



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA INFORMATIKY
A VÝPOČETNÍ TECHNIKY

Semestrální práce

Buněčné automaty a jejich využití v kybernetice

Filip Řežábek

Obsah

1	Úvod	2
2	Buněčné automaty	3
2.1	Definice	3
2.2	Mřížky a stavy buněk	4
2.3	Sousedství	4
2.4	Přechodová pravidla	5
3	Příklady CA	7
4	Využití buněčných automatů	11
5	Závěr	12
	Bibliografie	13

Úvod

1

Tento dokument pojednává o buněčných automatech a jejich využití v různých oblastech, se zaměřením na kybernetiku a informatiku. První kapitola se věnuje definicím a základním konceptům buněčných automatů, poté následuje kapitola s vizuálními příklady různých typů buněčných automatů. Poslední kapitola se zabývá praktickými aplikacemi buněčných automatů v různých vědeckých a technických oblastech.

Buněčné automaty

2

2.1 Definice

Buněčný automat (CA z anglického cellular automata) je diskretní, abstraktní výpočetní systém, který se skládá z jednoduchých prvků. Tyto prvky, nazývané buňky, jsou uspořádány do mřížky (nejčastěji jednorozměrné nebo dvourozměrné) a každá nabývá jednoho z konečného počtu stavů. Stav každé buňky se mění v diskretních časových krocích podle předem definovaných pravidel, která závisí na stavu samotné buňky a stavu okolních buněk v její blízkosti (tzv. sousedství) [BT25].

Buněčné automaty byly vynalezeny v roce 1940 americkými matematiky Johnem von Neumannem a Stanisławem Ulamem v Los Alamos National Laboratory¹. Přestože buněčné automaty působí jednoduše, některé mohou být i Turingovsky úplné, které dokážou provést jakýkoli výpočetní proces, jakého je schopen obecný počítač. Nejznámějším příkladem buněčného automatu je Hra života od Johna Conwaye (Game of Life), která simuluje procesy života, smrti a dynamiku vývoje populace [Bri25].

Formálně můžeme buněčný automat A definovat jako čtveřici.

$$A = (L, S, d, f) \quad (2.1)$$

- L je mřížka buněk.
- S je konečná množina stavů buněk.
- $d \in \mathbb{Z}^+$ je rozměr mřížky (dimenze) buněčného automatu.
- $f : S^N \rightarrow S$ je přechodová funkce, kde N označuje sousedství buňky. Tato funkce určuje nový stav buňky na základě aktuálního stavu buňky a stavů buněk v sousedství. Přechodové funkci se také říká přechodové pravidlo.

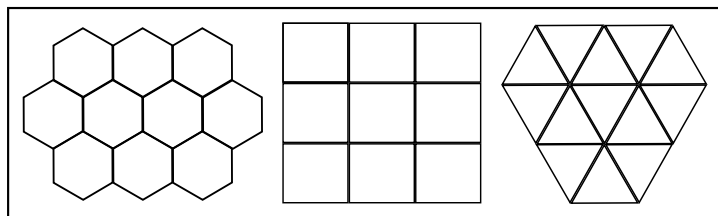
¹Los Alamos National Laboratory je výzkumné zařízení ve Spojených státech, ve kterém se vytvořila první použitá atomová bomba během projektu Manhattan.

Hodnoty buněk v čase t jsou aktualizovány na základě přechodové funkce f a stavů buněk v čase $t - 1$. Tento proces se opakuje v diskrétních časových krocích, což vede k vývoji vzorů a chování v mřížce buněčného automatu [ST98].

Jednotlivé komponenty buněčného automatu jsou popsány níže.

2.2 Mřížky a stavy buněk

Mřížky buněčných automatů mohou nabývat různých tvarů a rozměrů. Nejjednodušší je jednorozměrná mřížka, kde jsou buňky uspořádány do řady. U dvourozměrných mřížek připadají v úvahu klasické čtvercové mřížky, ale i hexagonální či trojúhelníkové, jako je znázorněno na obrázku 2.1. Mřížky mohou být také rozšířeny do vyšších rozměrů, i když tyto jsou méně běžné v praktických aplikacích [Weia].



Obrázek 2.1: Různé typy mřížek u 2D buněčných automatů: hexagonální, čtvercová a trojúhelníková. Překresleno podle [ZQC23].

Každá buňka v mřížce nabývá jednoho ze stavů z konečné množiny S . Stav buňky může reprezentovat různé informace v závislosti na konkrétní aplikaci buněčného automatu. Nejběžnějším příkladem je binární buněčný automat, kde každá buňka může nabývat pouze dvou stavů, například 0 a 1, což může reprezentovat například vypnuto a zapnuto nebo černá a bílá [Weia].

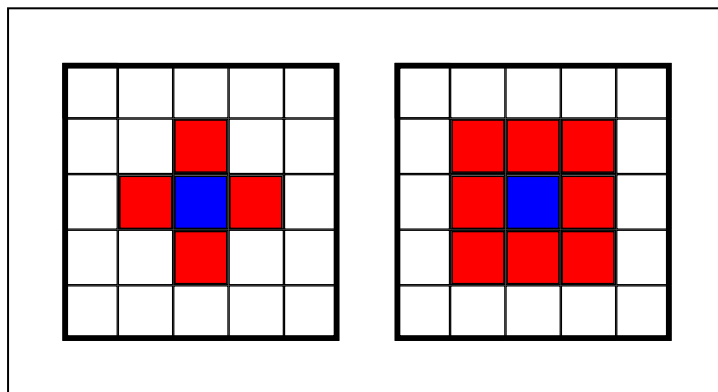
Buněčný automat je definován na nekonečné mřížce, ale v praktických aplikacích se často používají konečné mřížky s různými typy okrajových podmínek. Typickým způsobem jak vyřešit sousedství pro buňky na hranách mřížky je použití periodické okrajové podmínky, kdy buňky na jedné straně mřížky sousedí s buňkami na opačné straně [Kar05].

Dalšími běžnými typy okrajových podmínek jsou například pevné okraje, kde buňky na okraji mřížky mají pevně stanovené stavy nebo reflexní okraje, kde buňky na okraji mřížky odrážejí stavy svých sousedů uvnitř mřížky [BCK04].

2.3 Sousedství

Sousedství buněčného automatu určuje, které buňky ovlivňují stav dané buňky při aplikaci přechodového pravidla. Dvě běžně používaná sousedství v dvourozměr-

ných CA jsou Mooreovo a Von Neumannovo sousedství. Sousedství Von Neumanna zahrnuje čtyři přilehlé buňky (nahoru, dolů, doleva, doprava), zatímco Mooreovo sousedství zahrnuje osm okolních buněk (včetně diagonálních). Sousedství může být také rozšířeno nebo upraveno podle specifických potřeb aplikace [Weia]. Na obrázku 2.2 jsou znázorněny příklady těchto dvou sousedství, kde červené buňky představují sousedy dané buňky (modrá).



Obrázek 2.2: Příklady sousedství v 2D buněčných automatech: Von Neumannovo a Mooreovo. Překresleno podle [Gaz+13].

Je-li dána pozice buňky $\mathbf{i}$, $\mathbf{i} \in \mathbb{Z}^d$ v d -rozměrné mřížce, pak sousedství N pro tuto buňku definujeme jako

$$G_{\mathbf{i}} = \{\mathbf{i}, \mathbf{i} + \mathbf{r}_1, \mathbf{i} + \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{i} + \mathbf{r}_n\} \quad (2.2)$$

kde n je pevný parametr určující počet sousedních buněk a $\mathbf{r}_j$ je pevným vektorem v d -rozměrném prostoru určujícím relativní pozici j -té sousední buňky vůči buňce na pozici $\mathbf{i}$ [ST98].

2.4 Přechodová pravidla

Přechodová pravidla, neboli přechodové funkce, určují, jak se stav každé buňky mění v čase na základě jejího aktuálního stavu a stavů buněk v jejím sousedství. Formálně je přechodové pravidlo definováno jako funkce $f : S^N \rightarrow S$, kde N označuje sousedství buňky. Tato funkce bere jako vstup stav buňky a stavy jejích sousedů a vrací nový stav buňky pro následující časový krok [ST98].

Přechodová pravidla lze také vyjádřit jako podmíněný pokyn: “Pokud je stav sousedství takový a takový, pak přejdi do stavu s ” [BT25].

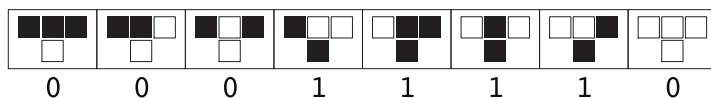
Nejznámějším příkladem přechodového pravidla je pravidlo Hry života Johna Conweye (Game of Life). V tomto pravidle má každá buňka dva možné stavy: živá (1) a mrtvá (0). Přechodové pravidlo Hry života je následující:

- Každá živá buňka s méně než dvěma živými sousedy zemře.
- Každá živá buňka s dvěma nebo třemi živými sousedy přežije.
- Každá živá buňka s více než třemi živými sousedy zemře.
- Každá mrtvá buňka s přesně třemi živými sousedy se stane živou.

Tato jednoduchá pravidla vedou ke komplexnímu chování a vzorům v mřížce buněčného automatu [Weic].

U speciálních typů buněčných automatů, jako jsou elementární buněčné automaty, lze přechodová pravidla reprezentovat pomocí čísel. Pravidla pro elementární buněčné automaty, tedy jednorozměrné CA s binárními stavy a sousedstvím zahrnujícím buňku samotnou a její dva bezprostřední sousedy, lze reprezentovat pomocí celého čísla od 0 do 255 včetně. Každé z těchto čísel odpovídá jedinečnému přechodovému pravidlu pro elementární CA. Přiřazení takového čísla k přechodovému pravidlu se provádí tak, že se všechny možné konfigurace sousedství (celkem 8 pro elementární CA) seřadí do binárního řetězce, kde každý bit určuje nový stav buňky pro danou konfiguraci. Tento binární řetězec se pak převede na desetinné číslo, které představuje číslo pravidla. Sousedství jsou seřazena v sestupném pořadí podle jejich binárních hodnot, tedy od 111 po 000 [Weib].

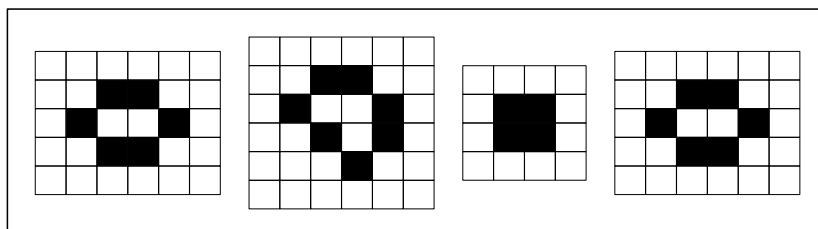
Na obrázku 2.3 je ukázka pravidla číslo 30.



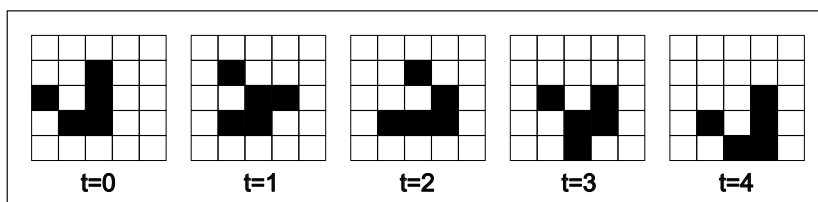
Obrázek 2.3: Pravidla číslo 30 pro elementární buněčný automat [Weib].

Buněčné automaty jsou zajímavé nejen z teoretického hlediska, ale také díky své výrazné vizuální stránce. Lze pozorovat, že i jednoduchá pravidla mohou vést ke vzniku komplexních a překvapivých obrazců. V této kapitole jsou uvedeny některé vizuální příklady dvourozměrných buněčných automatů s binárními stavy, ukázky vzorců vznikajících z jednorozměrných buněčných automatů a nakonec příklad trojrozměrného buněčného automatu.

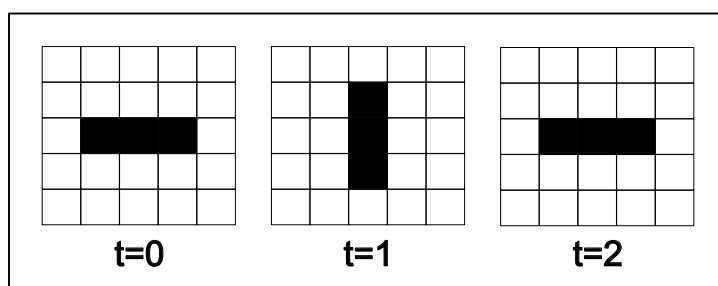
Na obrázcích 3.1 až 3.4 je ukázka vývoje automatu podle pravidel Hry života z různých počátečních konfigurací. Jednotlivé konfigurace byly zvoleny tak, aby demonstrovaly různé typy chování, jako jsou stabilní struktury, oscilátory a pohyblivé objekty (glidery).



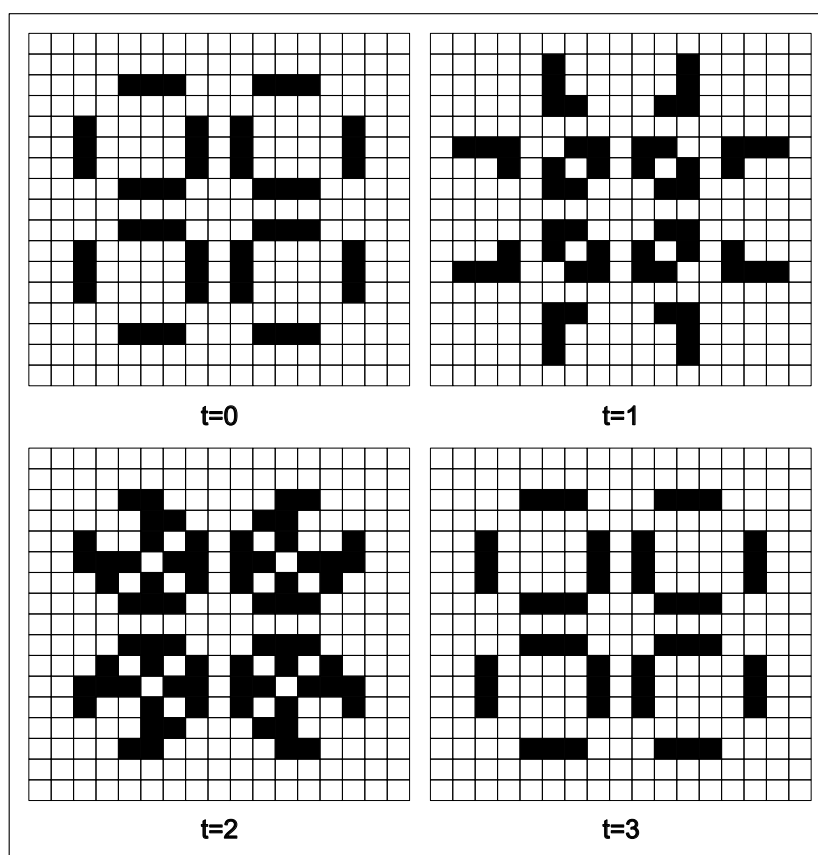
Obrázek 3.1: Neměnné struktury (stále) v Conwayově hře života. Překresleno podle [Wik].



Obrázek 3.2: Vývoj glideru v Conwayově hře života za 4 časové kroky. Překresleno podle [Dor+12].



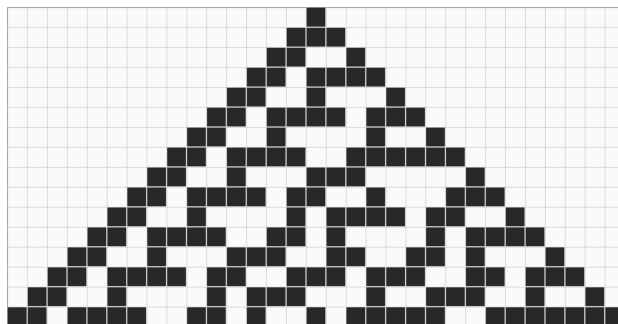
Obrázek 3.3: Vývoj jednoduchého oscilátoru v Conwayově hře života za 2 časové kroky. Překresleno podle [Wik].



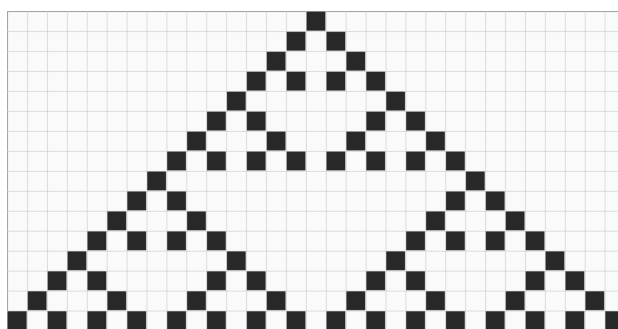
Obrázek 3.4: Vývoj oscilátoru v Conwayově hře života za 3 časové kroky. Překresleno podle [Wik].

Obrázky 3.5 až 3.9 ukazují vývoj elementárních buněčných automatů s různými pravidly. Jelikož se jedná o jednorozměrné automaty, jsou zobrazeny jako dvourozměrné matice, kde každý řádek reprezentuje stav buněčného automatu v jednom časovém kroku (i -tý řádek odpovídá času $t = i$). Počáteční konfigurace pro všechny tyto příklady je nastavena tak, že pouze jedna buňka uprostřed je aktivní (stav 1)

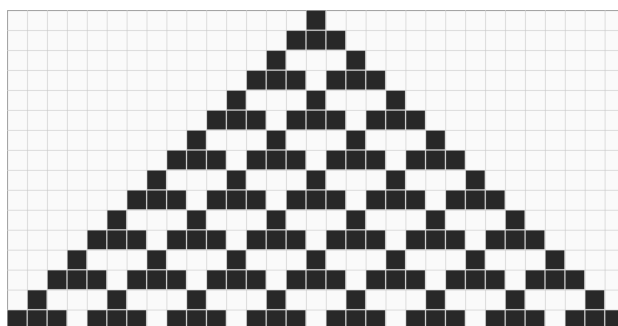
a všechny ostatní jsou neaktivní (stav 0).



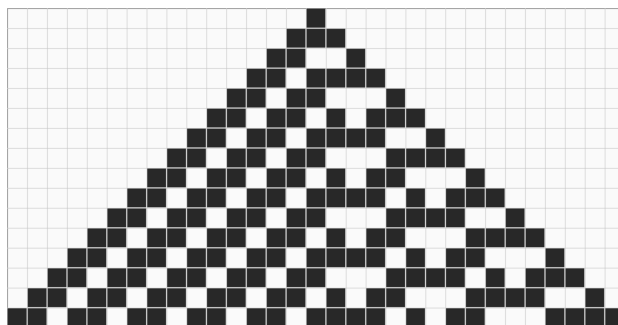
Obrázek 3.5: Vývoj elementárního buněčného automatu podle pravidla číslo 30 z počáteční konfigurace s jednou aktivní buňkou uprostřed.



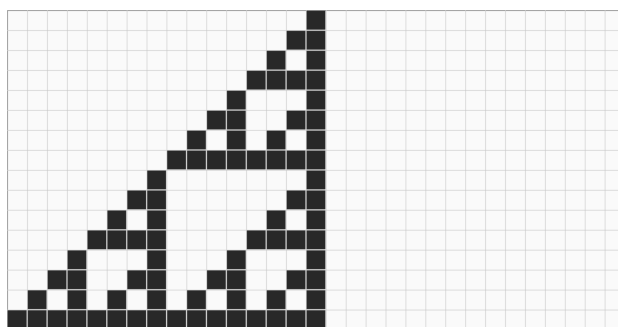
Obrázek 3.6: Vývoj elementárního buněčného automatu podle pravidla číslo 90 z počáteční konfigurace s jednou aktivní buňkou uprostřed.



Obrázek 3.7: Vývoj elementárního buněčného automatu podle pravidla číslo 54 z počáteční konfigurace s jednou aktivní buňkou uprostřed.



Obrázek 3.8: Vývoj elementárního buněčného automatu podle pravidla číslo 62 z počáteční konfigurace s jednou aktivní buňkou uprostřed.



Obrázek 3.9: Vývoj elementárního buněčného automatu podle pravidla číslo 102 z počáteční konfigurace s jednou aktivní buňkou uprostřed.

Využití buněčných automatů

4

Buněčné automaty našly uplatnění v různých oblastech vědy a techniky díky své schopnosti modelovat komplexní systémy.

Kybernetika obecně využívá buněčné automaty k modelování a analýze dynamických systémů. Buněčné automaty lze také využít pro lokální zpětnou vazbu v distribuovaných systémech, což je užitečné například při návrhu samoorganizujících se sítí nebo adaptivních systémů.

Jednou z nejznámějších aplikací buněčných automatů v kybernetice je modelování dopravních systémů. Nagel a Schreckenberg [NS92] představili model dopravního proudu založený na buněčných automatech, který simuluje chování vozidel na silnici. Tento model umožňuje studovat dopravní zácpy, vlny zpomalení a další jevy spojené s dopravou.

V oblasti informatiky se buněčné automaty uplatňují zejména díky své paralelní povaze. Využití nalézá například ve zpracování obrazu, kde jsou CA využívány například pro segmentaci obrazu, detekci hran, rotaci, potlačení šumu nebo kompresi dat. Přehled využití CA ve zpracování obrazu poskytují Nayak, Patra a Mahapatra v jejich práci [NPM15]. Díky paralelnímu zpracování jsou CA vhodné pro implementace na moderních výpočetních architekturách.

Závěr

5

Buněčné automaty jsou zajímavým fenoménem, který kombinuje jednoduchost a komplexnost. I přes svou jednoduchou strukturu nachází využití v různých oblastech vědy. Jejich výhodou také je hravost a vizuální přitažlivost, což z nich činí atraktivní model i pro lidi mimo akademickou sféru.

Bibliografie

- [BT25] BERTO, Francesco; TAGLIABUE, Jacopo. Cellular Automata. In: ZALTA, Edward N.; NODELMAN, Uri (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* [<https://plato.stanford.edu/archives/sum2025/entries/cellular-automata/>]. Summer 2025. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2025.
- [Bri25] BRITANNICA EDITORS. *Cellular Automata* [online]. Encyclopedia Britannica, 2025-08-08 [cit. 2025-11-26]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/cellular-automata>.
- [BCK04] BURZYŃSKI, Marcin; CUDNY, Waldemar; KOSIŃSKI, Witold. Cellular Automata: Structures and Some Applications. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2004, roč. 42, č. 3, s. 461–482.
- [Dor+12] DORIN, Alan; MCCABE, Jonathan; MCCORMACK, Jon; MONRO, Gordon; WHITELAW, Mitchell. A framework for understanding generative art. *Digital Creativity*. 2012, roč. 23. Dostupné z doi: 10.1080/14626268.2012.709940.
- [Gaz+13] GAZMEH, Hassan; ALESHEIKH, Ali; KARIMI, Mohammad; CHEHREGHAN, Alireza. Spatio Temporal Forest Fire Spread Modeling Using Cellular Automata, Honey Bee Foraging, and GIS. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*. 2013, roč. 3, s. 201–214.
- [Kar05] KARI, Jarkko. *Cellular Automata* [Lecture notes]. 2005. Dostupné také z: <https://arxiv.org/html/2503.10320v1>.
- [NS92] NAGEL, Kai; SCHRECKENBERG, Michael. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*. 1992, roč. 2, č. 12, s. 2221–2229.
- [NPM15] NAYAK, Debashis R.; PATRA, Pradyut K.; MAHAPATRA, Anil. A survey on two-dimensional cellular automata and its application in image processing. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2015, roč. 27, č. 1, s. 1–18.

- [ST98] SIPPER, Moshe; TOMASSINI, Marco. An introduction to cellular automata. In: TOMASSINI, Marco; MANGE, Daniel (ed.). *Bio-Inspired Computing Machines: Toward Novel Computational Architectures*. Lausanne, Switzerland: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998, s. 49–58.
- [Weia] WEISSTEIN, Eric W. *Cellular Automaton* [online]. MathWorld – A Wolfram Resource [cit. 2025-11-26]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>.
- [Weib] WEISSTEIN, Eric W. *Elementary Cellular Automaton* [online]. MathWorld – A Wolfram Resource [cit. 2025-11-26]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>.
- [Weic] WEISSTEIN, Eric W. *Game of Life* [online]. MathWorld – A Wolfram Resource [cit. 2025-11-26]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/GameofLife.html>.
- [Wik] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Conway's Game of Life* [online]. Wikipedia [cit. 2025-11-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Conway%27s_Game_of_Life.
- [ZQC23] ZHANG, Junqiao; QU, Qiang; CHEN, Xue-Bo. A Review on Collective Behavior Modeling and Simulation: Building a Link Between Cognitive Psychology and Physical Action. *Applied Intelligence*. 2023, roč. 53, s. 1–30. Dostupné z DOI: 10.1007/s10489-023-04924-7.

1101001
101011000011100010 1100001
101011010101 1100001

11010011101101001
01100001 101
11000101 1101