

Koncepční pojetí umělého života jakožto univerzálního celulárního automatu

Ing. Jan Koubek

Vysoká škola ekonomická v Praze

Fakulta informatiky a statistiky

Email: koubekj4@gmail.com

Abstrakt

V článku pojednáváme o umělém životě a problematice jeho uchopení napříč vědními obory. Navrhujeme revidovanou definici umělého života a jako východisko budoucího bádání představen konceptní návrh univerzálního celulárního automatu (UCA). UCA je rozšířením dosavadního chápání celulárních automatů (CA), a to skrze proměnlivou velikost uvažovaného okolí buňky, širší škálu možných stavů, vyšší stupeň volnosti pravidel a především zavedení prvku náhody. Tyto úpravy jinak deterministického systému CA umožní ve svých důsledcích realizaci nebiologického umělého života jakožto sebezachovávajících, sebe reprodukujících a sebevyvíjejících se (tj. i mutujících) entit, a to formou buněk v rámci UCA (a tedy simulace in silico). Jde pouze o dosud nerealizovaný teoretický návrh vhodný pro další rozšíření. Text článku vychází z autorovy diplomové práce (Koubek, 2024).

1 Problematika umělého života a jeho definování

Každý vědní obor definuje život jiným způsobem, a to i v případě, že jde (pouze) o život přirozený, tedy nám známý. Problematika definice umělého života je závažnější, protože vědecky není tak dobře zpracována. Najdou se však i definice života, které lze pro jejich obecnost vztáhnout i na život umělý. Alexandr Michailovič Ljapunov například definuje život jako „vysoce stabilní stav hmoty, při němž se k vypracování záchovných reakcí využívá informace, jejímž kódem jsou stavy molekul“ (Souček, 1979). Tato definice poukazuje na vnitřní informační provázanost živých organismů.

Umělecky je umělý život zpracován hned několika autory, mezi nimiž můžeme zmínit postavu *Homunkula* z Goethova *Fausta* (Goethe, 2011), který je přímým odkazem na alchymistické snahy, které nebyly omezeny jen na transmutace kovů. Karel Čapek se umělému životu věnoval například v divadelních hrách *Adam Stvořitel* (Čapek, 1982) nebo *RUR*. Největší pozornost však umělému životu zřejmě věnoval futurolog Stanisław Lem. Ten ve svém díle *Summa technologie* (Lem, 1995) mj. nastiňuje možný budoucí vývoj, jakým mohou lidé přetvářet své vlastní životy a svá

vlastní těla. Sbírka fiktivních rozhovorů *Golem XIV* (Lem, 1983b) naopak popisuje svět z perspektivy stroje, přičemž stanovuje „úroveň rozumu“, mezi kterými je možnost přecházet, spíše se však celý koncept týká více umělého života než umělé inteligence jako takové. Nejzajímavějším dílem je recenze fiktivní knihy *Non serviam* (Lem, 1983a), týkající se vytváření *personoidů* skrze předpřipravený inicializační program. Celý virtuální svět je tak pouhou počítačovou simulací, kterou je možno pozastavit. Lem zároveň rozebírá vývoj života uvnitř této simulace, který sám, ač nemá hmotné tělo, sám sebe rozvíjí a svojí inteligencí se postupně dostává na hranice jemu poznatelného a sám se rozhodne vzbouřit proti svému tvůrci tím, že zpochybní jeho existenci.

Christopher Langton, významný teoretik umělého života, podává definici života, která je ještě přesnější: „Proces, který nazýváme »život«, je v podstatě nelineární a vzniká z interakcí mezi neživými částmi. Život je vlastností formy, nikoli hmoty, je spíše výsledkem organizace hmoty než něčím, co by bylo vlastní hmotě samotné“ (Langton, 2019). Dle jiných „neexistuje ostrý přechod mezi neživým a živým; spíše dochází k postupnému nárůstu množství informací produkovaných organismem v porovnání s množstvím informací produkovaných jeho okolím“ (Gershenson, 2023). Někteří autoři kladou na život kromě nároků na autonomii a reprodukci i požadavek na vývoj v souladu s darwinistickou evolucí (Wiedermann, 2007), která není předmětem tohoto článku.

Umělý život zároveň nemusí být nutně realizován pouze jako člověkem naplánovaná, vědomá a záměrná kopie života přirozeného, tak jak je nám znám ve své biologické podobě. Naopak, vynucovat podobnost se životem biologickým může být spíše ke škodě, protože omezovat takto složité téma na jediný obor může znamenat, že dojde k bytí neúmyslnému, přesto však zásadnímu opomenutí některých důležitých skutečností. V každém případě se bude jednat o přínos k již existujícímu poznání.

V tomto článku si klademe za cíl představit koncept, jakým může být umělý život jednou realizován, bez ohledu na biologickou předlohu, a to skrze *univerzální celulární automat*.

2 Krátké představení celulárních automatů

„Celulární automat je systém buněk synchronně měnící svůj stav v diskrétním čase na základě aktuálního stavu každé buňky a aktuálního stavu buněk v jejím okolní podle přechodové funkce“ (Luža, 2014, s. 6). Kromě jednorozměrné varianty se nejčastěji používá varianta dvojrozměrná, kde jsou jednotlivé buňky seřazeny do pravidelné mřížky. Teoreticky však nejsou dimenze nijak omezeny.

Každá buňka (nejmenší rozlišitelná jednotka daného prostoru) se může nacházet v jednom z přesně předem definovaných stavů. Čas je přitom čistě externí faktor a jako takový nemá na objekty v tomto prostoru přímý vliv. Vliv času je spjat pouze s přechodovou funkcí, často označovanou řeckými písmeny Φ nebo Θ . Ta určuje, jak se během jednoho kroku času změní stav buňky na základě stavů okolních buněk. Přechodovou funkci si lze představit jako soubor pravidel a podmínek, za kterých dojde dané pravidlo realizace.

Klasické pojetí CA je deterministické, tedy na základě znalosti jednoho stavu lze dopočítat libovolný stav následující. Existují však i *stochastické CA*, které zjednodušeně řečeno používají takovou přechodovou funkci, jejíž výsledek bývá (alespoň do určité míry) určen za pomoci náhody (Arrighi a spol., 2013; Agapie a spol., 2014). Možné využití zahrnuje tržní analýzu nového produktu (Goldenberg a spol., 2001), modelování šíření nakažlivých chorob (Mikler a spol., 2005) nebo modelování vývoje deštných pralesů (Alonso a Sole, 2000).

3 Navrhovaná východiska budoucího rozvoje

Oblast umělého života (AL) je sice v současnosti upozaděna umělou inteligencí (AI) (obzvláště populární jsou velké jazykové modely) a její integraci do stávajících systémů. Zkoumání umělého života má však své počátky ve stejné době jako AI, proto je nasnadě očekávat do budoucna podobný zájem i u umělého života. Ať už bude jeho vývoj poháněn akademickým zájmem či snahou o vyřešení některých problémů, jakým lidstvo bude čelit, půjde o mnohem náročnější úkol (v porovnání s AI). U AI je zkoumáno, jaké chování příslušné „černé skříňky“ se jeví jako inteligentní, ale v případě AL nebude stačit úsudek, zda se daná „černá skříňka“ chová „jako živá“ (alespoň v dané oblasti či způsobu realizace), bude třeba vlastnost života přiřknout zcela jednoznačně.

V současné době považujeme za nejvhodnější způsob reprezentace umělého života pomocí *celulárních automatů* (CA). CA mají přitom několik neopomenutelných výhod:

1. vizuální realizace přitažlivá pro odborníky i laiky, díky čemuž existuje řada existujících rozšíření již používaných CA
2. dobrá zpracovanost díky dekadám vývoje příslušných algoritmů
3. aktuálnost, například projekt Lenia (Chan, 2019, 2020)
4. realizace vyžadující pouze výkon, který se stává stále dostupnějším

Není ovšem vyloučeno, že AL bude realizován jiným způsobem. Nemusí jít totiž o vytvoření *in silico*. Možnost *in vitro* může představovat využití křemíku jako základního kamene místo uhlíku (Petkowski a spol., 2020) a teoreticky vyloučena není ani realizace *in vivo* (tedy v rámci již jiného žijícího organismu). Postup *in silico* se však jeví jako nejvíce bezpečný, protože jeho podstatou je pouhá simulace a ne přímé vytváření objektů našeho fyzického světa.

U „živých věcí“ existuje i hledisko etické, které s novými formami života přinese i nový způsob jejich nazírání. Etický aspekt byl často narušován a překrucován, i když šlo o člověka samotného. A protože etika klasicky nepatří u odborníků mezi jejich zájmy, které se často omezují na dovednosti ve vlastním oboru, je nutno očekávat pokusy o opomíjení etiky či její zaostávání za nejnovějším vývojem.

4 Revidovaná definice umělého života

Přesněji vymezená definice umělého života bude hrát klíčovou roli pro jeho správné chápání: *Zkoumaný fenomén bude umělým životem tehdy, když bude umělým a zároveň životem.*

Umělým nechť je v kontextu umělého života vše, co je současně:

1. produktem lidského jednání a
2. výsledkem lidského záměru.¹

Životem nechť je v kontextu umělého života vše, co současně:

1. má vlastní schopnost reprodukce (tedy i schopnost předávání informace mezi jedinci),
2. má silnou vnitřní (alespoň informační) provázanost (alespoň natolik, že bude platit Hegelův *kruhový, případně spirální sebevztah*, Kantovými slovy „celek je účelem částí a části jsou účely celku“), tedy že informační tok mezi

¹ Jedná se tak o spojení dvou klasických definic „umělého“ (Hayek, 1994). Zda bude umělý život sám sebe chápat jako záměrný či vytvořený není pro tuto definici podstatné (protože na umělý život nahlížíme zvnějšku, přestože on sám sebe může vnímat jako život přirozený).

jednotlivými částmi („uvnitř“) je řádově větší než mezi celým „organismem“ a jeho okolím,

3. má dostatečnou volnost pro své jednání (přičemž je natolik autonomní a nedeterministické, že má implicitně dostupnou možnost vzbouřit se)² a
4. prochází svojí vlastní *ontogenezí*, tedy sleduje svůj vlastní vývoj, který může být jednak cílesměrný či alespoň cílený (bez ohledu na darwinistický základ interpretace tohoto vývoje).³

Z vyjmenovaných vlastností lze například odvodit, že umělý život bude

- těžko podmanitelný (protože bude autonomní a bude se moci vzbouřit),
- bude čelit svým vlastním limitům (například mezím poznání),
- sám sebe bude rozvíjet a přetvářet,
- bude svým vlastním účelem, přestože bude
- klást cíle svého jednání mimo sebe (bude tak orientován na práci se svým vlastním „životním prostředím“).

„Typicky lidské“ vlastnosti, tedy například uvědomování si sebe sama či víra v nadpřirozeno, mezi tyto dodatečné vlastnosti zařadit nelze, protože pro ně v rámci obecného chápání života není dostatečně spolehlivý základ.

5 Univerzální celulární automat

Univerzální celulární automat (UCA) je hypotetický CA zobecňující veškerý dosavadní pokrok v této oblasti výpočetních simulací. Účelem jeho definice není vytvoření nějakého konkrétního CA, který by měl mít potenciál nahradit všechny dosavadní CA, ani nemá primárně sloužit jako šablona pro vytváření dalších CA. Jeho hlavní přínos vidím v možnosti zkoumat CA jako takové, nikoliv jen konkrétní a vizuálně přitažlivé modely, kterými je například *Langtonův mravenec* (Moreira a spol., 2001) nebo *Hra života* (Evans, 2010).

² Důležitým důsledkem této „svobody“ bude zvyšování complexity systémů, ve kterých bude umělý život působit, a to v souladu s teorií spontánního řádu (Pavlik, 2004; Hayek, 1995), zvláště pak s mezemi poznání, kvůli kterým nelze předjímat veškeré důsledky jednání, protože u komplexních systémů lze poznat pouze princip jejich fungování (Hayek, 1994; Pavlik, 2004; McQuade, 2010; Hayek, 2012).

³ Tento vývoj nemusí být nutně chápán *teleologicky*, tedy jako naplňování nějakého účelu, protože stabilita života není dána skrze cíl, který je vnějšmu životu dán, ale v jeho schopnostech se neustále měnit a přetvářet.

5.1 Motivace k vytváření (dalšího) celulárního automatu

Hlavní motivací o definici UCA je snaha o eliminaci nedostatků, které jsou s CA běžně spojeny. Nedostatků, které jsou s daným CA spjaty již od návrhu, čímž představují jistou limitaci jeho možností, protože jakmile je nějaký CA zaveden a pojmenován, jedná se i přes případnou slabou emergenci dodatečných vlastností o hotovou věc ve svém vlastním finálním provedení. Při pokusu odstranit tyto návrhové nedokonalosti je typicky přistupováno k jednorázové úpravě některých parametrů či jejich částečné rozostřenosti. Mezi tato řešení patří všechny nadstavby *Hry života*, například *SmoothLife* (Rafler, 2011; Tringham, 2014). Všechny tyto úpravy ale sledují nějaký praktický cíl, například klasifikaci obrázků (Sandler a spol., 2020), přestože některé CA bývají za plně zobecněné koncepty nesprávně předkládány (Dogaru a Chua, 2000). Zkoumat s jejich pomocí umělý život (či jeho jednotlivé aspekty) je však v současnosti jednak mimo zájem příslušných tvůrců, zároveň jde o natolik deterministické modely, že se fakticky jedná o pouhé stroje.

Přidanou hodnotou UCA je možnost generovat různé CA, čímž se z UCA stane jakýsi podklad pro jejich vytváření. Hlavním přínosem ale zůstane natolik obecný CA, který nebude zatížen žádným konkrétním návrhem, který by jeho možnosti mohl omezovat. Nesplní-li UCA tato očekávání, přínosem budiž přesnější stanovení definic, které se umělého života týkají.

5.2 Vlastnosti univerzálního celulárního automatu

Protože není cílem se příliš odchylovat od zavedených zvyklostí, UCA je možné definovat za použití libovolného počtu rozměrů, přičemž dosavadní praxí je dvojrozměrná čtvercová síť buněk. Tato síť slouží jako prostředí, které zprostředkovává vliv okolí a příležitost kontaktu uvnitř tohoto prostoru či „světa“.

Samotné vlastnosti UCA nejsou přímo parametry, ale spíše *metaparametry*, tedy „parametry parametrů“. Tímto na první pohled nevýznamným rozdílem se UCA odlišuje od všech dosavadních CA. Vztažením na konkrétní aspekty dostáváme podrobnější seznam odlišností, kterými jsou:

1. širší škála stavů buněk
2. proměnlivá velikost okolí
3. zavedení náhody
4. vyšší stupeň volnosti pravidel

U každého metaparametru uvádím v příslušné podsektce jednak motivaci, která je za specifikací tohoto metaparametru skryta, dále pak možné způsoby jeho realizace a jaké budou očekávané následky zavedení tohoto metaparametru. Poslední podsektce je věnována

pojetí času v CA, který je u UCA jako jediný metaparametr pojat stejně (tedy v podobě oddělených časových kroků).

5.2.1 Širší škála stavů buněk

Konečný a velmi nízký počet možných stavů je jedním z nejvýrazněji omezujících faktorů CA, logickým řešením se tak jeví rozšíření škály možných stavů.

Toto rozšíření ale nemá být přímo realizováno spojitě, jak tvrdí někteří autoři (Tringham, 2014). Spojitost je komplikací, která zbytečně vede k infinitezimálnímu počtu, tedy faktickému zavedení derivací a integrálů i do elementárních výpočtů, na kterých je koncept CA vybudován. Lepším řešením je přístup známý z fyziky, stojící na předpokladu, že přestože skutečná realita má sama o sobě nekonečnou přesnost, pro naše potřeby stačí přesnost konečná. Budeme-li stavy buněk reprezentovat desetinným číslem od 0 do 1, stačí nám přesnost například na tisíce, tedy čísla od 0,000 do 1,000,⁴ přičemž při ukládání příslušného stavu bude běžně docházet ke zneprášení v podobě zaokrouhlení. Bude-li v budoucnu potřeba zvýšit přesnost, postačí místo 3 desetinných cifer ukládat 4 a případně jednorázově přeškálovat všechny stavy, aby tuto změnu reflektovaly.⁵

Tato úprava se musí projevit i ve formulaci pravidel. V typických CA jsou totiž pravidla formulována jako porovnávání shody mezi stavem skutečným a referenčním, kdežto v případě UCA se nabízí porovnávání hodnot na základě intervalu. Není tak třeba porovnávat, zda je daný stav buňky „černý“, ale například zda je „větší než 0,690“ nebo „mezi 0,200 a 0,350“. Místo složitých tabulek pravidel tak stačí nadefinovat tyto intervaly, které budou pokryty jednotlivými pravidly.

Stav nějaké buňky se dá zároveň chápat i jako její „hodnota“, případně *fitness* (tedy biologická zdatnost). Toto využití však bude záviset na konkrétní interpretaci.

5.2.2 Proměnlivá velikost okolí

U klasických CA je jako okolí bráno nejčastěji *Moorovo okolí* (tedy 8 sousedních buněk), zbytek je považován za irelevantní. Pokud je tedy velikost okolí rovněž metaparametrem, lze jako okolí brát zřejmě větší počet buněk, které jsou do určité vzdálenosti od námi zkoumané buňky. Nadto lze buňkám, které jsou blíže, přiřadit větší váhu (tedy jakýsi „vliv“ na námi zkoumanou buňku) než těm, které jsou dále. Například buňkám, které jsou v *Moorově okolí*, lze přiřadit váhu 2, zatímco buňkám, které jsou „za nimi ve druhé řadě“, přiřadit váhu 1. Tento nápad je rozvinut v algoritmu *Larger-*

than-life (Evans, 2010), který je rozšířením *Hry života*.

Velikost takto uvažovaného okolí by se zároveň mohla měnit v závislosti na hodnotě zkoumané buňky. Nabízí se tak zde analogie s gravitací (jednoduše „čím více hmoty, tím větší dosah“), ale této analogii je dobré se vyhnout, protože tím narážíme na *problém tří těles*.⁶

Praktickým důsledkem může být nevyrovnaný vztah mezi dvěma entitami, z nichž jedna se nachází v uvažovaném okolí té druhé (která pracuje se širším okolím), zatímco ta první o té druhé „neví“ (protože tato druhá se nenachází ve zkoumaném okolí té první). Otevírá se tak možnost simulace nerovnocenných vztahů, které jsou v přírodě běžně přítomné, zatímco CA nic takového nemají.

5.2.3 Zavedení náhody

Širší škála stavů buněk i proměnlivá velikost okolí sice připomínají *SmoothLife* (Rafler, 2011; Tringham, 2014), tento CA však nemá implementovanou náhodu, která je snad největším kvalitativním rozdílem mezi UCA a ostatními CA. Zavedením náhody do konceptu CA totiž získáme nejistotu z ní pramenící, čímž skutečně otevíráme možnost všemu, co nějakým způsobem „provádí rozhodnutí“. Z přísně deterministického pojetí se tak dostáváme do situace, kde přesná znalost pravidel a počátečního stavu automaticky neznamená schopnost výpočtem určit libovolný budoucí stav.

Přítomnost náhody již v samotném návrhu umožňuje mutace, které by se daly chápat jako náhodné změny hodnot buněk, jako výměna pozic dvou různých buněk či přesunutí náhodné řady buněk o náhodný počet pozic náhodným směrem.

Tyto mutace lze aplikovat na všechny buňky, nebo jen na ty, které již samy mají nějakou nenulovou hodnotu. Pravděpodobnost mutace zároveň nemusí být v celém prostoru homogenní, může vzrůstat se vzdáleností od pomyslného středu prostoru, což může vést k efektivnímu lokálnímu ohraničení tak, jako jsou populace živočichů geograficky odděleny.⁸ Přínosným prvkem tohoto bodu je fakt, že není třeba implementovat prostor buněk jako „nekonečný“ (implementačně spíše jako velmi veliký), ale postačí konečné rozměry, což povede k nižším výpočetním nárokům. Okrajovým jevem mohou být „černé díry“ (nebo též „mazací gumy“), tedy buňky, jejichž hodnota bude vždy pevně nastavena na minimální možnou hodnotu buňky.⁹

⁶ Více viz Reichl a Všeticka (2024).

⁷ Toto rozhodnutí nemusí být vědomé a záměrné, může jít o mnohem přízemnější oscilace nějaké provázané fyzikální veličiny.

⁸ Budou-li takto dvě „populace“ odděleny například pásem, kde bude pravděpodobnost mutace (náhodné změny hodnot buněk) vysoká, nelze sice vyloučit, že nějaký jedinec „nezabloudí na druhou stranu“, ale pravděpodobnost takové události lze zřejmě snížit.

⁹ Tedy jako by po každém časovém kroku došlo k nastavení hodnoty této buňky na 0, čímž bude tato „černá díra“ sloužit jako jakýsi nástroj pro „gumování“, vymazávání buněk. Pomiňme při tomto pojmenování vztah ke gravitaci a *horizontu událostí* (jde o pomyslnou hranici, za kterou již není návratu, protože vše, co tuto hranici

⁴ Pro účely počítačového zpracování bude možná vhodnější reprezentací zápis celými čísly, tedy od 0 do 1 000, tento implementační detail však ponechávám stranou.

⁵ Toto platí v případě, že stavy budou uloženy jako celé číslo a ne jako desetinné, viz předchozí poznámka.

Pravděpodobnost mutace je však třeba udržovat rozumně nízkou. Nejen že při překročení hranice 50% se jedná fakticky o hod mincí (čímž vztah *příčina – následek* efektivně zaniká), ale jak již bylo objeveno (Pospíchal a Kvasnička, 2007), při zvětšení pravděpodobnosti nad 1% dochází k natolik velké „přenosové chybě“, že přenos informací v takovém prostoru již přestává být efektivní.¹⁰ Tato hodnota však může více záviset na detailech provedení experimentu a nemusí tak být obecně platná.

Celý přínos zavedení náhody do systému CA tedy spočívá v simulaci „pasivního“ vlivu okolí (tak jako jím je například eroze¹¹), případně je zde možnost simulovat geografickou izolovanost nějakého druhu.¹²

Při implementaci náhody však musíme čelit jistým problémům. Obvykle platí, že běžně dostupné generátory náhodných čísel jsou přesněji generátory pseudo-náhodných čísel, protože vytváření skutečně náhodných čísel je doménou spíše jaderné fyziky a postupů zakládajících se na rozpadu částic (Hull a Dobell, 1962; Park a spol., 2020), případně jiných fyzikálních postupů (Herrero-Collantes a Garcia-Escartin, 2017). Nedávno publikovaný článek sice ukazuje, že generátor pseudonáhodných čísel dostupný v Linuxovém jádře sice dává modelově dostatečně kvalitní (tedy náhodný, nedeterministický) výstup (Chung a spol., 2024), nicméně jak autoři sami uvádějí, od jistého objemu výstupních dat přestává být náhodnost těchto dat zaručena.

5.2.4 Vyšší stupeň volnosti pravidel

Poslední změna se týká pravidel, tedy předpisů, které určují, jak se má změnit hodnota nějaké buňky (typicky v závislosti na buňkách v jejím okolí). Tato pravidla bývají nejen pevně dána a nelze je měnit uprostřed simulace (což příliš nevádí, lépe to odpovídá stále stejným přírodním zákonům). Mnohem závažnějším nedostatkem klasických CA je fakt, že jedna situace

překročí, bude pohlceno černou dírou, a to včetně světla). Tyto „černé díry“ by tak mohly sloužit jako „hrana konce světa“, na kterou cokoliv vstoupí, je automaticky ztraceno (a umírá). Další interpretací může být „řeka“, tedy několik těchto buněk, ve kterých se vše, co do nich vkročí, bude nenávratně odneseno (a rovněž přestává existovat). Praktické využití by mohlo spočívat v ohraničení dostupné plochy světa, což sníží výpočetní náročnost v jinak teoreticky nekonečném modelu. Alternativně se může v případě „řeky“ jednat o umělý nástroj pro rozdělení populace na dvě dceřinné, což by mohlo sloužit pro simulace geografické oddělenosti a možná tak uspravit vznik nových druhů a specií již existujících.

¹⁰ Nakolik může být tato mutace „pozitivní“ či „negativní“, ponechme stranou. Tato druhotná vlastnost totiž nemusí hrát roli bezprostředně, ale až s odstupem času. Tehdy se například může ukázat, že zkrátit ocas nemusí mít negativní dopad na rychlost pohybu a naopak může znamenat menší šance pro predátora.

¹¹ Erozi se myslí postupná degradace, která nemusí postihovat všechny přítomné prvky stejně. V případě rovnoměrně účinné degradace působící na všechny prvky by se spíše jednalo o „stárnutí“.

¹² Tato izolovanost podle darwinistického pojetí evoluce může vyvolávat speciace druhů, tedy vývoj nového druhu z druhu již existujícího.

(například když jsou v okolí přítomny 3 černé buňky) je pokryta pouze jedním stavem. UCA namísto toho zavádí mít možnost více pravidel, které pokrývají stejnou zkoumanou situaci. Tedy že z jednoho (celkového) stavu mohou vzniknout dva následnické. Závisí přitom na daném systému pravidel, jaké z těchto pravidel bude pro vytvoření následnického stavu použito a jaké ne. Může jít o upřednostnění toho celkového stavu, který se bude například snažit minimalizovat celkovou hodnotu všech buněk, nebo na základě pravděpodobnosti, která by v případě výběru ze 2 pravidel znamenala „hod mincí“. Jiným řešením může být současná aplikace obou pravidel buď v předepsaném nebo náhodném pořadí, případně aplikace obou pravidel na dvě různé kopie celého prostoru, které svým zprůměrováním utvoří stav následující. Dobrým řešením může být navázání rozhodnutí, které pravidlo bude vybráno, na nějaký externí stav, který by se týkal celého prostředí globálně (například proměnná určující, zda je v celém prostoru den nebo noc). Nejextrémnějším řešením je z této jedné simulace vytvořit dvě dceřinné a s těmi zacházet jako s oddělenými světy a rozhodnutí, ve které dále pokračovat, tak odložit na později.

Touto proměnlivostí pravidel se dá dosáhnout jakéhosi proměnného selekčního tlaku prostředí, které tak může v jiném okamžiku klást jiné nároky na entity, které jsou v daném světě přítomny.

5.2.5 Čas a jeho ne/spojitost

Posledním metaparametrem je pojetí času. Ten je v CA tradičně chápán jako diskretní a má podobu konstantních a oddělených časových kroků, ve kterých jsou prováděny příslušné operace spočívající v aplikaci pravidel nad celým uvažovaným prostorem. V UCA tomu není jinak. Zavádět čas jako spojitou veličinu by do celého konceptu vneslo závažné problémy spojené s infinitezimálním počtem. Zároveň by s proměnlivou velikostí časových kroků musela nastat i úprava pravidel, aby s tímto proměnlivým časem bylo možno pracovat. Domnívám se, že tento nárůst složitosti by nebyl natolik přínosnou změnou, tedy, že bude lepší ponechat čas jako staticky vyhodnocovaný a plně v režii simulujícího programu, tedy nezávisle na pravidlech a buňkách, na které se daná pravidla vztahují.¹³

Případnou reinterpretaci konceptu času v UCA tak ponechávám na dalších, kteří svým vzděláním v této oblasti přispějí a posunou koncept UCA na vyšší úroveň.

5.3 Vztah ke klasickým CA

Jak je patrné z výše zmíněných bodů, „klasické“ CA budou pouze okrajovým případem tohoto UCA. Jako příklad může posloužit *Hra života* (Evans, 2010; Lensmire, 2020), která má deterministická pravidla (jedna

¹³ Problémem zůstane *prostorčas*, tedy provázanost času a prostoru, která je známa z teorie relativity.

situace je pokryta jediným pravidlem), má pouze dvě možné hodnoty/stavy buněk, uvažované okolí buněk je homogenní (a zároveň *Moorovo*, tedy relativně malé) a pravděpodobnost mutace je přesně rovna nule.

5.4 Realizace UCA

Detailnější návrh a konstrukci UCA *in silico* není předmětem ani cílem této práce, jedná se ale o příležitost pro další odborníky, kteří by se v této oblasti rádi uplatnili. Realizaci předpokládám v klasickém počítači (*in silico*), který není schopen pracovat s nespojitostí přímo (a vyžaduje numerická řešení).¹⁴ Nakolik by byla realizace v kvantových počítačích proveditelná, nejsem schopen posoudit.¹⁵

Poděkování

Mé poděkování si zaslouží především moje rodina a mí blízcí, kteří mi byli trpělivou oporou. Veliké poděkování si dále právem zaslouží doc. J. Pavlík, který mi byl skvělým vedoucím diplomové práce, a prof. V. Řepa, garant multidisciplinárního oboru Kognitivní informatika, jež jsem na VŠE v Praze mohl úspěšně vystudovat.

Reference

- Agapie, A., Andreica, A. a Giuclea, M. (2014). Probabilistic cellular automata. *Journal of Computational Biology*, 21(9):699–708.
- Alonso, D. a Sole, R. V. (2000). The divgame simulator: a stochastic cellular automata model of rainforest dynamics. *Ecological Modelling*, 133(1-2):131–141.
- Arrighi, P., Schabanel, N. a Theyssier, G. (2013). Stochastic cellular automata: Correlations, decidability and simulations. *Fundamenta Informaticae*, 126(2-3):121–156.
- Chan, B. W.-C. (2019). Lenia: Biology of artificial life. *Complex Systems*, 28(3):251–286.
- Chan, B. W.-C. (2020). Lenia and expanded universe. V *Artificial Life Conference Proceedings 32*, str. 221–229. MIT Press One Rogers Street, Cambridge, MA 02142-1209, USA journals-info . . .
- Chung, W., Kim, H., Lee, J. a Lee, Y. (2024). Provable security of linux-drbg in the seedless robustness model. *Cryptology ePrint Archive*.
- ¹⁴ Je však možné, že budoucí vývoj na poli informatiky přinese takové počítače, které budou umět se spojitostí pracovat přímo. V současné době se však jedná o hudbu budoucnosti.
- ¹⁵ Z tohoto důvodu případný návrh algoritmů, které by mohly vytvořit UCA v kvantových počítačích, ponechávám jiným.
- Dogaru, R. a Chua, L. O. (2000). Mutations of the "game of life": A generalized cellular automata perspective of complex adaptive systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 10(08):1821–1866.
- Evans, K. M. (2010). *Larger than Life's Extremes: Rigorous Results for Simplified Rules and Speculation on the Phase Boundaries*, str. 179–221. Springer London, London.
- Gershenson, C. (2023). Emergence in artificial life. *Artificial Life*, 29(2):153–167.
- Goethe, J. W. v. (2011). *Faust*. Městská knihovna v Praze.
- Goldenberg, J., Libai, B. a Muller, E. (2001). Using complex systems analysis to advance marketing theory development: Modeling heterogeneity effects on new product growth through stochastic cellular automata. *Academy of Marketing Science Review*, 9(3):1–18.
- Hayek, F. A. (1994). *Právo, zákonodárství a svoboda*. Academia.
- Hayek, F. A. (1995). *Osudná domýšlivost*. Sociologické nakladatelství.
- Hayek, F. A. (2012). *The sensory order: An inquiry into the foundations of theoretical psychology*. University of Chicago Press.
- Herrero-Collantes, M. a Garcia-Escartin, J. C. (2017). Quantum random number generators. *Reviews of Modern Physics*, 89(1):015004.
- Hull, T. E. a Dobell, A. R. (1962). Random number generators. *SIAM review*, 4(3):230–254.
- Koubek, J. (2024). Cesta k umělému životu. Diplomová práce, Vysoká škola ekonomická v Praze.
- Langton, C. G. (2019). Artificial life. V *Artificial life*, str. 1–47. Routledge.
- Lem, S. (1983a). *Dokonalá prázdnota*. Svoboda.
- Lem, S. (1983b). *Golem XIV*. Nakladatelství Svoboda.
- Lem, S. (1995). *Summa Technologiae*. Magnet-Press.
- Lensmire, J. (2020). John conway's game of life.
- Luža, J. (2014). Návrh výpočetních struktur v celulárních automatech. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně.
- McQuade, T. J. (2010). Science and the sensory order. V *The Social Science of Hayek's 'The Sensory Order'*, str. 23–56. Emerald Group Publishing Limited.

- Mikler, A. R., Venkatachalam, S. a Abbas, K. (2005). Modeling infectious diseases using global stochastic cellular automata. *Journal of Biological Systems*, 13(04):421–439.
- Moreira, A., Gajardo, A. a Goles, E. (2001). Dynamical behavior and complexity of langton's ant. *Complexity*, 6(4):46–52.
- Park, K. H., Park, S. M., Choi, B. G., Kim, J. B. a Son, K. J. (2020). High rate true random number generator using beta radiation. *AIP Conference Proceedings*, 2295(1):020020.
- Pavlík, J. (2004). *FA Hayek a teorie spontánního řádu*. Professional Publishing.
- Petkowski, J. J., Bains, W. a Seager, S. (2020). On the potential of silicon as a building block for life. *Life*, 10(6).
- Pospíchal, J. a Kvasnička, V. (2007). Evolúcia jazyka a univerzálny darwinizmus. *Mysel', inteligencia a život*, str. 475–496.
- Rafler, S. (2011). Generalization of conway's game of life to a continuous domain-smoothlife. *arXiv preprint arXiv:1111.1567*.
- Reichl, J. a Všetická, M. (2024). Problém tří těles.
- Sandler, M., Zhmoginov, A., Luo, L., Mordvintsev, A., Randazzo, E. a spol. (2020). Image segmentation via cellular automata. *arXiv preprint arXiv:2008.04965*.
- Souček, L. (1979). *Tušení stínu*. Československý spisovatel.
- Tringham, J. (2014). Properties of cellular automata.
- Von Neumann, J., Burks, A. W. a spol. (1966). Theory of self-reproducing automata.
- Wiedermann, J. (2007). Spojení samoorganizace s výpočty: minimální život v moři umělých molekul. *Mysel', inteligencia a život*, str. 497–512.
- Čapek, K. (1982). *Adam stvořitel*. Městská knihovna v Praze.