

Kapitola 4

Celulárne automaty

Modelovanie zložitých fyzikálnych javov pomocou počítačových simulácií sa stalo základným nástrojom pri odkrývaní tajov našej Zeme. V prírode sa stretávame s rôznymi príkladmi správania, ktoré vykazuje emergenciu, teda vznik vlastností systému na globálnej úrovni na základe lokálnych interakcií a bez ich explicitnej definície v rámci jednotlivých elementoch systému alebo ich prepojeniach. Ide napríklad o kolónie hmyzu, sieťnicu alebo imunitný systém [64]. Jedným z cieľov umelej inteligencie je odhaliť princíp emergentného správania ako takého. Medzi základné prístupy blížiacie sa k tomuto cieľu patria agentné systémy, teória chaosu, či teória celulárnych automatov.

Koncept celulárneho automatu (CA) bol vynájdený už mnohokrát pod rôznymi názvami. V matematike ide o oblasť topologickej dynamiky, v elektrotechnike sú to iteračné polia, deti ich môžu poznať ako druh počítačovej hry [65]. Modelovanie pomocou CA je principiálne jednoduché, na základe lokálneho pôsobenia ich elementov je možné vykazovať požadované globálne správanie. V tejto kapitole bude model CA priblížený, načrtnuté historické pozadie jeho výskumu a uvedené krátke pojednanie o jeho aplikáčnych doménach.

4.1 Stručná história výskumu celulárnych automatov

Koncept CA uzrel svetlo sveta v 40-tych rokoch 20. storočia vďaka dvojici amerických imigrantov maďarského, resp. poľského pôvodu – John von Neumannovi a Stanislawovi Ulamovi, ktorí tento koncept používali najmä pre výskum logiky života [50]. Von Neumann sa inšpiroval prácami W. McCullocha a W. Pittsa – otcov neurónových sietí [18]. Používal 2D CA, ktorého bunky sa mohli nachádzať v 1 z 29 stavov, okolie bolo 5-bunkové (neskôr nazývané ako *von Neumannovo*). Tento muž, ktorý pracoval aj na projekte Manhattan¹, dokázal existenciu konfigurácie zloženej z približne 200 000 buniek, ktorá sa dokáže samoreprodukovať. Takýto CA môže simulovať Turingov stroj [26]. Po von Neumannovej smrti (1957) bol jeho dôkaz zjednodušaný.

Edgar F. Codd vytvoril jednoduchší model s 8 stavmi [15], ktorý ale neimplementoval samoreprodukčné správanie. Tri roky po Coddovej práci, Edwin Roger Banks vytvoril elegantný 4-stavový CA v rámci svojej dizertačnej práce [6], ktorý bol schopný univerzálneho výpočtu, no opäť absentovala samoreprodukcia. John Devore vo svojej diplomovej práci významne zredukoval zložitosť Coddovho návrhu, no samoreprodukčný proces si vyžadoval príliš dlhú pásku. Až Christopher Langton upravil Coddov model do podoby schopnej vytvárať tzv. Langtonove slučky reprodukujúce samé seba s minimálnym množstvom pot-

¹ Krycí názov pre utajený americký vývoj atómovej bomby počas 2. svetovej vojny.

rebných buniek, avšak za cenu absencie výpočetnej univerzality [44]. Ďalšími významnými nasledovníkmi von Neumanna v štúdiu celulárnych automatov boli hlavne A. Burks a jeho študent J. Holland, ktorý je však známejší z oblasti evolučných algoritmov.

V 60-tych rokoch 20. storočia, popri dobových, málo výkonných výpočetných zariadeniach, záujem o CA ustal. O značné spopularizovanie CA sa postaral Martin Gardner, keď v roku 1970 v magazíne *Scientific American* venoval svoj stĺpček celulárnemu automatu Johna Hortona Conwaya s názvom „Game of Life“ [25]. Išlo o 2D CA, ktorý je pomocou veľmi jednoduchých pravidiel schopný vykazovať, prenesene povedané, známky života.

Začiatkom 80-tych rokov 20. storočia sa začala skúmať otázka, či sú CA schopné modelovať okrem globálnych aspektov nášho sveta aj zákony fyziky ako také. Priekopníkmi v tomto výskume boli Tomasso Toffoli a Edward Fredkin. Hlavnou tézou ich výskumu bola definícia takých fyzikálnych výpočetných modelov, ktoré obsahujú jednu z najzákladnejších vlastností mikroskopickej fyziky – reverzibilitu. Podarilo sa im vytvoriť modely obyčajných diferenciálnych rovníc, akými sú napríklad rovnice prúdenia tepla, vln, či Navier-Stokesove rovnice prúdenia tekutín [21].

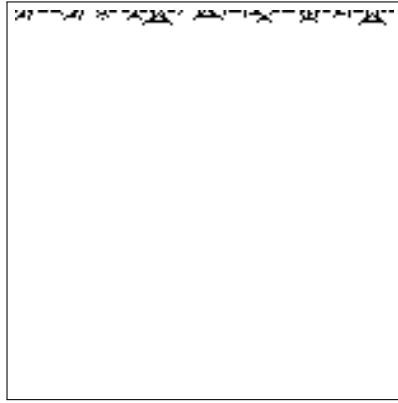
CA je taktiež užitočným modelom pre vetvu teórie dynamických systémov, ktorá sa zaoberá emergenciou takých javov ako je turbulencia, chaos, či fraktálnosť. Stephen Wolfram, o ktorom Terry Sejnowski, odborník na neurónove siete, hovorí ako o jednom z najinteligentnejších vedcov planéty [40], túto oblasť intenzívne a systematicky študoval. Definoval 4 triedy, do ktorých možno rozdeliť celulárne automaty a niektoré ďalšie výpočetné modely [68] (príklady 1D celulárnych automatov vizualizuje obrázok 4.1). Pomocou týchto tried Wolfram popísal vzťah celulárnych automatov k dynamickým systémom (uvedeným v zátvorkách):

- **Trieda I** – počiatočné konfigurácie evolvujú do stabilného, homogénneho stavu. Akákoľvek náhodnosť počiatočnej konfigurácie mizne (limitné body).
- **Trieda II** – počiatočné konfigurácie konvergujú do jednoducho separovateľných periodických štruktúr (limitné cykly).
- **Trieda III** – vykazuje chaotické neperiodické vzory (chaotické správanie podobné podivným atraktorom).
- **Trieda IV** – vykazuje komplexné vzory (veľmi dlhé prechodné úseky, ktoré nemajú jasnú analógiu v spojitých dynamických systémoch).

Pre ďalší výskum CA bola obrovským prínosom Wolframova publikácia z roku 2002 s názvom „New Kind of Science“ [69], ktorá na 1197 stranách vyčerpávajúco analyzuje potenciál celulárnych automatov a ako názov napovedá, hovorí dokonca o novom druhu vedy. Wolframovým záverom je, že súčasná veda by sa na veci mala začať dívať z iného uhla, samozrejme v rámci možností. Všetky zložité systémy, ktoré dokážeme popísať, väčšinou popisujeme tak, že systém rozložíme na najmenšie elementy a skúmaním týchto častíc sa snažíme popísať systém ako celok. Dokážeme popísať správanie častíc, ale nedokážeme popísať, akým spôsobom tieto častice spolupracujú, akým spôsobom dokážu vytvoriť zložitý systém schopný komplexného správania, komplexného z nášho pohľadu.

4.2 Vlastnosti modelu

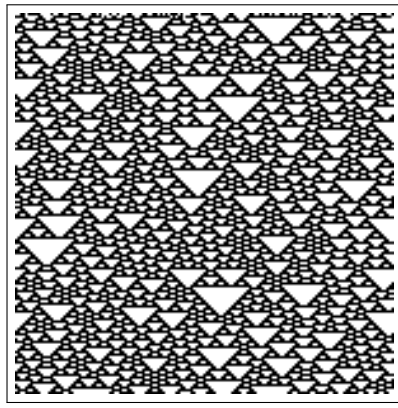
Všetky počítačové programy možno považovať v princípe za celulárne automaty, pretože počítač pracuje s obmedzenou aritmetikou aj pamäťou. Väčšina CA však používa stavový



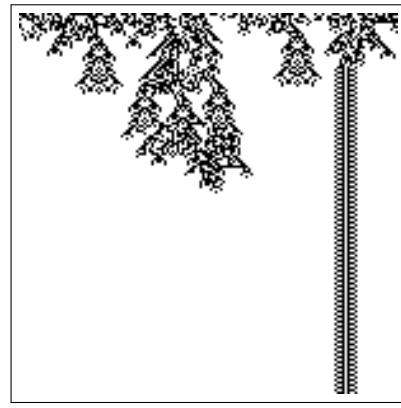
(a) Trieda I



(b) Trieda II



(c) Trieda III



(d) Trieda IV

Obrázek 4.1: Wolframove triedy. Zobrazené sú 1 D celulárne automaty, kde horizontálna os popisuje konfiguráciu modelu v určitom čase t a vertikálna os popisuje postupné časové kroky (vzrastajúce zhora dole). Bunky celulárnych automatov sú binárne, teda môžu nadubúdať 1 z 2 stavov, okolie je 5-bunkové.

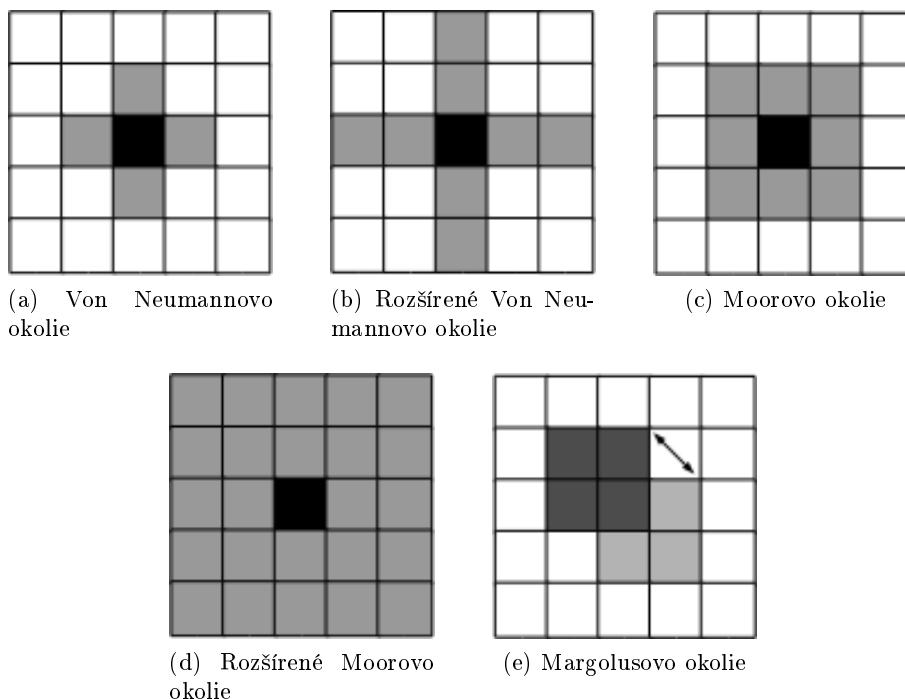
priestor redukovaný na pár stavov (často len 2 stavy – 0/1) [20]. CA je dynamický systém, v ktorom je čas aj priestor diskretný. Skladá sa z mriežky jednoduchých funkčných jednotiek – buniek, ktoré môžu nadobúdať jeden z viacerých, vopred definovaných stavov. Stavby buniek sú synchronne aktualizované v každom kroku výpočtu CA na základe prechodovej funkcie. Formálne [24]:

$$s^{(t+1)} = f(s^{(t)}, s_N^{(t)}), \forall i, j, \quad (4.1)$$

kde $s^{(t+1)}$ reprezentuje stav bunky danej pozíciou i a j v čase $t + 1$, $s^{(t)}$ vyjadruje stav bunky v čase t , f je prechodová funkcia CA a $s_N^{(t)}$ značí stavy okolitých buniek.

Okolie buniek CA môže byť špecifikované rôzne, obrázok 4.2 zobrazuje najčastejšie používané. Všetky vizualizované okolia sú intuitívne jasné, až na Margolusove okolie (4.2e). Tento typ okolia je špecifický tým, že plochu s bunkami je nutné rozdeliť na štvorce o veľkosti 2×2 a stav všetkých buniek v štvorci závisí len na 4 bunkách ohraničených daným štvorcem. Navyše, všetky bunky v jednotlivých štvorcových plochách majú rovnaký stav. Aby sa však nebránilo propagácii stavov buniek, celá sieť 2×2 plôch sa posunie v každom párnom

kroku evolúcie automatu o jednu bunku v ose x aj y a v každom nepárnom kroku zase späť. Popísaný, pomerne zvláštny typ okolia sa úspešne využíva napríklad pri približnom riešení, už skôr spomínaných, Navier–Stokesových rovníc [66].



Obrázek 4.2: Rôzne typy okolia CA

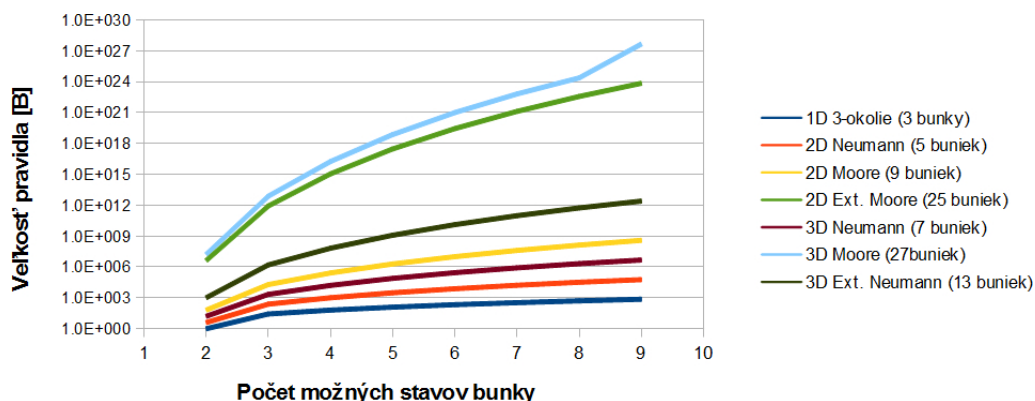
Hlavné rysy CA sú:

- **paralelizácia** – jednotlivé stavy buniek je možné počítat paralelne
- **lokalita** – nový stav bunky závisí na stave aktuálnej a okolitých buniek
- **homogenita** – všetky bunky používajú rovnakú prechodovú funkciu, to však platí len pre klasické celulárne automaty (uniformné)
- **diskrétnosť** – časová aj priestorová

Každá navrhnutá abstrakcia reality – model, má na základe svojej špecifikácie výhody a nevýhody. Medzi svetlé stránky modelu CA patrí najmä:

- **jednoduchosť** – či už ide o jednoduchosť principiálnu alebo implementačnú
- **paralelizmus** – stavy buniek v nasledujúcom časovom úseku je možné počítat paralelne, čo predstavuje obrovskú výhodu a rýchlostný potenciál evolúcie CA
- **vizuálnosť** – výstupy sú väčšinou vizualizovateľné a jednoducho interpretovateľné

Pamäťová náročnosť modelu však stúpa pri nepatrnom zväčšení okolia či zvýšení počtu stavov, ktorých môžu jednotlivé bunky nadobúdať. Porovnanie náročnosti modelu v závislosti na počte stavov a type resp. veľkosti okolia je znázornené na obrázku 4.3. Priestorová a časová diskretnosť sa v niektorých prípadoch nehodí a môže byť kontraproduktívna.



Obrázek 4.3: Pamäťová náročnosť modelu celulárneho automatu v závislosti na počte stavov a type okolia.

Sňád' najpopulárnejším celulárnym automatom je už spomínaný celulárny automat s názvom „Game of Life“. Je uvedený takmer v každej spisbe týkajúcej sa CA, pripomína vývoj spoločenstva živých organizmov. Existuje veľké množstvo implementácií², kde každá bunka sa nachádza v 1 z 2 stavov – mrtvá alebo živá. Okolie je 5-bunkové, von Neumannove. Pravidlá hry resp. prechodová funkcia je veľmi jednoduchá:

- bunky s menej než 2 živými susednými bunkami zomierajú
- živé bunky s 2 alebo 3 živými susednými bunkami prežívajú
- živé bunky s viac než 3 živými susednými bunkami zomierajú
- mrtvé bunky s práve 3 živými susednými bunkami ožívajú

Paralelný výpočet buniek CA dal vznik mnohým hardwarovým riešeniam šitým na mieru špecifickým problémom, príkladom je CAM (Cellular Automata Machines) vyvinutý na MIT (Massachusetts Institute of Technology), za ktorej vývojom stoja Norman H. Margolus a Tommaso Toffoli. V dobe písania tejto práce bola aktuálna verzia CAM-8³

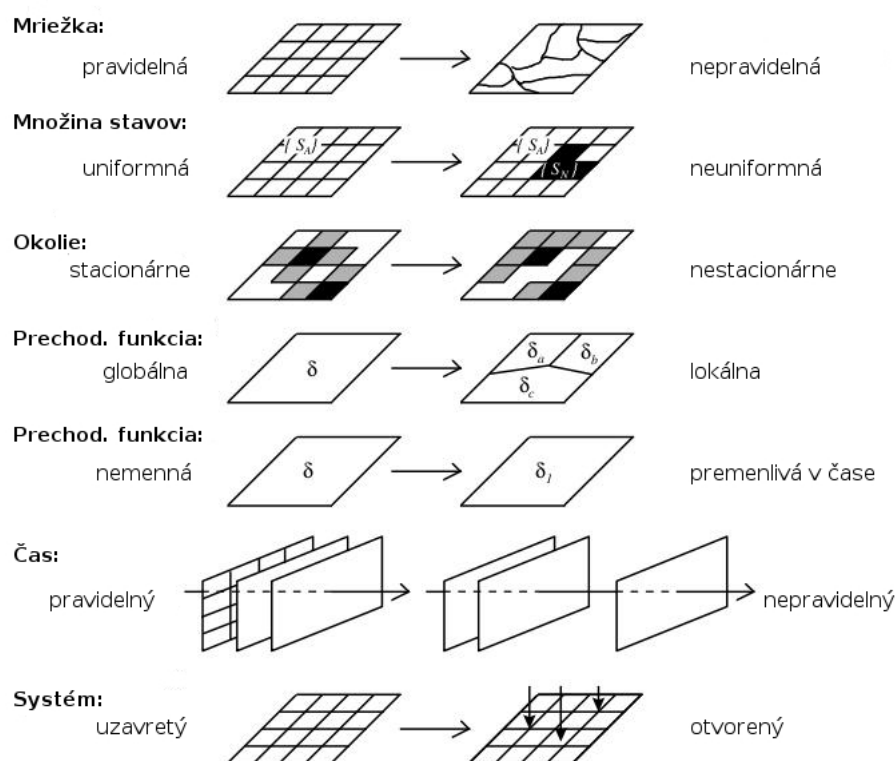
4.3 Hlavné aplikačné domény

Pomerne úzka aplikačná doména celulárnych automatov sa postupom času rozrástla až do takej miery, že sa CA začali používať v každej oblasti, kde je potrebné simulovať nejaké dynamické priestorové deje, ktoré sú charakteristické svojou komplexnosťou. Začal sa používať v rôznych oblastiach života – výpočetné úlohy, fyzikálne, chemické, biologické procesy, sociologické procesy (segregácia) atď. V praktických experimentoch sa CA využívajú v rôznych modifikáciách, málokedy sa použije model klasického celulárneho automatu. Príklady modifikácií CA sú znázornené na obrázku 4.4.

Významné postavenie má CA v modelovaní biochemických javov, príkladom je predikcia miesta pôsobenia proteínov v bunke. Cieľom je vytvoriť automatizovanú metódu spoľahlivého určovania polohy skúmaných proteínov. Informácia o polohe proteínu dokáže výrazne

² Interaktívnu implementáciu v podobe appletu možno nájsť na adrese: <http://www.bitstorm.org/gameoflife/>.

³ Pre bližšie informácie o CAM-8 navštívte <http://www.ai.mit.edu/projects/im/cam8>.



Obrázek 4.4: Klasický vs. modifikovaný CA, upravené a prevzaté z [11].

urýchliť proces určovania jeho biologickej funkcie. CA sa v tomto prípade používa na tvorbu „obrázkov“, na ktoré sa aplikujú metódy rozpoznávania vzorov v obraze [70].

Model „bunkového“ automatu možno použiť aj na modelovanie biologických dráh, konkrétne na modelovanie signálnych dráh mitogénom aktivovaných proteínkynáz [41]. Ide o signálnu dráhu, po ktorej sú signály vysielané z cytoplazmatickej membrány do cytoplazmy a jadra. Použitý CA modeluje 3 rôzne substráty a 4 enzýmy. Počiatočné koncentrácie enzýmov sú popísané parametrami buniek celulórného automatu. Každéj bunke je priradený stav, ktorý hovorí, či je bunka prázdna, či je tvorená substrátom, enzýmom alebo ich produktom. Obsah bunky môže uniknúť z okupujúcej bunky alebo prejsť do susednej okupovanej bunky. Tieto trajektórie sú popísané pomocou pravdepodobnostných pravidiel na začiatku behu celulórného automatu, aby reflektovali predpokladaný vzťah medzi prvkami systému. Pravidlá sú nasledovne aplikované náhodne na každú bunku, až kým všetky bunky nemajú korektne prepočítané svoje stavy a trajektórie.