

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Dokumentace k projektu do předmětu IMS

Aplikace celulárních automatů v biologii

2015/2016

1 Úvod

Cílem této dokumentace je popsat celulární automat modelující vývoj populace dvou rostlinných druhů s rozdílnými životními strategiemi a srovnání těchto dvou rostlin z hlediska náchylnosti k vyhynutí za různých podmínek. Nejprve bude vysvětleno, které rostliny byly pro simulaci vybrány a z jakého důvodu, následně budou popsána fakta nezbytná pro vytvoření modelu, poté koncepce modelu, a experimentování s modelem. Model je implementován v jazyce C. Práce se opírá o článek „A Cellular Automata Model for Population Dynamics Simulation of Two Plant Species with Different Life Strategies“. Model je implementován na základě pravidel uvedených v tomto článku a výsledky experimentů porovnány. Budou také diskutovány případné odlišnosti ve výsledcích prezentovaných ve výše zmíněném článku, oproti výsledkům, kterých dosáhl náš tým při experimentování s modelem.

1.1 Autoři, literatura

Projekt byl vypracován dvoučlenným týmem studentů Fakulty informačních technologií VUT v Brně, a to ve složení:

- Tomáš Furch
- Roman Halík

Při řešení projektu nebylo využito odborných konzultací, avšak bylo využito následující odborné literatury:

- [1] Peringer P.: Prezentace k přednáškám modelování a simulace. (2010). [cit. 2015-11-26]. Dostupné online: <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/course-files-st.php/course/IMS-IT/lectures/IMS.pdf>.
- [2] Rábová Z. a kol: Modelování a simulace, VUT Brno, 1992, ISBN 80-214-0480-9
- [3] XU, Jie. A cellular automata model for population dynamics simulation of two plant species with different life strategies. In Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on .Hangzhou: IEEE, 2010. s. 517–523.

1.2 Validita modelu

Validitu našeho modelu předpokládáme na základě článku[3]. Naš model byl sestaven na základě pravidel popsaných v uvedeném článku a testován v rozsahu hodnot používaných při experimentech.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

2.1 Celulární automat

([2], strana 89)

Celulární automat je diskrétní model prostorového systému, jehož základními komponentami jsou buňky. Stav těchto buněk se počítá pro každý následující krok (uvažujeme diskrétní časovou množinu) vyhodnocením jistých pravidel, která zohledňují současný stav buňky, a jejího okolí.

2.2 Definice Celulárního automatu

([2], strana 89)

Celulární automat je systém složený z těchto komponent:

- Pole buněk: obecně n -rozměrné
- Konečná množina S stavů buňky
- Okolí N : definuje počet a pozici sousedních buněk, se kterými daná buňka pracuje (vstup pro pravidla)
- Pravidla: popisují chování buňky – jedná se o funkci stavu buňky a jejího okolí, definující nový stav buňky v čase:

$$s(t + 1) = f(s(t), N_s(t))$$

kde $s \in S$ a N_s je stav všech buněk v okolí.

2.3 Postup vytvoření modelu

V uvedeném článku[3] je pro simulaci modelu použit program, jehož název není uveden. Pravděpodobně se jedná o nějaký druh specializovaného software pro simulaci celulárních automatů. Naším úkolem však bylo model implementovat pomocí jazyka C, nebo C++. Náš model celulárního automatu byl vytvořen v jazyce C z důvodu dobré znalosti tohoto programovacího jazyka. Druhá možnost, implementovat model v jazyce C++, byla zavrhnuta, jelikož objektový přístup není v tomto projektu případně vyloženě žádoucí a docházelo by ke zbytečnému zdržování implementace studiem neznámého programovacího jazyka.

2.4 Původ použitých metod a technologií

Informace nezbytné pro pochopení fungování celulárních automatů byly získány ze studijní opory předmětu IMS([2], strany 88–92), a dále pak z prezentací náležících tomuto předmětu([1], strany 316–332). Samotný model, který v naší práci implementujeme a provádíme s ním experimenty, je vytvořen podle článku „A Cellular Automata Model for Population Dynamics Simulation of Two Plant Species with Different Life Strategies“[3].

2.5 Zvolené rostliny popsané celulárním automatem

Jak již bylo naznačeno v úvodu, tato práce se věnuje popisu modelů celulárních automatů dvou rostlinných druhů, které jsou zvoleny tak, aby reprezentovaly dvě zcela odlišné životní strategie. Obecně můžeme rostliny zařadit do dvou hlavních kategorií. První kategorie jsou rostliny s dlouhým životním cyklem, ale mají nízkou hustotu populace a nízkou schopnost reprodukce. Druhá kategorie pak obsahuje rostliny s krátkým životním cyklem, ale zato vysokou schopností reprodukce a vysokou hustotu populace. Z každé této kategorie tedy vybereme reprezentativního zástupce. Pro první kategorii to je *C. Smyrnioides*, pro druhou kategorii *A. Sylvestris*. Zatímco první zmíněná rostlina je v současnosti ohroženým druhem, jejíž populace se neustále snižuje, druhá rostlina – *A. Sylvestris* je velmi rozšířená[3].

2.6 Pravidla modelu

- Model je dvourozměrný, můžeme si jej tedy představit jako mřížku. Pro účely simulace použijeme mřížku velikosti 500×500 cm.
- Dále uvažujeme, že různé rostliny se nemohou navzájem překrývat, tedy nemohou být dvě v jednom políčku.
- Jeden krok simulace reprezentuje 1 rok reálného systému, který modelujeme.
- Počáteční věk každé nově vzniklé rostliny je 1 rok.
- Všichni jedinci mají v průběhu běhu simulace náhodně generovanou úmrtnost. Tím se simuluje nepředvídatelné zničení rostliny vlivem vnějších zásahů (člověk, zvíře) nebo obecně nepříznivých podmínek pro život daného jedince. Jinak jedinec umírá po stanovené době, viz tabulka 1.
- Je možné inicializovat model s políčky, která nebudou obyvatelná. Jedna možnost je náhodné rozmístění nějakého počtu (případně procenta ze simulované plochy), druhou možností je ruční nastavení neobyvatelných ploch, nebo koridorů.

Tabulka 1 zobrazuje další pravidla, která se liší pro každou rostlinu. Je vhodné si všimnout parametrů *Reprodukční četnost* a *Interval reprodukce*, které výstižně demonstrují odlišné životní strategie těchto dvou rostlin. Neméně podstatným parametrem je také *Pravděpodobnost úmrtí semene*, která se pro tyto dva zástupce značně liší a má také zásadní vliv na schopnost reprodukce.

Z parametrů, které si zaslouží detailnější vysvětlení, zmíníme *Reprodukční četnost*, a *Interval reprodukce* a *Směr šíření semen*. Ostatní parametry jsou dostatečně vysvětleny svým popisem v tabulce 1. *Reprodukční četnost* říká, kolik nových potomků vznikne průměrně za život jedince. *Interval reprodukce* je doba, po kterou je jedinec schopen reprodukce. V případě *A. Sylvestris* tato doba začíná třetím rokem života a končí čtvrtým rokem života, v jehož průběhu rostlina umírá. Z toho vyplývá, že jedinec rodu *A. Sylvestris* je schopen reprodukce pouze přibližně 2 roky života, zatímco jedinec *C. Smyrnioides* přibližně 13 let, jelikož je schopen reprodukce od 2. roku do 15. roku života. Důležité však je, že schopnost reprodukce se v různých letech života rostliny mění. Pravděpodobnost reprodukce v daném roce života rostliny je popsána v tabulce 2 a 3. Směr šíření semen je pro oba druhy rostlin podobný. V případě *A. Sylvestris* se semena šíří náhodně všemi směry v kruhovém okolí od mateřské

rostliny, zatímco pro *C. Smyrnioides* platí, že semínka šíří od rodiče rostliny vždy jedním směrem, obecně však také v kruhu, v jehož centru je rodič. Pro každého jedince *C. Smyrnioides* je tedy směr šíření jiný (v kruhu), avšak v průběhu života se nemění.

Parametr	<i>C. Smyrnioides</i>	<i>A. Sylvestris</i>
Reprodukční četnost	0,132–1,32	6,15–10,75
Interval reprodukce	2.–15. rok života	2.–4. rok života
Délka života	50 let	3 roky
Vzdálenost semínka od rodiče	0,6–1,5 m	0–1 m
Směr šíření semen	Kruhový v jednom směru	Kruhový náhodný
Vzdálenost od rodiče, ve které nemůže zakořenit nové semeno	Kruh o průměru 5 cm od rodiče	Kruh o průměru 0 cm od rodiče
Pravděpodobnost úmrtí semene (nezakořenění)	0,85	0,15

Tabulka 1

Období	Pravděpodobnost reprodukce
1.–2. rok	0
2.–3. rok	0,15
3.–15. rok	0,95
16. rok–smrt	0

Tabulka 2 – C. Smyrnioides

Období	Pravděpodobnost reprodukce
1.–2. rok	0
2.–3. rok	0,9
3.–4. rok	0,5
4. rok–smrt	0

Tabulka 3 – A. Sylvestris

V tomto okamžiku považuji za vhodné okomentovat některé hodnoty v tabulkách, aby nedošlo k nedorozumění. Na první pohled není příliš pochopitelné, proč se v tabulce 3 zabýváme 4. rokem života *A. Sylvestris*, když v tabulce 1 uvádíme délku života této rostliny jako 3 roky. Tento zdánlivý rozpor je však korektní, jelikož uvažujeme, že rostlina umře během svého 4. roku života, tedy někdy před dovršením 4 let, nikoli v den dovršení 3 let.

3 Koncepce

V našem modelu zanedbáváme modelování políček, která nemohou být okupována jednou nebo druhou rostlinou kvůli nepříznivým podmínkám pro zakořenění dané rostliny. V praxi by v modelu vznikala náhodně (případně podle nějakého pravidla) generovaná prázdná místa, kde by nerostla žádná rostlina. V realitě tento parametr reflektuje například skály nebo jakékoli vodní plochy, na kterých nemůže dojít k zakořenění a růstu jedince zvolených rostlinných druhů. V tomto ohledu je tedy náš model jistým způsobem zidealizován.

Dále zanedbáváme růst rostliny, tedy její možné rozšiřování do okolních políček. V článku[3] není tento fakt nijak formálně ani neformálně popsán, nemáme tedy v tomto případě z čeho vycházet. Předpokládáme tedy, že jedna rostlina okupuje právě jedno políčko po celou dobu svého života. Po skončení života rostliny je políčko znovu volné a může být okupováno jinou rostlinou.

3.1 Formy konceptuálního modelu

Forma modelu je popsána v kapitole 2 – “Rozbor tématu a použitých metod/technologií”.

4 Architektura simulačního modelu

Základem programu jsou dvě struktury, `struct Cell` a `struct Model`, kde struktura `Cell`, reprezentuje jednu buňku celulárního automatu a má atributy `int type`, pro určení o jakou rostlinu se jedná, `int age`, pro věk rostliny a `int direction` pro směr šíření semen rostliny. Ostatní parametry modelu jsou zadávány buď jako argument příkazové řádky (míra reprodukce) nebo jako pevné hodnoty, protože jsou neměnné a není potřeba je uchovávat ve struktuře a zvyšovat tím paměťovou náročnost programu.

Struktura `Model` má pouze jeden atribut a to dvourozměrné pole buněk (`struct Cell`).

Vlastní simulace probíhá v několika krocích. Po inicializaci modelu, která se provádí načtením ze souboru, který je zadán jako první argument se podle typu rostliny pustí simulace v cyklu o 60 nebo 100 iteracích. Jako první se v cyklu volá funkce `growing()`, která projde celý model a zvýší věk všech rostlin o jeden rok. Poté funkce `plantsDie()` zjistí zda se některá z rostlin nedožila maximálního věku a v případě, že ano, pak rostlina umírá. Jako poslední funkce v cyklu se volá `reproduceAS()`, respektive `reproduceCS()`. Tyto funkce zajistí reprodukci a vysemenění nových rostlin.

S mírou reprodukce (R) se v modelu pracuje, tak že se počet jedinců při inicializaci vynásobí mírou reprodukce. Tím se získá počet nových rostlin, které mají vzniknout z této generace, aby byla dosažena průměrná míra reprodukce. Dále se za každou rostlinu, jejíž semínko se zakořenilo odečítá od této hodnoty 1 a přičítá se k ní opět míra reprodukce. Pokud by měla při zakořenění rostliny tato hodnota klesnout pod 0 (respektive -1), tato rostlina nevyroste, protože by došlo k překročení míry reprodukce pro danou populaci.

Součástí projektu je program `Makefile`, který umožňuje provedení těchto příkazů:

- `make all` – přeloží projekt
- `make clean` – odstraní binární soubory
- `make run` – spustí provádění simulace modelu

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Experimentováním je myšleno provádění pokusů s daným modelem, za účelem zjišťování nových poznatků o simulovaném systému. Děje se tak prostřednictvím změn parametrů a počátečních podmínek. V rámci této dokumentace bude popsán experiment, který opakuje experiment z uvedeného článku[3]. Naším cílem je tedy pomocí experimentování s modelem nejenom zjistit požadované informace o zkoumaném systému, ale současně ověřit, že náš model odpovídá modelu systému z článku [3]. Případné odchylky ve výsledcích budou komentovány.

5.1 Postup experimentování

S naším modelem budeme experiment za účelem zjištění citlivosti populace rostliny na změnu parametru reprodukční četnosti. Budeme tedy zjišťovat mezní hranice reprodukční četnosti pro vyhynutí rostliny v nastaveném časovém horizontu, dále mírné snižování, a nakonec mezní hodnotu pro růst populace.

5.2 Citlivost populace na změnu reprodukční četnosti

Simulační čas pro *A. Sylvestris* byl nastaven na 60 let (20 generací), a pro *C. Smyrnioides* 100 let (20 generací), přičemž experiment probíhal odděleně pro každou rostlinu. Výsledné hodnoty vepíšeme do tabulky pro každou rostlinu zvlášť. Hodnotou v tomto smyslu myslíme výsledný počet jedinců na konci experimentu, tedy po vypršení simulačního času. Ve výsledných datech pak zkoumáme mezní hodnoty *Reprodukční četnosti* pro postupné vymírání populace, její snižování, a postupný růst.

Ostatní parametry zůstávají nezměněné a odpovídají tedy hodnotám v tabulce 1. Inicializační počty jedinců jsou 64 pro *C. Smyrnioides* a 982 pro *A. Sylvestris*.

5.2.1 A. Sylvestris

Reprodukční četnost	Populace po 60 letech
0,1	0
0,5	0
1	0
1,5	0
2	0
2,5	78394
3	78394
3,5	153798
4	190842
4,5	191229
5	221835
5,5	221896
6	224045
6,5	224232
7	232061
7,5	232202
8	237268
8,5	237407
9	240773
9,5	240901
10	243413
10,5	243340
11	245114
11,5	245065
12	246383
12,5	246398
13	247362
13,5	247218
14	247890
14,5	247920

Tabulka 4 – výsledky pro A. Sylvestris

5.2.1 C. Smyrnioides

Reprodukční četnost	Populace po 100 letech
0,05	0
0,1	0
0,15	0
0,20	0
0,25	0
0,30	0
0,35	0
0,40	0
0,45	0
0,50	0
0,55	0
0,60	0
0,65	0
0,70	0
0,75	0
0,80	0
0,85	0
0,90	0
0,95	0
1,0	0
1,05	789
1,1	789
1,15	789
1,20	806
1,25	806
1,30	806
1,35	806
1,40	849
1,45	849
1,5	849

Tabulka 5 – výsledky pro C. Smyrnioides

5.2.3 Shrnutí

R – Reprodukční četnost

	Vyhynutí	Snižování populace	Růst
A. Sylvestris	$R < 2$	/	$R > 2,5$
C. Smyrnioides	$R < 1,0$	/	$R > 1,05$

Tabulka 6 – shrnutí výsledků

5.3 Experimentování – závěr

Experiment s modelem obsahoval celkem 60 různých simulací. Výsledky experimentu přehledně shrnuje tabulka 6, která zobrazuje mezní hodnoty (respektive intervaly) pro vyhynutí, a růst populace v horizontu 60 let pro A. Sylvestris a 100 let pro C. Smyrnioides.

Hodnoty získané ze simulace však zcela neodpovídají výsledkům z původního modelu z článku[3]. Z naměřených hodnot je možné pozorovat jednoznačný růst populace při zvýšení

reprodukční četnosti na 1,05 pro *C. Smyrnioides*, a 2,5 u *A. Sylvestris*. Postupné snižování populace z naměřených výsledků rozpoznat nelze, můžeme pouze pozorovat úplné vyhynutí populace, při hodnotě reprodukční četnosti menší než výše.

Očekávané výsledky byly:

C. Smyrnioides

$R < 0,46$ – vyhynutí populace po 100 letech

$0,46 < R < 0,62$ – postupné snižování populace

$R > 0,62$ – růst populace po 100 letech

A. Sylvestris

$R < 0,75$ – vyhynutí populace po 60 letech

$0,75 < 1,35$ – postupné snižování populace

$R > 1,35$ – růst populace po 60 letech

Výsledky našich experimentů tedy zcela nekorespondují s předpokládanými výsledky, uvedenými v článku[3], nicméně z naměřených hodnot lze dobře pozorovat rostoucí tendenci populace v závislosti na zvyšující se reprodukční schopnosti. Nepřesné výsledky jsou pravděpodobně způsobeny špatnou interpretací reprodukční četnosti.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Vývoj populace rostlin je v reálném světě velmi komplexní problém. Není tedy fakticky možné jej zcela přesně nasimulovat, jelikož ani věda nedokáže přesně vysvětlit, jaké všechny faktory mohou mít vliv na vývoj populace daných rostlin. Náš model však implementuje ty nejdůležitější, které mají zásadní vliv. Provedené experimenty však zcela nekorespondují se závěry publikovanými v článku[3], z důvodů uvedených v kapitole 5.3. Model by bylo možné využít pro simulaci vývoje populace téměř jakéhokoli rostlinného druhu, jestliže bychom o něm znali všechny potřebné informace pro nastavení parametrů pro běh simulace.