

Celulární automaty

Znalostní technologie III
materiál pro podporu studia

OBSAH

HISTORIE VÝZKUMU	3
CO JE CELULÁRNÍ AUTOMAT?	4
HRA ŽIVOTA (GAME OF LIFE)	7
KLUZÁK A KLUZÁKOVÉ DĚLO	9
VÝZNAM CELULÁRNÍCH AUTOMATŮ	10
CELULÁRNÍ AUTOMATY PRAKTICKY	10
ZDROJE.....	14

Historie výzkumu

Snad úplně první, kdo se zabýval problematikou celulárních automatů, byl J. v. Neumann. Neumann se zabýval sebereprodukcí, přičemž jeho snahy směřovaly k vytvoření výpočetního systému, který by byl schopný vytvářet své vlastní kopie – sebereprodukovat se (rozmnožovat se). Své myšlenky ohledně takového stroje uvedl roku 1948 na přednášce s názvem „Obecná teorie automatů“. Čerpal přitom z prací vědců, kteří se velmi intenzivně zabývali umělými neuronovými sítěmi – W. McCullocha a W. Pittse. Dále pak čerpal z poznatků, ke kterým dospěl i A. Turing. Neumann navrhl samoreprodukcující se automat a přitom došel k závěru, že na své nejnižší úrovni vede komplexita (složitost) ke degeneraci. To znamená, že automat, který tvoří jiné automaty, je tvoří v jednodušší formě než je on sám. Ovšem nad určitou minimální úrovní toto přestává platit a automat dokáže udržovat sám sebe. Neumann dále tvrdil, že přirozené organismy jsou mnohem složitější než umělé automaty. Jestliže ale sledujeme tyto umělé výtvořky, tak lze spatřit určité podobnosti s živou hmotou. Takový automat nám umožňuje si s životem v počítači pohrávat, studovat ho a pozorovat. Neumann dokázal spojit matematickou teorii, která se skrývá za automaty a biologii. Neumann tedy vytvořil automat s 29 stavy, 200000 buňkami, přičemž neurony zajišťovaly logické řízení automatu.



Obrázek 1: J. v. Neumann



Obrázek 2: S. Ulam



Obrázek 3: J. H. Conway

Jeho řešení bylo ale velmi komplikované. S. Ulam poradil Neumannovi, aby svůj automat zjednodušil a dosáhl tak elegantnějšího řešení. Až zde můžeme vlastně hovořit o pojmu „celulární automat“ (nebo jinak „buněčný automat“), protože to co Ulam Neumannovi poradil, byl právě celulární automat. Neumanna Ulamova myšlenka velmi zaujala už z toho důvodu, že se snažil zvýšit rychlost počítačů pomocí paralelních výpočtů a právě celulární automaty paralelní výpočty umožňují. Neumann a Ulam tedy položili základy pro studium celulárních automatů. Po Neumannově smrti pokračoval ve výzkumu celulárních automatů A. Burks a jeho student J. Holland. Pokud je Vám jméno „Holland“ povědomé, pak právě on stojí za přístupem tzv. genetických algoritmů. J. Holland navrhl flexibilní celulární automaty, které byly schopny se přizpůsobovat svému prostředí a dále je využil pro optimalizační úlohy.

Bohužel, nadšení pro celulární automaty, a výzkum komplexity pomocí výpočetní techniky, trochu opadlo. Na vině byla jednak nedostatečná výkonnost tehdejších výpočetních systémů a také, že tato oblast vybočovala, byla příliš odlišná od ostatních věd. Osvěžení v oblasti celulárních automatů přinesl J. H. Conway, který vytvořil hru „Life“ – „Život“, o které se

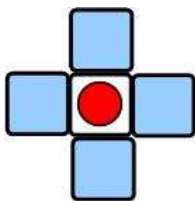
zmíním dále. Conwayovi byly známe výsledky prací Ulama a dalších, kteří experimentovali s různými podmínkami ovlivňující automaty (počty stavů, druhy pravidel, struktura okolí, ...). Conway navrhl pravidla pro hru „Life“ tak, aby se vyhnul vzniku takových struktur, které rychle mizí nebo neomezeně rostou [1]. Byl nadšen tím, jak málo stačí k tomu, aby vzniklo komplexní chování. M. Gardner představil Conwayovu hru v časopise *Scientific American* ve formě zábavné hry pro samotáře. K hraní hry postačovala šachovnice a žetony o dvou barvách. Tato hra způsobila, že se celulární automaty staly běžnou záležitostí ve vědeckém světě a rozšířily se i mimo něj. V současné době existují různé variace hry Life, která má i dnes své příznivce. Jak již bylo zmíněno, celulární automaty umožňují realizovat paralelní výpočty a tak se objevily snahy vytvořit jejich hardwarovou podobu. První pokusy se objevily v 50. letech, např. v kombinaci televize a počítače. Dále vznikl CAM (Cellular Automata Machine) v několika verzích na MIT (Margolus, Toffoli).

Co je celulární automat?

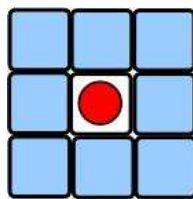
Celulární automat (CA) (angl. v jednot. č. cellular automaton, v množ. č. cellular automata) je dynamický systém a matematický model, který modeluje živý systém.

Vlastnosti celulárního automatu:

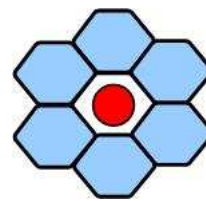
- pracuje v diskrétním čase a prostoru (fyzikální veličiny nabývají diskrétních hodnot z konečné množiny);
- je tvořen buňkami (cells) – od toho název celulární (buněčné automaty);
- buňky mohou být uspořádány do tvaru:
 - o přímky (pole) – hovoříme o jednorozměrných CA (značení = 1D CA);
 - o pravidelné mřížky (nejčastěji) – hovoříme o dvourozměrných CA (značení = 2D CA);
 - o třírozměrné struktury (značení = 3D CA).
- každá buňka může nabývat různých stavů, nejčastěji stavů dvou (binární CA):
 - o jeden stav označuje prázdné pole => mrtvá buňka (0);
 - o druhý stav označuje plné pole => živá buňka (1).
- hodnoty stavů buněk se určují podle lokální přechodové funkce, která je stejná pro všechny buňky a definuje se pravidly. Argumentem této funkce jsou aktuální hodnoty stavu buňky a stavů okolních buněk => tedy, buňka mění svůj stav podle toho, jak jsou nadefinována pravidla;
- každá buňka tedy má informaci o sobě samé, ale i o svém okolí (lokální informace) a na základě toho koná (rozhoduje se, co udělá v dalším kroku (cyklu, generaci));
- buňka má i okolí, které ovlivňuje její rozhodování o změně jejího stavu:
 - o u 1D CA je okolí definováno tzv. poloměrem = počet sousedů po obou stranách buňky;
 - o u 2D CA existuje tzv.
 - Neumannovské okolí (4 sousedé), viz. obrázek 4.;
 - Moorovské okolí (8 sousedů), viz. obrázek 5;
 - Šestiúhelníkové okolí (6 sousedů), viz. obrázek 6.



Obrázek 4: Neumannovské okolí



Obrázek 5: Moorovo okolí



Obrázek 6: Šestiúhelníkové okolí

Hlavní rysy celulárních automatů spočívají ve třech základních vlastnostech:

- Paralelismus (výpočty ve všech buňkách probíhají zároveň, nikoliv sériově);
- Lokalita (nový stav závisí na aktuálním stavu buňky a okolních buněk);
- Homogenita (všechny buňky používají stejnou lokální přechodovou funkci => stejné podmínky pro všechny).

Jak je zmíněno v [1]: „Dejte vědcům vesmír a budou si hrát na Boha.“ Tím, že máme volnost ve stanovení různých pravidel pro hru Life, ve využití různých okolí, tak si vytváříme různé světy – různé vesmíry. Pravidla nám budou řídit podmínky života.

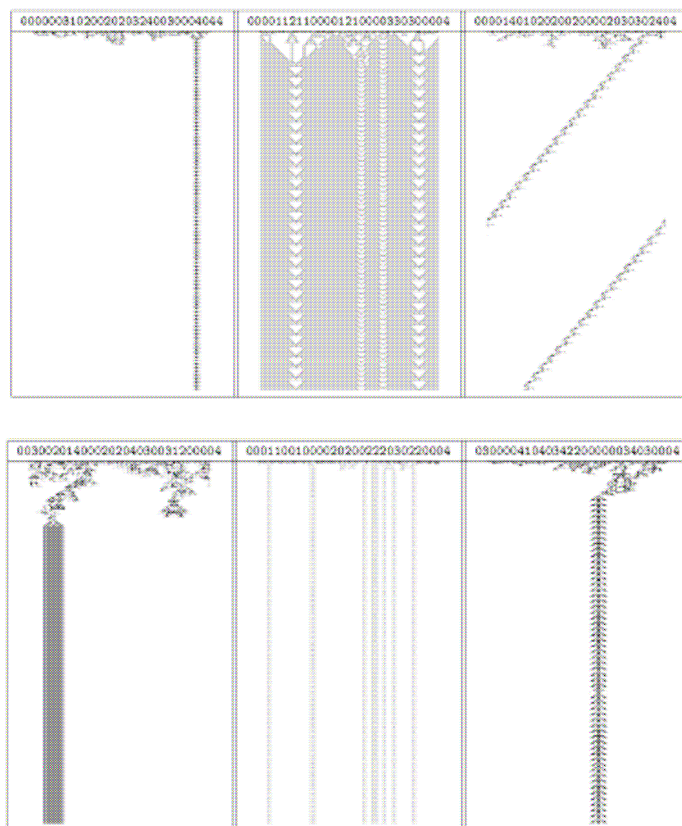
Další osobností, spojenou s celulárními automaty, je S. Wolfram – fyzik a matematik. Určitě to nepřeháníme, když ho nazveme geniálním vědcem, viz. [2]. Mnohem více je známý jako tvůrce programu Mathematica, který se používá např. pro úpravu algebraických výrazů, při derivování nebo úpravách algebraických a diferenciálních rovnic. Ve vztahu k celulárním automatům ho zajímalo to, jak vzniká komplexita. Je autorem rozdělení celulárních automatů do čtyř základních kategorií podle jejich chování a složitosti. Tyto třídy ale nevysvětlují, jak struktury vznikají a jaké jsou mezi nimi vztahy [1]. Obrázky uvedené níže jsou převzaty ze zdroje [3].

- Třída I.: vývoj struktury dospěje do konečného stavu – dál se nemění (angl. Still lifes)

00040001002000200020030000004	001000010000000200001030000014	000010010000000200400030100004

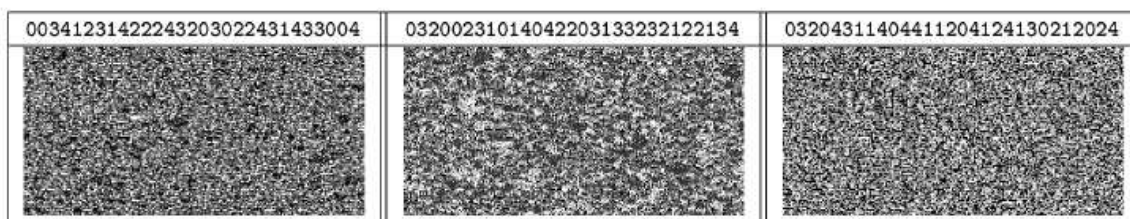
Obrázek 7: Wolframova třída I

- Třída II.: vývoj vede k jednoduchým strukturám, které se opakují (oscilátory)



Obrázek 8: Wolframova třída II

- Třída III.: chaotické chování, neopakující se struktury;



Obrázek 9: Wolframova třída III

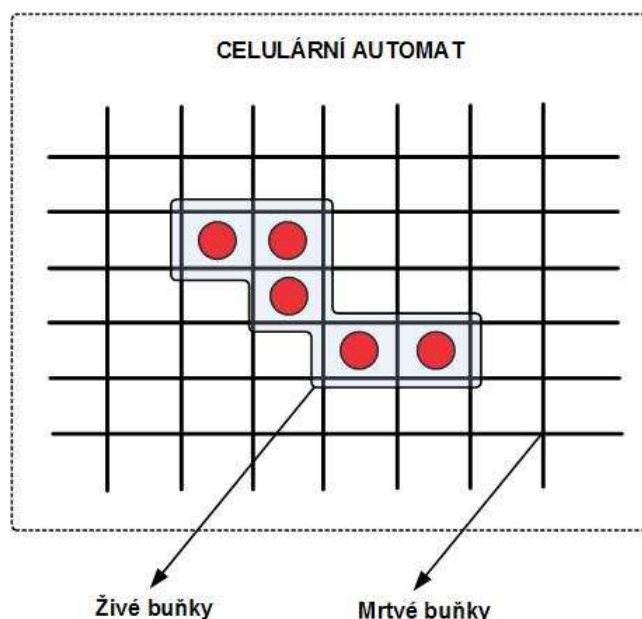
- Třída IV.: vzory vykazující nejkomplexnější chování;
 - o sem bychom mohli zařadit hru Life, i když spíš se nachází mezi II. a III. třídou;



Obrázek 10: Wolframova třída IV

Hra života (Game of Life)

Jedná se o nejznámější celulární automat, který vytvořil matematik J. H. Conway roku 1970. Jedná se o hru, kterou nehraje žádný hráč, protože do hry neposkytuje žádné vstupy. Při návrhu hry Life se Conway inspiroval výzkumem sebe reprodukce od Neumanna, kdy cílem bylo vytvořit taková pravidla, která budou jednoduchá, ale výsledné chování se bude obtížně předpovídat. Vývoj buňky je dán jejími stavy, stavy okolních buněk a pravidly, která definují její chování. Celý svět, ve kterém se život odehrává, je realizován v dvoudimenzionální mřížce, ve které buňky existují. Buňky zde nabývají dvou stavů – živá buňka (1 – zaplněné políčko) a mrtvá buňka (0 – prázdné políčko) + stav přežívání, viz. obrázek č. 11. Každá buňka ví o sobě samé (o svém stavu) a o stavech buněk v jejím bezprostředním okolí.



Obrázek 11: Celulární automat

Pravidla hry [4]:

- pro živou buňku: jestliže má buňka kolem sebe méně než 2 buňky, pak umírá na osamělost;
- pro živou buňku: jestliže má buňka kolem sebe více než 3 buňky, pak umírá na „přesycení“, „přemnožení“;
- pro živou buňku: jestliže má kolem sebe 2 nebo 3 buňky, pak buňka přežívá;
- pro mrtvou buňku: jestliže má buňka ve svém okolí právě 3 buňky, pak dojde ke zrodu buňky (= trojpohlavní rozmnožování), jinak zůstává mrtvou.

První generace (krok, cyklus) je vytvořena aplikací výše uvedených pravidel, přičemž se pravidla aplikují současně na každou buňku. Opakovanou aplikací pravidel vznikají další generace buněk. Použitím pravidel mohou vzniknout velmi zajímavé struktury, viz. zdroj [3] nebo [5]:

- struktura, která po X generacích zanikne;
- stabilní struktury (block, boat, ...) (still lifes);
- cyklicky se opakující struktury (blinker, toad, ...) (oscilators);
- cyklicky se opakující struktury, ale posunuté (glider, ...) (spaceships).

Někdy se můžete setkat s označením hry Life takto: 23/3. Jedná se o symbolický zápis hlavních vlastností celulárního automatu. Jedná se o zápis označující:

>za jakých podmínek buňky budou přežívat/za jakých podmínek se buňky narodí<;
>v anglické verzi je označení takovéto – S/B => Survival/Birth<.

Hlavním poselstvím hry Life je následující [3]:

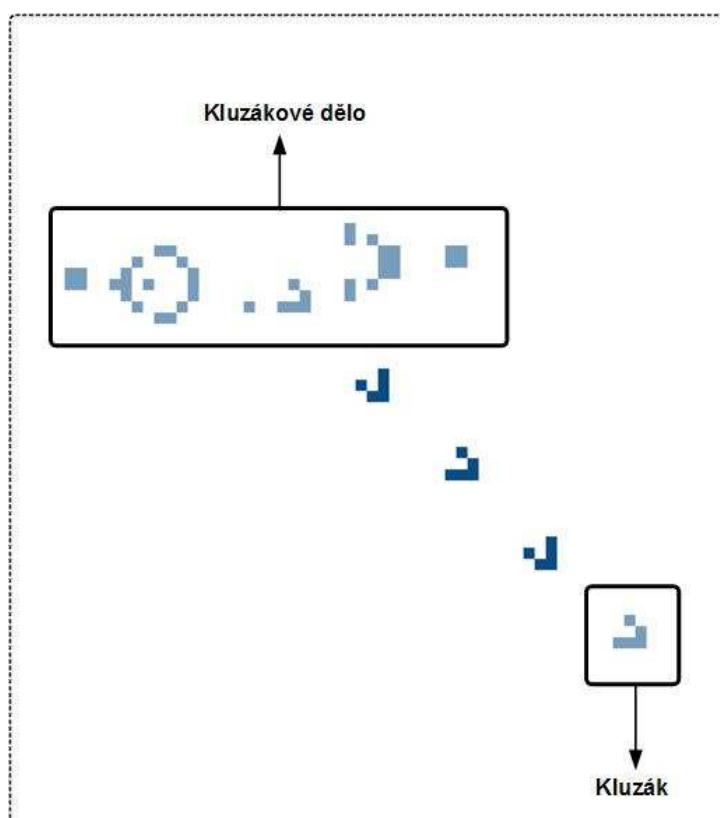
„I jednoduchá pravidla mohou vést ke složitému (komplexnímu) chování.“

Kluzák a kluzákové dělo

Kluzák (glider) je ve hře života určitým pravidelně se opakujícím se a posunujícím se vzorkem a zároveň nejmenší pohyblivou strukturou vůbec. Poprvé byl kluzák objeven R. K. Guyem. Cestuje po diagonále rychlostí čtvrtiny rychlosti světla. Je často produkován z náhodně generovaných startovních konfigurací. Jeho vlastností je jednoduchý vznik, možnost srážet se s jinými pro zformování složitějších struktur. Může být také použit pro přesun informací na velké vzdálenosti. Proč hovoříme o této struktuře? Právě hra Life dokáže „kluzáky“ produkovat dle svých pravidel.

Kluzákové dělo (glider gun)

Kluzákové dělo produkuje v každé 30. generaci jeden kluzák. Kluzák sám je cyklicky se opakujícím obrazcem, který se posunuje v každé čtvrté generaci o jedno políčko po uhlopříčce. Celá řada jiných struktur je schopných kluzáky generovat. Konfigurace 14-ti kluzáků vytvoří „kluzákové dělo“. Ve hře života je možné vytvořit kluzákové dělo s kluzáky, kde každý má periodu rovnou nebo větší než 14. Možná podoba kluzákového děla je uvedena ve zdroji [4], [5], a nebo na obrázku č. 12 (implementace v prostředí NetLogo).



Obrázek 12: Kluzákové dělo v NetLogu

Význam celulárních automatů

Důvodů, proč studovat celulární automaty, je několik. Umožňují nám konstruovat modely, které simulují živou hmotu. Je možné pomocí výpočetních systémů tyto modely zkoumat a třeba definovat jiné podmínky pro model. Pak lze zjistit, jaké podmínky způsobují jaké chování „živých“ struktur. Svůj účel plní v modelování a simulacích dynamických systémů, návrhu hardwaru provádějící paralelní výpočty, konstrukcích modelů pro účely fyziky nebo i astronomie (vesmír jako celulární automat). Pomocí nich je možné zkoumat velice komplexní systémy. Detailnější pohled na aplikační oblasti nabízí např. [7].

Další výhodou (když to vztáhneme k předmětu ZT3) je fakt, že v knihovně modelů prostředí NetLogo je uvedena celá řada implementací celulárních automatů, viz. Computer Science/Cellular Automata/... a je tedy možné se pustit do praktického výzkumu této velmi zajímavé oblasti.

Celulární automaty prakticky

Výše uvedené informace měly poskytnout základní pohled na problematiku celulárních automatů, ale bylo by dobré si ukázat prakticky, jak se realizují buněčné výpočty. Jestliže si otevřeme model „Life“ v prostředí NetLogo (z knihovny modelů), pak si můžeme model spustit a pozorovat, co se děje. Můžeme si model zpomalit, abychom viděli detaily fungování hry. Uděláme ale jinou věc. Zkusíme si nakreslit na papír (nejlépe čtverečkový) určitou strukturu a budeme na základě výše uvedených pravidel hry Life odhadovat, jak se bude tato struktura vyvíjet v dalších generacích, aniž bychom použili jakoukoliv počítačovou implementaci hry Life. Počítačová realizace hry nám bude sloužit jen jako kontrola, protože tak více pochopíme, jak se provádějí buněčné výpočty.

Budeme uvažovat následující strukturu v nulté generaci a zkoumat, jaký vývoj bude mít v dalších generacích. Můžeme volit následující postup:

1. zjištění počtu sousedů pro každou živou buňku (červené kolečko);
2. zjištění počtu sousedů pro každou mrtvou buňku (bílé kolečko);
3. poté můžeme analyzovat nejprve živé buňky podle pravidel hry Life
 - a. živá buňka může být buď stále živá (2 nebo 3 živé buňky v okolí);
 - b. živá buňka může uhynout (modrý křížek) v důsledku nedostatku živých okolních buněk (<2) nebo většího množství živých buněk (>3).
4. Dále analyzujeme mrtvé buňky podle pravidel hry Life
 - a. mrtvá buňka může být stále mrtvá;
 - b. mrtvá buňka může přejít do stavu života (světle modrý čtvereček).

	1	2	2	1	0
	1	2	2	2	0
	1	4	3	3	0
	0	2	1	2	0
	0	1	1	1	0

0. generace – výchozí struktura

	1	2	2	1	0
	1	2	2	2	0
	1	4	3	3	0
	0	2	2	2	0
	0	1	1	1	0

Analýza živých buněk:

3 zůstanou (mají kolem sebe dostatečné množství živých buněk, které je živí) ...

a jedna umře, protože má jen jednoho souseda, který je příliš slabý na to, aby buňku udržel při životě

	1	2	2	1	0
	1	2	2	2	0
	1	4	3	3	0
	0	2	1	2	0
	0	1	1	1	0

Analýza mrtvých buněk: narodí se 1 buňka, protože má kolem sebe 3 živé buňky, které ji užijí

	1	2	2	1	0
	1	2	3	3	1
	1	3	3	2	1
	0	1	2	2	1
	0	0	0	0	0

1. generace vznikne z výsledků analýzy živých a mrtvých buněk

Pro konstrukci další generace vyjdeme z generace první a přepočítáme hodnoty buněk živých a mrtvých.

	1	2	2	1	0
	1	2	3	3	1
	1	3	3	2	1
	0	1	2	2	1
	0	0	0	0	0

Analýza živých buněk:
struktura se vůbec nezmění

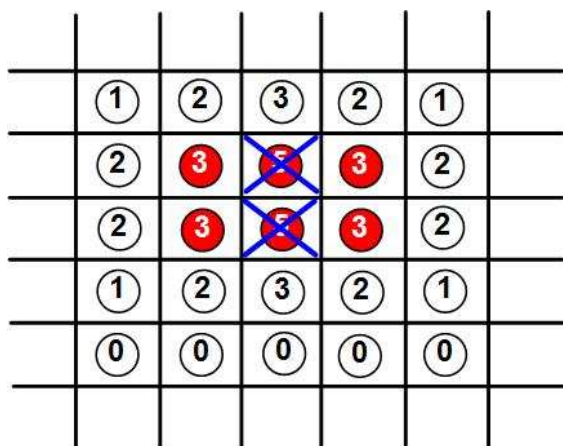
	1	2	2	1	0
	1	2	3	3	1
	1	3	3	2	1
	0	1	2	2	1
	0	0	0	0	0

Analýza mrtvých buněk:
narodí se 2, protože mají
kolem sebe právě 3 sousedy

	1	2	3	2	1
	2	3	5	3	2
	2	3	5	3	2
	1	2	3	2	1
	0	0	0	0	0

2. generace

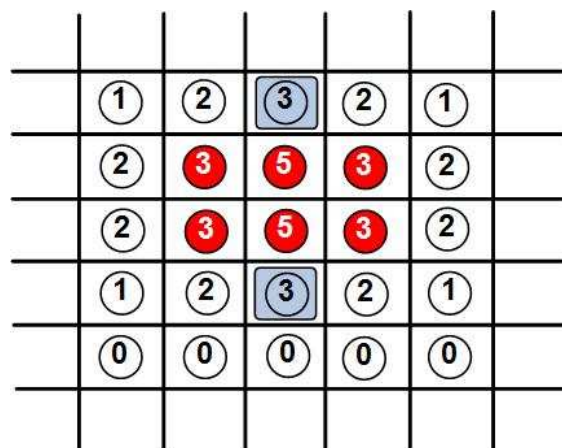
Opět, pro konstrukci třetí generace vyjdeme z generace druhé.



Analýza živých buněk:

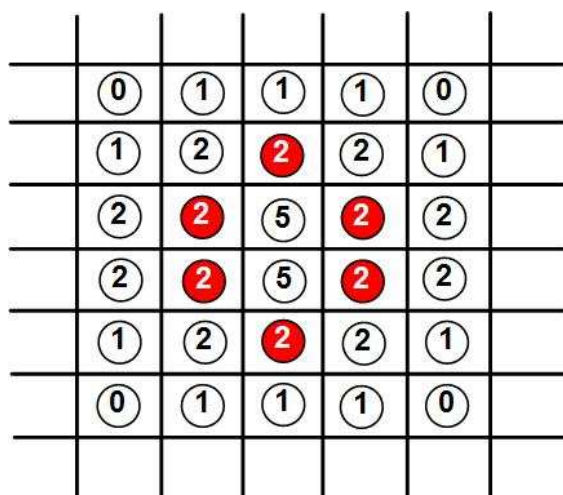
zůstanou 4

zemřou 2, protože mají kolem sebe až příliš živých sousedů

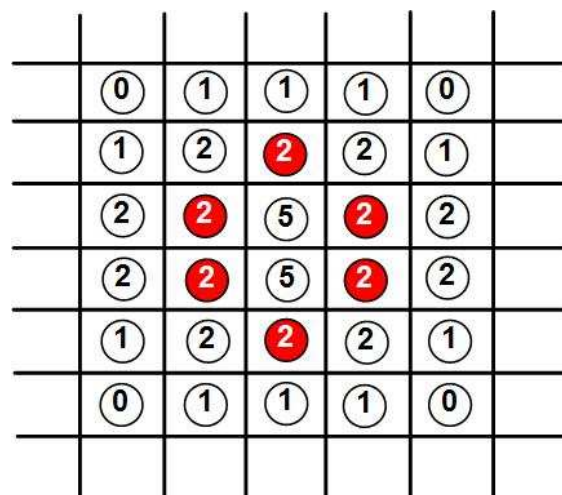


Analýza mrtvých buněk:

narodí se 2, obě mají kolem sebe 3 sousední živé buňky



3. generace



4. generace

Jedná se o stabilní strukturu. Ve hře Life v prostředí NetLogo je možné si ověřit správnost našich vytvořených struktur ruční formou.

Zdroje

[1] COVENEY, P. – HIGHFIELD, R. *Mezi chaosem a řádem*. Hranice complexity: hledání řádu v chaotickém světě. Vydavatelství Mladá fronta. Vydání první. Praha, 2003. ISBN 80-204-0989-0.

[2] SCIENCEWORLD. *Nový druh vědy si dobře rozumí s byznysem*. 2005.
Přístup z internetu: URL:
<http://scienceworld.cz/sw.nsf/ID/738973EF6627B006C125700300648D1D?OpenDocument&cast=1>

[3] PELÁNEK, R. *Buněčné automaty*. Přednáška.
Přístup z internetu: URL: <http://www.fi.muni.cz/~xpelane/IV109/slidy/ca.pdf>

[4] Wikipedia. *Conway's Game of Life*.
Přístup z internetu: URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Conway%27s_Game_of_Life

[5] ALife. *Celulárne automaty: Základné typy štruktúr*.
Přístup z internetu: URL: <http://alife.tuke.sk/index.php?clanok=2264>

[6] ALife. *Celulárne automaty: Podstata hry života*.
Přístup z internetu: URL: <http://alife.tuke.sk/index.php?clanok=1907>

[7] ALife. *Celulárne automaty: Aplikácie celulárnych automatov*.
Přístup z internetu: URL: <http://alife.tuke.sk/index.php?clanok=145>

Obrázky z internetu:

J. v. Neumann: <http://www.atomicarchive.com/Images/bio/B03.jpg>

S. Ulam: http://content.answers.com/main/content/wp/en/b/b6/Stanislaw_Ulam.jpg

W. H. Conway: <http://www.at-mix.de/images/glossar/conway-john.jpg>