolúciou aj z obecného hľadiska [73,74].

Základné dogma v biológii súvisiace s evolúciou je, že informácia cestuje z génu do živého organizmu, no nikdy opačne - Lamarkovský typ evolúcie [73], kedy zjednodušene povedané kováčove deti by mali silné svaly, lebo kováč si ich musel vypracovať - je pre biológov neprijateľný. Je veľmi nepravdepodobné tiež priame uplatnenie náhodnej mutácie - neexistuje gén ktorý by "napumpoval" kováčove svaly - za jednu vlastnosť je zodpovedných viac génov, rovnako ako každý gén je zodpovedný za viacero starostí. Preto je v prírode výhodnejšie mať adaptibilné "telo" (myslené aj rastlinné alebo prvokov), ako mať "telo" presne zoptimalizované na momentálne životné prostredie, a čakať, že pri zmene životného prostredia sa objaví vhodná mutácia, ktorá "telo" hneď zoptimalizuje na nové podmienky.

No spôsobiť zmenu "životného prostredia" môže spôsobiť aj zmena správania sa - Baldwinov efekt [73] - napríklad keď si ľudia obľúbia hory, a ostanú v nich viac generácií, budú sa viac rozmnožovať zvyhodnení jedinci s vyššou produkciou hemoglobínu. Keď zoberieme ľudskú kultúru ako sebariadiaci systém, ktorý "konzumuje" ľudské zdroje výmenou za zefektívnenie niektorých činností (napr. efektívny prenos informácií rečou namiesto posunkov, alebo uchovávanie informácií v knihách namiesto pamäti), kultúra môže po dlhšom čase spôsobiť genetické zmeny (napr. vývinom hlasiviek, zmenšenie zubov prechodom na tepelné spracovanie jedla), aj keď takáto priama závislosť nebola dosiaľ jednoznačne preukázaná.

Evolúcia je štruktúra organizovanej zmeny, ktorá sa samotná vyvíja. Z časového hľadiska sa dajú zoradiť nasledujúce typy evolúcie:

1. Sieť "do cyklu" prepojených chemických reakcií, vytvárajúcich určitý druh stability (Stuart Kaufmann [75,76] verí, že komplikované systémy majú tendenciu k samoorganizácii, a že organizovaná štruktúra môže vzniknúť spontánne.)
2. Samoreplikácia
3. "Učenie" genetickej informácie mutáciami, krížením a prežitím najschopnejších.
4. Zmeny spôsobené spoluúčasťou na tvorbe svojho "životného prostredia" výberom niché - miesta výskytu a vzťahmi ako vnitrodruhovými, tak aj mimodruhovými
5. Evolúcia myšlienok (memetic culture) v sieti ľudských mozgov - Lamarkovská kultúrna evolúcia
6. Evolúcia spôsobov a cieľov evolúcie - vyhľadávanie stratégií a spätnoväzbových mechanizmov, optimalizujúcich samy seba - napr. genetické inžinierstvo.

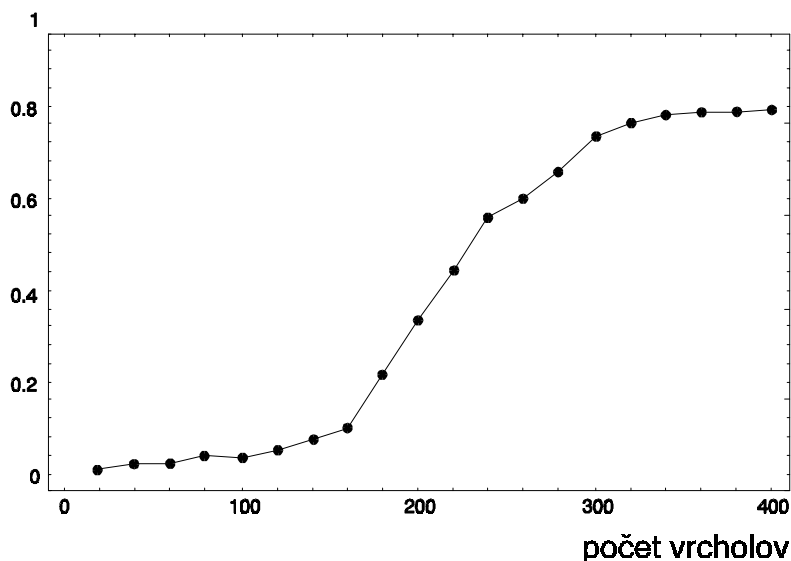
Moderným teóriám na vznik života predchádzal pokus Chicagského študenta Stanleyho Millera [77], ktorý jednoducho zatvoril do 5-litrovej fľaše vodu, metán, amoniak a vodík, fľašu týždeň zahrieval a nechal vo vnútri generovať elektrické iskry simulujúce blesky. Výsledkom bola zmes komplikovaných zlúčenín aminokyselín nutných k vzniku života. Nemecký biochemik Manfred Eigen spolu s Peterom Schusterom potom vytvorili teóriu hypercyklov [78], založenú na vzniku života zo siete replikujúcich sa RNA molekúl. Problém tu je, že RNA dosť ťažko môže vytvoriť svoju kópiu bez pomoci enzýmov, ktoré by mali byť produkované pomocou RNA, a RNA sama je normálne vytváraná prepisom z DNA.

Trocha pozmenenú teóriu vzniku života vytvoril jeden zo zriedkavých špičkových biológov, ktorí sa zaoberajú umelým životom, Stuart Kaufmann zo Santa Fe inštitútu, študujúci procesy samoorganizácie sietí spôsobených komplexným prepojením lokálnych reakcií [75,76]. Tento prístup sa dá použiť na "zapínaní" a "vypínaní" génov pri diferenciácii buniek, na správanie sa imúnneho systému, na evolučný proces, ale predovšetkým na modelovanie vzniku života z hypercyklov reakcií jednoduchých aminokyselín a iných zlúčenín prítomných v "prebiotickéj polievke". Z týchto jednoduchých zlúčenín potom vznikajú navzájom sa spájajúce a katalyzujúce polyméry, ktoré vytvoria stabilnú "sieť reakcií". Nemalo by teda ísť iba o RNA zlúčeniny.

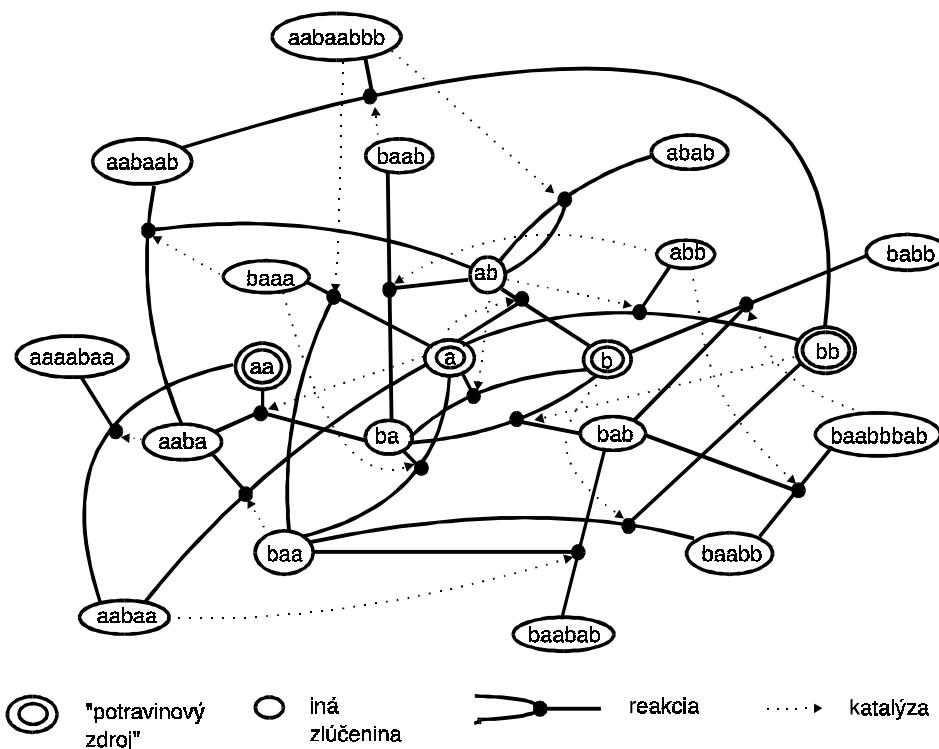
Tieto predstavy si môžeme priblížiť pomocou jednoduchého modelu. Predstavme si, že máme sadu vrcholov, ktoré náhodne spojíme s určitou pravdepodobnosťou hranami. Pokiaľ budeme zobrazovať pomer počtu vrcholov najväčšieho súvislého grafu (teda takého, kde sa dá po hranách preísť medzi ľubovoľnými dvoma vrcholmi) k počtu všetkých vrcholov v závislosti počtu vrcholov, dojdeme k obrázku 9.17, ktorý pripomína náhlu zmenu štruktúry (takú ako pri zmene ľadu na vodu). Vzniknutá závislosť nie je lineárna, ale sigmoidná; keď počet vrcholov presiahne určitú hranicu, relatívna veľkosť najväčšieho súvislého kusu grafu sa prudko zvýši. To je spôsobené tým, že aj keď pravdepodobnosť výskytu hrany medzi dvoma vrcholmi je stále rovnaká (v našom prípade pre najväčší graf bolo 400 vrcholov a 500 hrán), počet možných hrán stúpa

kvadraticky spolu s lineárnym zvýšením počtu vrcholov. Pri určitom množstve vrcholov je ich potom väčšina spojená do jedného celku. Tento príklad môže slúžiť ako analógia pre sieť chemických zlúčenín (vrcholov) spojených reakciami (hranami), kedy od určitej veľkosti bude koncentrácia určitej zlúčeniny závislá na koncentráciách väčšiny ostatných zlúčenín.

pomer počtu  
vrcholov  
súvislého  
podgrafu s max.  
počtom vrcholov  
k celkovému  
počtu vrcholov



**Obrázok 9.17.** Generujeme náhodne grafy (teda sústavu vrcholov, kde dvojice vrcholov môžu byť spojené hranami). Pravdepodobnosť výskytu hrany medzi dvoma vrcholmi je vždy rovnaká a odpovedá výskytu 500 hrán u grafu zo 400 vrcholmi. Spočítajme počet vrcholov maximálneho súvislého grafu vygenerovaného grafu, a zobrazme pomer počtu týchto vrcholov k celkovému počtu vrcholov. Aj napriek tomu, že pravdepodobnosť výskytu hrán v grafoch je stále rovnaká, krivka má sigmoidný charakter, pretože počet možných hrán sa zvyšuje kvadraticky s počtom vrcholov. V prípade, že vrcholmi sú zlúčeniny a hranami reakcie, daná simulácia napovedá, že pri určitej hranici rôznorodosti prítomných zlúčenín sa ich väčšina zapojí do siete reakcií - nastáva tvorba hypercyklov.



**Obrázok 9.18** Typický príklad malej autokatalytickej siete podľa Kaufmanna [75,76]. Reakcie sú reprezentované štepnými produktami (alebo eduktmi, smer reakcie závisí na koncentráciách) spolu s odpovedajúcim väčším polymérom. Bodkované čiarky označujú katalýzu reakcie a smerujú od katalyzátora danej reakcie. Mnoméry a diméry A a B predstavujú dodávaný "zdroj živín" (základné zlúčeniny v prebiotckej polievke).

Keď si zoberieme množinu všetkých možných zlúčenín, aj pri obmedzení molekulovou hmotnosťou, stabilitou, a použitím iba zlomku z chemických prvkov, budeme stále dostávať astronomické čísla. Je isté, že chemické zlúčeniny môžu vznikáť veľa rôznymi spôsobmi (najčastejšie z dvoch zlúčenín vzniká tretia zlúčenina, prípadne sa zlúčenina transformuje pomocou katalyzátoru) a taktó je možné pospájať dvojice, trojice, alebo štvorice zlúčenín, zúčastňujúcich sa jednej reakcie. Keď máme malý súbor zlúčenín, bude sa medzi nimi vyskytovať aj málo reakcií uspokojivo prebiehajúcich za normálneho tlaku a teploty. No pri zväčšovaní počtu zlúčenín nastane situácia, kedy väčšina zo zlúčenín bude navzájom prepojená do komplikovanej siete reakcií. Táto sieť sa po čase ustáli do rovnovážneho stavu, čo by malo zodpovedať základnej podmienke pre vznik komplikovanejších štruktúr ako je bunka (viď obr. 9.18).

Biologicky orientovaný prístup k evolúcii sa dá rozdeliť na filogenéziu, ktorá sa zaoberá evolúciou prírodného druhu v čase (mutácie a kríženie v genetickom algoritme), epigenézou, ktorá odpovedá učeniu jednotlivého organizmu v priebehu života (neurónové siete) a ontogenézou, ktorá sa zaoberá vývojom mnohobunčných organizmov zo základnej bunky (sebareprodukujúce sa automaty).

Evolučné inovácie:

1. Symbióza: bakteriálna symbióza ako počiatok tvorby predchodcov buniek ([79]). Namiesto výmeny genetickej informácie krížením tak vzniká v konečnom dôsledku zlúčenie genetickej informácie. Symbióza vo väčšom merítke môže byť aj zodpovedná za zásadnejšie zmeny organizmu, ktoré by inak vyžadovali mnohonásobné simultánne inovácie. V tzv. endosymbiotickej hypotéze ide o vznik eukaryontov (pokročilých buniek s jadrom) integráciou symbiotického systému eukaryontov (primitívnych buniek bez jadra) do jedného celku. V mikrobiálnej ríši, ktorá tvorí väčšinu života na zemi, je tato forma "spolupráce na vyššej úrovni" častá. Ostatne, mitochondrie človeka pomáhajúce prenášať kyslík boli kedysi najskôr tiež samostatné živočích - človek môže o sebe hovoriť ako o samostatnej entite iba do určitej miery.

Táto evolučná zmena je v rozpore s klasickým Darwinizmom, lebo znižuje výhody jednotlivca - pohltentý jednotlivec zaniká ako samostatný druh. "Strom života" je vykresľovaný zo stále sa rozvetvujúcimi vetvami. No symbióza môže znamenať spájanie vetví.

Okrem pohltentia alebo kríženia je možná výmena informácie aj priamym prenosom génov medzi druhmi, používajúc často vírusov ako sprostredkovateľov výmeny.

2. Smerovaná mutácie - keď si predstavíme náhodnú mutáciu spôsobenú kozmickými lúčmi, ťažko ich asi smerovať. No smerovať možno ich opravu. Opravný mechanizmus v bunke pracuje iba nad najdôležitejšími časťami kódu, ktorých zmena by prakticky isto znamenala smrť organizmu. No v menej závažných oblastiach tieto korekčné mechanizmy nemusia byť vyvinuté pre svoju náročnosť. Tým sa zvyšuje pravdepodobnosť zmeny v niektorých smeroch a znižuje v iných, podobne ako je tomu v Schwefelových evolučných stratégiách. Väčšina genetického kódu u vyšších organizmov ako sú prvky je totiž nezmyselná (aspoň podľa našich súčasných znalostí), a nikdy sa nepretransformuje do tvorby proteínov. Navyše u niektorých proteínov zmena aminokyseliny v niektorých pozíciách nepôsobí zmenu funkčnosti proteínu, takže opravný mechanizmus by bol zbytočný [73]. Tieto zmeny sú v niektorých častiach DNA také pravidelné v priebehu dlhých časových odsekov, že sa podľa nich dá zhruba určovať, kedy sa od seba oddelili jednotlivé druhy organizmov. Okrem opravného mechanizmu v r. 1988 Harvardský genetik John Cairns publikoval dôkaz, že za určitých podmienok zmeny prostredia baktéria *E. coli* bola sama schopná sa zmutovať v priamej odpovedi na potrebu spôsobenou zmenou prostredia (samozrejme sa predpokladá, že mechanizmus pôsobiaci cieleňú mutáciu vznikol evolúciou [80,81]).
3. Tzv. horizontálny prenos genetickej informácie, kedy sa časť informácie prenáša z jednej "dospelej" bunky na druhú "dospelú" bunku. Môže ísť tak o proces riadený samotnými bunkami ako aj o proces spôsobený vírom. Tento prenos sčasti môže u baktérií nahradzovať sexuálny prenos informácie.
4. Saltationism (z Lat. saltare - skok) je teória snažiaca sa vysvetliť fosilné nálezy, ktoré ukazujú náhly vznik plno vyvinutého druhu, ktorý potom ostáva viac-menej stabilný až do svojho zániku. Tento jav bol pomenovaný Stephenem Jay Goldem ako prerušovaná rovnováha (punctuated equilibrium [82,83]). Skoková teória je odmietaná väčšinou biológov, pretože nie je jasný presný dôvod týchto skokov, okrem podozrenia na zmeny spôsobené v rannom vývoji embrya a možno zmeny "implementácie" genetickej informácie, pre ktorú je rovnako dôležitá chromozomálna DNA ako všetky proteíny, hormóny a nechromozomálna DNA spolu s fyzikálnymi podmienkami ako je teplota, pH prostredia apod. Podstatná zmena druhu môže byť umožnená združovaním funkcií, hierarchickou úrovňou riadenia, a adaptívnym procesom meniacim celý súbor funkcií naraz.
5. Samo-organizácia: gény sú spolu spojené do siete vzťahov, a podstatná zmena jedného z nich spôsobí nutnosť usadenia sa v inom atraktorovom centre. No proti tejto zmene bojuje snaha populácie ostáť stabilnou. Aj tá najvýhodnejšia mutácia nebude nanič, pokiaľ nebude takýto jedinec prijatý kolektívom, čím bude daná možnosť ďalšieho rozšírenia mutácie rozmnožením potomkov. Stuart Kaufmann [75] na základe výpočtov tvrdí, že za určitou hranicou vzrastajúca hustota spojení medzi prvkami systému (agentmi)

zmrazuje adaptáciu. Mutácia navyše musí spĺňať základné požiadavky - byť prijateľná z hľadiska molekulárnej úrovne genómu a potom aj z hľadiska splnenia fyzikálnych požiadaviek na stavbu tela. Tým sú možnosti vzniku živých foriem obmedzené. No vzhľadom k tomu, že poznáme iba výsledný "výber" - existujúce živé organizmy, a nepoznáme z koľkých možností boli vybrané, nedá sa odhadnúť "hustota možných živých foriem", koľko bolo možností evolúcie, kde fosílné nálezky a súčasné formy života na Zemi sú iba jednou z možných realizácií. Odpoveď na takúto otázku môže naznačiť práve disciplína umelého života.

Trendy evolúcie:

1. Ireverzibilita - evolúcia sa nevracia naspäť, nové formy živočíchov sa nevracajú k vývojovo starším formám (veľryba je síce cicavec, ktorý sa vrátil do mora, no to je skôr výnimka ako pravidlo) a život obecné už neopúšťa raz obsadené nische.
2. Narastajúca zložitosť (neexistuje ale presná definícia toho čo zložitosť je, a nie je daný jednoznačný dôvod jej narastania, aj keď existujú hypotézy: zložitosť je spôsobená rôznorodosťou prostredia, ktorej prispôbené prvky sa skladajú na vytvorenie komplexného systému, je termodynamicky výhodnejšia, je spôsobená špecializáciou hnanou princípom prežitia najsilnejšieho vnútri druhu, atď.).
3. Narastajúca rôznorodosť - táto otázka ale nie je celkom jasná, lebo dnes síce máme veľa rôznych druhov hmyzu, no nemáme veľa v základoch rozdielnych rodov, ako je obecné hmyz. Táto situácia je v rozpore napr. s Cambrijským obdobím, kedy existovalo veľmi veľa zásadne rôznych druhov designu, z ktorých prežilo iba zopár.
4. Narastanie počtu jedincov
5. Narastajúca špecializácia - raz špecializované bunky alebo živočíšne druhy sa väčšinou nevracajú k väčšej flexibilitnosti.
6. Narastajúca vzájomná závislosť na iných živočíšnych druhoch a na spoločenstve tvorenom vlastným druhom - zatiaľ čo lišajníky "požierajú priamo kameň" a sú veľmi závislé na fyzickom prostredí (kyslý dážď), človek môže žiť takmer kdekoľvek, no potrebuje na prežitie spoluprácu s ostatnými ľuďmi.
7. Narastajúca schopnosť evolúcie. R. 1987, Cambridgeský zoológ Richard Dawkins na Prvom workschope o umelom živote prezentoval článok Evolúcia schopnosti vývoja [84]. Navrhol prírodný výber vyššieho druhu, ktorý nepreferuje iba jedincov, ale tendenciu vyvíjať sa určitým smerom, alebo tendenciu vyvíjať sa vôbec. Biológ Leo Buss [85] z Yale University sa zamýšľa nad tým, ako sa vyvíja pojem jedinca. Zo začiatku to mohol byť stabilný systém reakcií polymérov, potom bunka, potom organizmus. Ako ďalšia jednotka môže slúžiť celý druh. Jeho kvalita a schopnosť prežitia nemusí závisieť na kvalite jednotlivcov - tá je porovnávaná vnitrodruhovo, no na iných kvalitách ako je napríklad schopnosť sa vyvíjať.

**Programy budúcnosti** je možné si predstaviť ako pestované neriadené monštra, ktoré 99% času strávia nad vlastnými nezmyselnými operáciami a iba jedno percento venujú na "rozumný" výpočet z hľadiska užívateľa. Táto neefektívnosť by mala byť vyvážená schopnosťou adaptovať sa na nové udalosti, pre ktoré dosiaľ neexistuje naučená odpoveď systému. Vzhľadom na stále zlacňovanie času počítača to bude výhodnejší, ako najat' programátora, ktorý vymyslí perfektný malý program. Tento trend je čiastočne vidno na rozširovaní neefektívnych, no k laikom prívetivých programov firmy Microsoft. Tie sú síce robené ľuďmi, no pravdepodobne vzhľadom k neukončenej evolúcii - malej komunikácii medzi "sieťou" autorov má skôr vlastnosti neriaditeľného "monštra" s náhodne generovanými "features" (špecifikami, programátormi mimo Microsoftu nazývanými chybami).

Šance **samovolného vzniku inteligencie u programoch umelého života** patria zatiaľ do oblasti science fiction. Základné vlastnosti života ako pohyblivosť v meniacom sa prostredí, zmyslové vnímanie okolia a ostatné vlastnosti nutné na udržanie a rozvíjanie života sa vyvíjali cez miliardu rokov, zatiaľ čo abstraktné myslenie a jazyk iba desať tisíce rokov. To by naznačovalo, že vytvorenie umelej inteligencie by malo byť oveľa jednoduchšie ako vytvorenie "živého" reagujúceho a reprodukovajúceho sa organizmu. No podľa mienky autorov je inteligencia vystavaná na základe živého organizmu, a vytvoriť ju na inom základe vyžaduje porovnateľne komplikovanú "základňu" ako je živá hmota, čo pri celej svojej komplikovanosti počítače ešte zďaleka nedosahujú.

## Literatúra

- [1] S. Levy. *Artificial Life: The Quest for a New Creation*. Pantheon, New York, 1992.
- [2] Karl Sigmund: *Games of Life: Exploration in Ecology, Evolution and Behaviour*. Oxford University Press, New York, 1993.

- [3] Claus Emmeche: *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*. Princeton University Press, 1994.
- [4] K. Kelly: *Out of Control: The New Biology of Machines*. Fourth Estate, 1994.
- [5] C. Langton: *Artificial Life: An Overview*. MIT Press, Cambridge, MA, 1995.
- [6] C. G. Langton, ed.: *Artificial Life*. SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. 6. The Proceedings of the 1987 Workshop in Los Alamos, NM. Addison-Wesley, Redwood City CA, 1989, p. 43.
- [7] C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, S. Rasmussen, eds.: *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991.
- [8] C. Langton, ed.: *Artificial Life III*. SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. 17., Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1993.
- [9] R. Brooks and P. Maes, eds.: *Artificial Life IV*. MIT Press, 1994.
- [10] C. G. Langton and T. Shimohara, eds.: *Artificial Life V*. Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems (Complex Adaptive Systems), Mit Press, 1997.
- [11] J.-A. Meyer and S. W. Wilson, eds.: *From animals to animats: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior* (1990, Paris, France). MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [12] J.-A. Meyer, H. L. Roitblat, and Stewart W. Wilson, eds.: *From animals to animats II: Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [13] D. Cliff, P. Husbands, J.-A. Meyer, and S. W. Wilson, eds.: *From animals to animats III: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994.
- [14] P. Maes, M. J. Mataric, J.-A. Meyer, J. Pollack, and Stewart W. Wilson (eds.): *From Animals to Animats IV: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [15] *The Artificial Life Journal*, MIT Press Journals, 55 Hayward Street, Cambridge, MA 02142-1399, USA
- [16] *Adaptive Behavior*, MIT Press Journals, 55 Hayward Street, Cambridge, MA 02142-1399, USA
- [17] *Evolutionary Computation*, MIT Press Journals, 55 Hayward Street, Cambridge, MA 02142-1399, USA
- [18] *Complex Systems*, published by: Complex Systems Publications, Inc., P.O. Box 6149, Champaign, IL 61821-8149, USA.
- [19] F.J. Varela and P. Bourguine, eds.: *Toward a practice of autonomous systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA, 1992
- [20] F. Moran, A. Moreno, J.J. Merelo, and P. Chacon, eds.: *Advances in Artificial Life: Proceedings of the Third European Conference on Artificial Life*. No. 929 in Lecture Notes In Artificial Intelligence, Springer, 1995.
- [21] P. Husbands and I. Harvey, eds.: *Fourth European Conference on Artificial Life*. Mit Press, 1997.
- [22] E. Hillebrand and J. Stender: *Many-Agent Simulation and Artificial Life*. IOS Press, 1994.
- [23] R. Khosla and T. Dillon: *Engineering Intelligent Hybrid Multi-Agent Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [24] J. Jalůvka: *Moderní počítačové viry: podstata, prevence, ochrana*. Computer Press, Praha, 1996.
- [25] M. Danilák: *Svet počítačových virusov*. Grada, Praha, 1994XX.
- [26] N. M. Thalmam and D. Thalmam: *Artificial Life and Virtual Reality*. J. Wiley, 1995.
- [27] V. Kvasnička, L. Beňušková, J. Pospíchal, I. Farkaš, P. Tiňo, A. Král: *Úvod do teórie neuronových sietí*. IRIS, Bratislava 1997.
- [28] M. Resnick: *Turtles, Termites, and Traffic Jams : Explorations in Massively Parallel Microworlds*. Complex Adaptive Systems, Mit Press, 1997.
- [29] *SimLife* - Maxis (DOS, Windows), Maxis 2121 N. California Blvd., Suite 600, Walnut Creek, CA 94596-3572.
- [30] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer: *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer Verlag, New York, 1990.
- [31] H.O. Peitgen, H. Jürgens, and D. Saupe: *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer Verlag, N.Y., 1992.
- [32] K. Sims: Artificial Evolution for Computer Graphics, *Computer Graphics* (Siggraph '91 proceedings), 25(4), 1991, 466-476.
- [33] K. Sims: Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition, *Artificial Life IV*, R. Brooks and P. Maes (eds.), MIT Press, 1994, pp. 28-39.
- [34] R. Dawkins: *The Blind Watchmaker*. E.E. Norton, New York, 1987.
- [35] A.J. Lotka: *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1925.
- [36] V. Volterra: Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature*, 118, (1926) 558-560.



- [37] E. Renshaw: *Modelling Biological Populations in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [38] P.F. Velhurst: Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Corr. Math. et Phys. publ. par A. Quetelet*, T.X (1838) 113-121.
- [39] R. Pearl, L.J. Reed: On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6 (1920) 275-288.
- [40] R.J. Collins and D.J. Jefferson: AntFarm: Towards Simulated Evolution. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, S. Rasmussen, eds.: *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991, pp. 579-602.
- [41] C. Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics* 21 (1987) 25-34.
- [42] H. Gutowitz: *Cellular Automata: Theory and Experiment*. MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA, 1991.
- [43] S. Wolfram, ed.: *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific, Singapore, 1986.
- [44] J. von Neumann: *Theory of Self-Reproducing Automata*. Completed and edited by A. W. Burks. University of Illinois Press, Champaign-Urbana, 1966.
- [45] M. Gardner: The fantastic combination of John Conway's new solitaire game "Life". *Scientific American*, 223, (1970) 120-123.
- [46] M. Gardner: Mathematical games: on cellular automata, self-reproduction, the Garden of Eden and the game "Life". *Scientific American*, 224(2), (1971) 112-117.
- [47] E.R. Berlekamp, J.H. Conway, and R.K. Guy: *Winning Ways for your Mathematical Plays, volume 2*. Academic Press, 1982, chapter 25.
- [48] W. Poundstone. *The Recursive Universe*. William Morrow and Company, New York, 1985.
- [49] J. Thatcher: Self-Describing Turing Machines and Self-Reproducing Cellular Automata. In A. Burks (ed): *Essays on Cellular Automata*. University of Illinois Press, Urbana, 1970, pp. 103-131.
- [50] C.G. Langton: Life at the Edge of Chaos. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, S. Rasmussen, eds.: *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991, pp. 41-91.
- [51] S. Wolfram: Universality and Complexity in Cellular Automata. *Physica D* 10 (1984) 1-35.
- [52] T. Toffoli: Cellular automata as an alternative to (rather than an approximation of) differential equations in modeling physics. *Physica D*, 10 (1984) 117-127.
- [53] U. Frisch, B. Hasslacher, and Y. Pomeau: Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equation. *Physical Review Letters*, 56 (1986)1505-1508.
- [54] J. Hardy, O. De Pazzis, and Y. Pomeau: Molecular dynamics of a classical lattice gas: Transport properties and time correlation functions. *Physical Review A*, 13 (1976) 1949-1960.
- [55] C. Bennett and G. Grinstein. Role of irreversibility in stabilizing complex and nonergodic behavior in locally interacting discrete systems. *Physical Review Letters*, 55 (1985) 657-660.
- [56] G. Vichniac: Simulating physics with cellular automata. *Physica D*, 10 (1984) 96-115.
- [57] G. B. Ermentrout and L. Edelstein-Keshet: Cellular automata approaches to biological modeling. *Journal of Theoretical Biology*, 160 (1993) 97-133.
- [58] M. Sipper: *Evolution of Parallel Cellular Machines, The Cellular Programming Approach*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1194, Springer Verlag, 1997.
- [59] P. Maes. Designing autonomous agents: Theory and practice from biology to engineering and back. *Robotics and Autonomous Systems*, 6 (1990) 1-2.
- [60] R.A. Brooks: Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 (1991) 139-160.
- [61] R.A. Brooks: Artificial life and real robots. In F.J. Varela and P. Bourguine, eds.: *Toward a practice of autonomous systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA, 1992, pp. 3-10.
- [62] R. Axelrod: *The evolution of cooperation*. Basic Books, New York, 1984.
- [63] R. Axelrod: *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Conflict and Cooperation*. Princeton University Press, 1997.
- [64] R. Axelrod: The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma. In D. Davis: *Genetic algorithms and simulated annealing*. Pitman, London, 1987, pp. 32-43.
- [65] D. W. Hillis: Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure. In: Langton, C., C. Taylor, J.D. Farmer, S. Rasmussen (eds.): *Artificial Life II*, Santa Fe Institute Studies in Complexity, vol. X, 313-324. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991.
- [66] Olsson, B.: Optimization Using a Host-Parasite Model with Variable-Size Distributed Population. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Nagoya, 1996.
- [67] D. Layzer: *Cosmogenesis: The Growth of Order in the Universe*. Oxford University Press, 1990.
- [68] K. Lindgren: Evolutionary phenomena in simple dynamics. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, S. Rasmussen, eds.: *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991, pp. 295-312.

- [69] T. S. Ray: An approach to the synthesis of life. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, S. Rasmussen, eds.: *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991, pp. 371--408.
- [70] A.N. Pargellis, The spontaneous generation of digital "Life". *Physica D* 91 (1996) 86-96.
- [71] J. Singh, M.A. Ator, E.P. Jaeger, M.P. Allen, D.A. Whipple, J.E. Solowej, S. Chowdhary, and A.M.Treasurywala: Application of Genetic Algorithms to Combinatorial Synthesis: A Computational Approach to Lead Identification and Lead Optimisation. *J. American Chemical Society*, 118 (1996) 1669-1676.
- [72] D.E. Clark, and D.R. Westhead: A Review of Evolutionary Algorithms in Computer-Aided Molecular Design. *J. Computer-Aided Molecular Design*, 10 (1996) 337-358.
- [73] A. Markoš: *Povstávání živého tvaru*. Vesmír, Praha, 1997.
- [74] J. Maynard Smith: *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, United Kingdom, 1982.
- [75] S. Kauffman: *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford U. Press, N.Y., 1993.
- [76] S. Kauffman: *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford U. Press, N.Y., 1995.
- [77] S.M. Miller and L.E. Orgel: *The Origins of Life on Earth*. Prentice-Hall, Englewood, CA, 1967.
- [78] M. Eigen and P. Schuster: *The hypercycle: A Principle of Natural Self-organization*. Springer, Berlin 1979.
- [79] L. Margulis and R. Fester, eds.: *Symbiosys as a Source of Evolutionary Innovation: Speciation and Morphogenesis*. The MIT Press, 1991.
- [80] P.L. Foster and J. Cairns: Mechanisms of Directed Mutation. *Genetics* 131 (1992) 783-789.
- [81] G.B. Hall: Spontaneous Point Mutations That Occur More Often When Advantageous Than When Neutral. *Genetics* 126 (1990) 5-16.
- [82] N. Eldredge and S.J. Gould: Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism. In T.J.M. Schopf, ed.: *Models in paleontology*. Freeman Cooper, San Francisco, 1972.
- [83] S. J. Gould: *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. Norton, N.Y., 1989.
- [84] R. Dawkins: Evolution of Evolvability. In C. G. Langton, ed.: *Artificial Life*. SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. 6. The Proceedings of the 1987 Workshop in Los Almos, NM. Addison-Wesley, Redwood City CA, 1989, pp. 201-220.
- [85] L.W. Buss: *The Evolution of Individuality*. Princeton University Press, 1987.