elektrorevue
ISSN 1213 - 1539

Rok / Year:	Svazek / Volume:	Číslo / Number:
2010	12	6

Simulace umělého života

Artificial life simulation

Michal Janošek

michal.janosek@osu.cz

Katedra informatiky a počítačů, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita v Ostravě

Abstrakt: Tento článek si klade za cíl seznámit čtenáře se základními charakteristikami umělého života a jeho simulací. V článku je podrobně rozebrána problematika simulace umělého života a jsou představeny různé simulátory spolu s jejich aplikační oblastí. Rovněž jsou zmíněny výsledky některých výzkumů, kterých bylo pomocí těchto simulátorů dosaženo. Dále jsou nastíněny příklady použití, případně možný budoucí vývoj těchto simulátorů.

Abstract: This paper is aimed to basics of artificial life simulation. In the article there is detail description of artificial life simulation, its problems and several simulators are presented with their application area. Some simulator reaserch results are mentioned as well. So as examples of use and future development of these simulators.

elektrorevue
ISSN 1213 - 1539

Simulace umělého života

Michal Janošek[1]

[1]Ostravská univerzita v Ostravě, Přírodovědecká fakulta, Katedra informatiky a počítačů
Email: michal.janosek@osu.cz

Abstrakt *– Tento článek si klade za cíl seznámit čtenáře se základními charakteristikami umělého života a jeho simulací. V článku je podrobně rozebrána problematika simulace umělého života a jsou představeny různé simulátory spolu s jejich aplikační oblastí. Rovněž jsou zmíněny výsledky některých výzkumů, kterých bylo pomocí těchto simulátorů dosaženo. Dále jsou nastíněny příklady použití, případně možný budoucí vývoj těchto simulátorů.*

1 Umělý život

Podle zakladatele disciplíny umělého života Christophera Langtona se v tomto oboru zabýváme zkoumáním života jaký je a také jaký by mohl být. V případě, že vezmeme v potaz nejen organismy na bázi uhlíku, můžeme disciplínu umělého života rozšířit v podstatě na cokoliv kolem nás. V konečném důsledku, umělý život může být cokoliv, co za něj hodláme považovat.

Základem umělého života je přístup zdola nahoru. Skládáním elementárních kamenů se snažíme vytvořit takový systém, který by jako celek působil anebo vytvářel formy podobné životu, případně se alespoň jako život projevoval. Jako základní kámen si můžeme představit molekuly, buňky, nebo samotné jedince. Záleží na zvolené úrovni abstrakce a účelu, pro který budeme zkoumaný systém vytvářet. Ne vždy potřebujeme vytvářet umělý život od úrovně makromolekul, molekul, nebo dokonce samotných atomů. Při simulaci umělého života postupujeme synteticky. Zde je velký prostor pro emergenci, neboť vlastnosti systémů umělého života jako celku nejsou přímo odvoditelné z jeho částí. Celek je zde více než kombinace jeho částí. Čím více bude mít náš systém svých základních komponent a k čím více interakcím bude v takovém systému docházet, tím těžší bude odvodit vznik jevů a chování systému jako celku.

Návrh systému umělého života je relativně jednoduchý, ale i takto vytvořený systém dokáže vyvinout poměrně komplexní a složité struktury. Spolu s rostoucí složitostí systému můžeme dokonce získat schopnost rozmnožování. Díky evoluci se náš systém může vyvinout v mnohem dokonalejší, či složitější strukturu, než bychom byli sami schopni navrhnout. To vše za pomocí reprodukce, mutace či selekce. Reprodukcí zde rozumíme rozmnožování, mutací dědičnou změnu genotypu, a selekcí přirozený výběr dle fenotypu. Za podstatu života pak považujeme informace a ne materiální formy, jež slouží k jejich uchovávání. V živých organismech rozlišujeme dvojí typ informace, a to genotyp a fenotyp [3]. Genotyp je soubor všech genetických informací organismu, který je odevzdáván potomkům. Fenotyp je souborem všech pozorovatelným vlastností a znaků organismu a slouží jako podklad při vytváření struktury nového jedince. Na fenotyp organismu má vliv nejen genotyp, ale i samotné prostředí, v němž se organismy nacházejí. Návrh systému umělého života je vždy syntetický, ať jde o děje trvající milisekundy, nebo miliony let, což platí pro makrosvět i mikrosvět.

2 Simulace umělého života

Prostředků, jak simulovat umělý život je mnoho. Záleží, na kterou jeho část se chceme zaměřit. V zásadě máme tři hlavní směry, in wetware, in hardware a in software.

In wetware představuje replikující se a vyvíjející se makromolekuly a svět nukleových kyselin. Tyto kyseliny se nacházejí v každé buňce a ve své struktuře obsahují genetickou informaci. V podstatě jde o využití biologického materiálu a experimentů na něm, případně o vývoj nových umělých forem života. Základním přístupem in wetware je syntetická biologie, jež život bere jako stroj sestavený z molekul [5]. Jedním z projektů věnujícím se in wetware a syntetické biologii je projekt ProtoCELL [6], jehož hlavním záměrem je vytvořit samoreplikující se molekulární stroj.

In hardware představuje zejména robotiku a nanotechnologii. Pro účely simulace vytváříme rozmanité hardwarové agenty se senzory a aktuátory a umisťujeme je do různých prostředí. Nanotechnologie nám zde otevírá úplně jiný rozměr nanosvěta, kdy vytváříme materiály a zařízení na atomové anebo molekulární úrovni. Pomocí těchto zařízení jsme schopni opravovat živou tkáň, zlepšovat úroveň léčiv, či ovlivňovat celé ekosystémy [7].

Pro modelování pomocí in wetware a in hardware je společné, že pracujeme s reálnými fyzickými prvky, ze kterých vytváříme umělý život.

Na rozdíl od obou předchozích přístupů k modelování umělého života, se v rámci přístupu in software veškerý život odehrává uvnitř počítače v počítačové paměti za pomoci procesorové jednotky. Nemáme zde sice fyzický kontakt s „hmotným“ životem, na druhou stranu můžeme dělat simulace a pokusy, které by se jen těžko nebo velmi dlouho realizovaly v obou předchozích přístupech. Jako příklad si uveďme evoluci, která může trvat miliony let, ale při modelováni in software si ji můžeme odzkoušet během několika okamžiků, což je po dobu nepoměrně kratší.

Hlavní přínos a sílu všech uvedených přístupů spatřujeme zejména v jejich kombinaci. Bereme-li všechny tři přístupy ne jako vzájemné konkurenty, ale jako oblasti, které se navzájem

vhodně doplňují, tak často můžeme v jedné z nich nalézt inspiraci pro aplikaci v jiné oblasti. Kupříkladu již zmíněná evoluce. Na počítači si můžeme vyzkoušet nejvhodnější přístup k evoluci a ten až poté aplikovat. Totéž platí při vývoji nových materiálů v nanotechnologii. Naopak pro simulaci in software se inspirujeme v oblastech in wetware a in hardware. Můžeme se pokusit simulovat chování bakterií, případně simulovat růst a vývoj fauny např. pomocí L-systémů, což jsou paralelní systémy formální gramatiky, schopné se rekurzivně přepisovat a vytvářet samopodobné konstrukce.

V tomto článku se budeme věnovat hlavně oblasti in software. Tato oblast je jednoduše přístupná bez speciálního vybavení a dotýká se i všech oblastí ostatních.

V případě simulace umělého života in software máme k dispozici množství již hotových a mnohdy i komplexních simulátorů připravených k použití.

Pojďme se nyní podívat, jaké simulátory umělého života jsou v současné době k dispozici, co nabízejí, a na jaký druh simulace jsou zaměřeny.

2.1 Tierra

Tierra je simulátor samoreprodukujících se počítačových programů. Programy mezi sebou soupeří ve virtuálním počítači o operační paměť a procesorový čas [8]. Jedná se o evoluci s otevřeným koncem.

Po spuštění vytvoří Tierra virtuální počítač a v něm Darwinovský operační systém, který byl vytvořen tak, že všechny spustitelné kódy mohou podléhat evoluci. To znamená, že strojový kód může zmutovat, anebo být rekombinován. Výsledný kód zůstane funkční po dost dlouhou dobu, aby mohl být vylepšen pomocí metody přirozeného výběru.

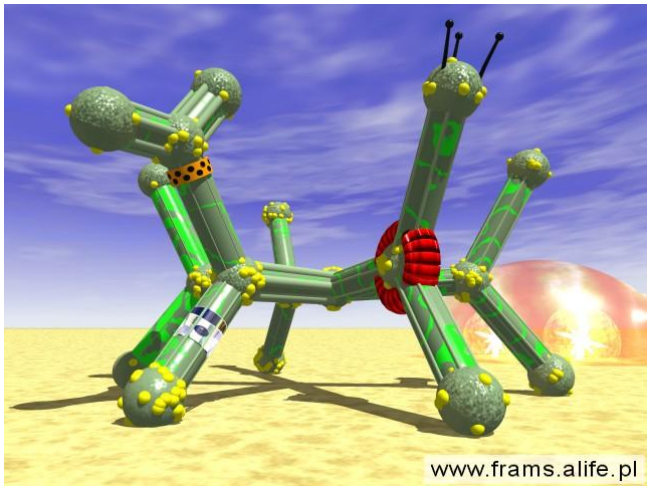
V průběhu simulace Tierra můžeme pomocí grafické nástavby Aritificial Life Monitor (ALmond) sledovat vytváření různých komunit, rozložení sil mezi hostitelským kódem, parazity, případně imunním kódem, který se může vytvořit v pokročilé fázi simulace. Na Obrázku 1 vidíme jednotku programu sestávající se ze tří genů, kde procesor, reprezentován zelenou sférou, vykonává kód prvního genu.

Obrázek 1: Tierra - program reprezentovaný třemi geny

Předmětem projektu je simulovat evoluci za použití přirozeného výběru na digitálním médiu počítače s cílem generovat komplexní a inteligentní software. V [9] byla prokázána určitá míra možnosti Tierry měřit schopnost populace programů generovat genetickou rozmanitost při použití evoluce s přirozeným výběrem.

2.2 Framsticks

Framsticks je simulátor umělého života, jež umožňuje studium evoluce organizmů v podobných podmínkách jako na Zemi pomocí modelování struktur v trojrozměrném prostředí. Jsou zde modelovány jak mechanické struktury (tělo), tak kontrolní systémy (mozek) [10]. Tento simulátor nám dává na výběr mezi řízenou a spontánní evolucí. Pomocí řízené evoluce můžeme vytvářet organizmy s určenými vlastnostmi (hledání potravy, pronásledování cílů). V případě spontánní evoluce se jedinou funkcí stává délka života spojená s reprodukcí. Tyto experimenty mohou vést ke komplexnímu chování systému, ale i k neočekávaným výsledkům.



Obrázek 2: Framsticks – stvoření se třemi receptory

Lze naplánovat celou řadu experimentů zahrnujících jak jednoduchou optimalizaci (pomocí evolučních algoritmů), tak i koevoluci, nebo lze pracovat s populacemi s různým genovým základem atd.

Nejvýznamnější částí výzkumu prováděného pomocí Framsticku je studium a vyhodnocování schopností evoluce vedoucí k výše jmenovanému komplexnímu chování organizmů, ať už se jedná o samotné jedince anebo skupiny jedinců. Doposud v prostředí Framsticku proběhlo několik experimentů, jmenujme například porovnání automatické optimalizace oproti lidskému návrhu, symetrii v evoluci a v lidském návrhu, shlukování dle měření podobnosti, nebo visuální koordinaci inspirovanou biologickými vzory [11].

Simulátor Framsticks se stále vyvíjí a existuje k němu mnoho dalších nádstaveb či utilit, které uživateli umožní lépe pracovat na řešení daného problému.

2.3 Primordial Life

Primordial Life je evoluční experiment probíhající v počítači [17]. Je to simulace umělého života, při které můžeme sledovat umělé životní formy tzv. bioty v průběhu jejich evoluce, boje a přežití. Každý biot má svůj vlastní genetický kód. Bioty mohou nabývat různých tvarů, velikostí a barev. Existují dva typy biotů – predátor a kořist.

Všechny bioty jsou vytvořeny z čar, kde každá čára má společně se svou barvou specifický význam. Základem jsou bioty složené ze zelených a červených čar. Zelené čáry jsou schopny získávat energii z prostředí. Můžeme si je představit jako rostliny získávající sluneční energii. Naproti tomu bioty složené z červených čar jsou predátoři požírající zelené bioty. Bez zelených biotů by vše zahynulo, proto jsou schopny se regenerovat.

Dále existují i jiné typy barevných čar. Např. modré čáry slouží jako obranné štíty proti útokům predátorů, světlemodré čáry slouží jako raketové motory pohánějící bioty a bílé jsou nutné pro vzájemné křížení apod.

Před startem simulaci máme na výběr z několika možností nastavení biotů a jejich prostředí. Můžeme nastavit velikost populace, rychlost mutace, délku života, rychlost regenerace, rychlost biotů, druh rozmnožování apod. V současné době je k dispozici třetí verze programu, která umožňuje práci s počítačovou sítí a takto spolu provázat různá prostředí vytvořená různými uživateli, přičemž se zde nabízí možnost zkoumání chování biotů v jiném prostředí, než v kterém byli vytvořeni.

2.4 EINSTein

EINSTein – Enhanced ISAAC Neural Simulation Toolkit je agentově založená laboratoř umělého života sloužící k výzkumu samoorganizujícího se emergentního chování v pozemním souboji [12]. ISAAC (Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat) byl vyvinut pro jednoduché ověření modelu boje jako emergentního samoorganizujícího se procesu. Zásadní charakteristikou tohoto modelu je přístup zdola-nahoru.

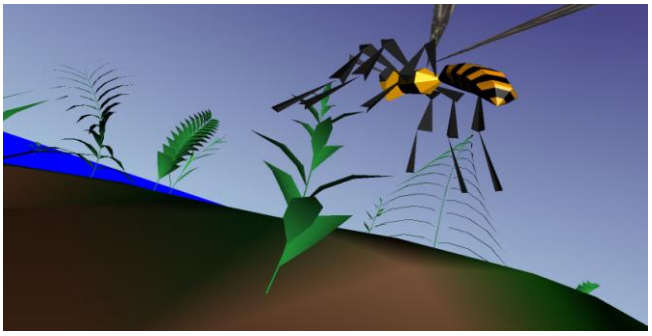
Systém lze charakterizovat několika hlavními znaky. Patří mezi ně lokální rozhodování, n-dimenzionální parametrický prostor agentů (dosah senzorů, zbraní, atd.), vícečlenné vojenské oddíly, komunikace, lokální a globální vůdci, osobnosti agentů, přístupné a nepřístupné terény, inteligentní zaměřování, skládání jednotek pomocí genetických algoritmů, on-line sbírání dat, vizualizace apod.

O simulátor EINSTein jeví zájem i americká armáda, neboť vývoj toolkitu je částečně financován z grantu kanceláře námořnictva (Office of Naval Research) USA. Na základech simulátoru EINSTein započal vývoj podobného simulátoru pod názvem SOTCAC zaměřeného na boj s terorizmem. SOTCAT používá adaptivní agenty k popisu samoorganizovaného emergentního chování teroristických sítí. Simulátor zde zkoumá dynamiku uvnitř sítí, dynamiku sítí jako celku a dynamiku mezi sítěmi, teroristickými i protiteroristickými.

2.5 Nerve Garden

Nerve Garden je 3D virtuální terárium umožňující uživateli přes Internet vypěstovat doslova ze semena různé rostliny a struktury [13]. Jedná se o multi-uživatelský, 3D virtuální svět. Používá množství různých technologií jako L-systémy, VRML (grafický formát pro vytváření a zobrazení 3D grafiky), neuronové sítě, Javu, web a další. Projekt poskytuje zajímavé informace z oblasti schopnosti růstu, poklesu a transformace energie v jednoduchém ekosystému. Vytvoří tak online laboratoř, která může být používána a rozšiřována prostřednictvím množství uživatelů zároveň, tj. multi-uživatelskému přístupu.

Uživatel si zde nejprve v klientu zvaném Germinator navrhne svou vlastní rostlinu, kdy v reálném čase mění pravidla L-systému a může tak vytvářet různé varianty modelů. Následně je model předán do tzv. Seeder Garden, který obsahuje VRML export z Germinatoru a následně další aplikace nazvaná NerveServer umístí model do 3D terária, kde mohou uživatelé pozorovat své modely – rostliny.



Obrázek 3: Nerve garden – grafická reprezentace zahrady

Ze strany organizace Biota, která je tvůrcem Nerve Garden, je snaha o vytvoření druhé verze simulátoru, který by odstranil nedostatky první verze. Mělo by jít o vylepšení komunikace a reprodukce mezi virtuálními stroji obsahující další zahrady, druhy rostlin, či predátory, kteří by se mohli živit energií rostlin apod.

2.6 PolyWorld

PolyWorld je simulátor životního prostředí, který umožňuje simulaci organizmů v takovém prostředí, kde se organizmy samy reprodukují, bojují mezi sebou, zabíjejí se, přijímají potravu, která se vyskytuje po celém modelovém světě, a vyvíjejí různé strategie pro přežití v tomto prostředí [14].

Celkové chování organizmu (pohyb, otočení, útok, přijímání potravy, reprodukce, atd.) je kontrolováno jeho neuronovou sítí – mozkem. Architektura mozku je odvozena od jeho genetického kódu – tzn. velikost, počet neuronů, rozdělení do vrstev a typy spojení. Je zde využito Hebbova učení, a díky němuž mají organizmy schopnost učit se během svého života. Organizmy vnímají okolní svět prostřednictvím svého „smyslu pro vidění“, který si vytvářejí renderováním okolního světa dle svého úhlu pohledu. Také fyziologie organizmů je kódována geneticky, tzn., že všechny komponenty (mozek, tělo) se mohou vyvíjet v průběhu generací. V každé simulaci dojde k vývoji různých rozmanitých druhů s různými vlastnostmi, chováním a strategiemi přežití.

Polyworld byl použit k výzkumu funkční a strukturální topologie evolvujících neuronových sítí. Struktura a aktivita neuronových sítí se stává s postupujícím časem ustálenější, tak jak bylo očekáváno v evoluci komplexních distribuovaných

procesů. V budoucím výzkumu pak bude nutno ověřit statickou významnost tohoto zjištění.

2.7 Swarm

Swarm je platforma pro agentově založenou simulaci vycházející z přístupu zdola-nahoru. Je to nástroj pro tvorbu simulátorů. Zahrnuje kompletní framework pro návrh, popis a experimenty s ABM (agent-based models) [15]. Swarm se tak stává užitečným nástrojem pro studium modelů založených na agentech. Základní architekturou je zde simulace skupiny souběžně interagujících agentů. Díky tomu lze implementovat širokou škálu různých modelů.

Pro použití Swarmu se doporučuje znát alespoň základy programovacího jazyka Objective C nebo Java, protože jádro Swarmu se sestává z kolekce základních knihoven umožňujících simulaci multiagentových systémů a tvorbu konkrétního simulačního prostředí přesně na míru. Samozřejmě je možné využít nějakou z možných nástaveb Swarmu. Swarm samotný obsahuje i grafické rozhraní, které je pro uživatele více uživatelsky přístupné.

Tato platforma má okolo sebe soustředěnu poměrně širokou komunitu. Pravidelně probíhají konference Swarmfest. Na stránkách Swarmfestu [16] je možnost stáhnout množství zajímavých prezentací z těchto konferencí. Použití platformy je velmi univerzální. Je možno simulovat chování sedimentů v řece, modelování chování imunitního systému, či chování tržního prostředí. Tento nástroj má nejuniverzálnější použití ze všech již dříve zmiňovaných simulátorů.

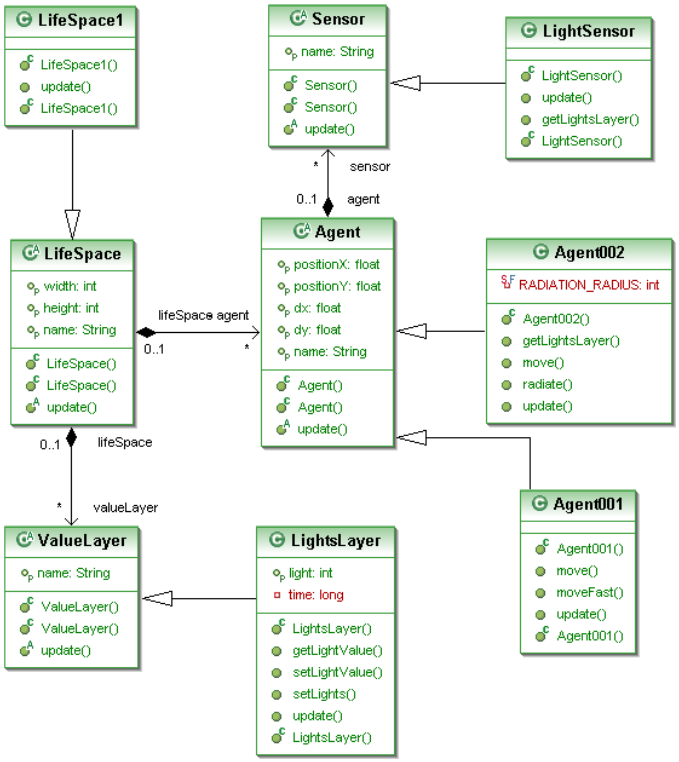
2.8 ALcore

ALcore je simulátor umělého života sestávající z balíku abstraktních tříd vytvořený autorem tohoto článku. Jádro simulátoru je vytvořeno v jazyce Java, a proto je nutné, aby uživatel zvládal alespoň základy programování. Při tvorbě simulátoru byl kladen důraz na jednoduchost, rychlost, znovupoužitelnost a rozšiřitelnost.

Na základě těchto kritérií byl simulátor postaven na principech reaktivních agentů. Reaktivní agent vykonává své akce pouze na základě podnětů z prostředí, ve kterém se nachází. Na základě podnětů a aktuálního vnitřního stavu, vybírá akce, které provede svými aktuátory [2]. S ostatními agenty interaguje skrze prostředí anebo přímou komunikací.

Na Obrázku 4 můžeme vidět konkrétní implementaci simulátoru. Základní třídou je třída *LifeSpace*, která vymezuje životní prostor jednotlivým *Agentům*. Každý *Agent* může integrovat různé množství instancí třídy *Sensor*. Za agenta je považován jakýkoliv objekt vyskytující se v simulaci, ať se jedná o statický nebo dynamický objekt. A nakonec třída *ValueLayer* obsahuje všechny fyzikální vlastnosti vyskytující se v životním prostoru třídy *LifeSpace*.

Třída *LifeSpace1* rozšiřuje původní abstraktní třídu *LifeSpace* s definicemi vlastních vlastností životního prostředí. Třída *LightsLayer* rozšiřuje abstraktní třídu *ValueLayer* a definuje vlastnosti pro uložení a uchovávání informací o elektromagnetickém záření ve viditelném spektru. Dále zde máme dva agenty, *Agent001* a *Agent002* rozšiřující původní abstraktní třídu *Agent* a nakonec třídu *LightSensor* rozšiřující abstraktní třídu *Sensor* umožňující získat data z vrstvy *LightsLayer*. Agenty jsou dvojího druhu. *Agent002* nemá žádný senzor. Jeho jedinou funkcí je emitovat světelné záření. Toto záření uchovává vrstva *LightsLayer*. *Agent001* má světelný senzor, který mu umožňuje získat informace o síle a gradientu záření z vrstvy *LightsLayer*. Čím je záření intenzivnější, tím rychleji se agent pohybuje.



Obrázek 4: ALcore – konkrétní aplikace

I při takto jednoduché simulaci lze pozorovat známky emergentního chování, které způsobila interakce agentů mezi sebou samými a rovněž interakce agentů s prostředím. Představíme-li si například pod *Agentem001* zástupce třídy hmyzu a pod *Agentem002* zdroj záření, máme jednoduchý základ pro simulaci a zkoumání vlivu elektromagnetického pole na pohyb hmyzu. Ve výše zmíněné simulaci bylo možno pozorovat pohyb hmyzu v jeho prostředí, pohyb připomínal zástupce blanokřídlého hmyzu. Simulaci lze přizpůsobovat jak nastavováním základních parametrů, tak odlišnou implementací jednotlivých agentů a životního prostředí.

3 Závěr

Tento příspěvek představuje krátký úvod do problematiky umělého života a jeho simulace. Záběr disciplíny umělého života se nedotýká jen oborů jako informatika a biologie, ale také například ekologie, ekonomie, sociálních věd, matematiky, chemie, ale třeba i filozofie a dalších. Díky této disciplíně můžeme studovat život na všech úrovních abstrakce, molekulární, buněčné i na úrovni jedinců nebo celých populací. Nestudujeme pouze život takový, jaký známe, ale také jaký by mohl být v celé své komplexnosti. Představili jsme zde také několik simulátorů umělého života. Většina z nich se soustředí

na simulování základních jednotek umělého života na zvolené úrovni abstrakce. Také zde byly představeny simulátory vývoje počítačových programů, strategií pozemního souboje atd. Jedním se zajímavých efektů je sledování emergentního chování systému, kdy ze zdánlivě chaotického chování jeho základních životních forem, může vzniknout komplexní chování celé populace (např. chování mravenců, let hejna ptáků apod.).

V závěru článku jsme si představili základní koncept simulátoru, tak jak jej vytvořil autor tohoto článku, a demonstrovali, že i s jednoduchou základní kostrou můžeme zkoumat emergentní chování celé populace zkoumaného subjektu.

Literatura

[1] Janošek, Michal, Simulace umělého života. Diplomová práce. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2007.

[2] Kubík, Aleš, Inteligentní agenty. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2004. 280 s. ISBN 80-251-0323-4

[3] MAŘÍK, Vladimír. Umělá inteligence (3). 1 vyd. Praha: Academia, 2001. 328 s. ISBN 80-200-0472-6

[4] Witzany, Günther, The Logos of the Bios 2. 1. vyd. Helsinki: Umweb, 2007. 231 s. ISBN 952-5576-04-3

[5] Synthetic Biology Project [online]. What is Synthetic Biology?, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.synbioproject.org/topics/synbio101/definition/>

[6] ProtoCELL [online]. ProtoCELL, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.protocell.org/>

[7] IMM [online]. Institute for Molecular Manufacturing, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.imm.org/>

[8] Tierra [online]. Tierra home page, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://life.ou.edu/tierra/>

[9] Ray, T.S. and Chenmei Xu, Measures of evolvability in Tierra, Artificial Life and Robotics. 2001, vol. 5, no. 4, s. 211-214. ISSN 1433-5298

[10] Framsticks [online]. 3D Simulation and Evolution | Framsticks, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.framsticks.com/>

[11] Komosinski, Maciej and Adamatzky Andrew, Artificial Life Models in Software. 2. vyd. London: Springer, 2009. 442 s. ISBN 978-1-84882-284-9

[12] EINSTein [online]. ISAAC/EINSTein: An Artificial-Life Approach to Land Combat, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.cna.org/isaac/>

[13] Nerve Garden [online]. Nerve Garden Homepage, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.biota.org/nervegarden/>

[14] Polyworld [online]. Polyworld, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.beanblossom.in.us/larryy/PolyWorld.html>

[15] Swarm [online]. Main Page - SwarmWiki, [cit. 2010-01-30]. Dostupný z WWW: <http://www.swarm.org/>

[16] Swarmfest [online]. Swarm: SwarmFest - SwarmWiki, [cit. 2010-02-11]. Dostupný z WWW: <http://www.swarm.org/index.php/Swarm:_SwarmFest>

[17] Primordial Life [online]. Primordial Life, [cit. 2010-02-11]. Dostupný z WWW: <http://www.io.com/~spofford/>