

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta informačních technologií

Aplikace celulárních automatů v biologii

Projekt k predmetu IMS 2015

Marek Beňo (xbenom01)
Studená Zuzana (xstude22)

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Zdroje	2
1.2	Overovanie validity	2
2	Rozbor témy a použitých metód/technológií	3
2.1	Šírenie machov	3
2.2	Šírenie lišajníkov	3
2.3	Šírenie vzduchom	3
2.4	Odlupovanie machu vlastnou váhou	4
2.5	Použité postupy a technológie	4
3	Koncepcia modelu	5
3.1	Základné princípy modelu	5
4	Architektúra	6
4.1	Štruktúra	6
5	Podstata a priebeh simulačných experimentov	7
5.1	Postup experimentovania	7
5.2	Dokumentácia experimentov	7
5.2.1	Experiment č.1	7
5.2.2	Experiment č.2	8
5.3	Záver experimentov	9
6	Záver	10
7	Použitá literatúra	11
8	Prílohy	12

1 Úvod

Táto práca popisuje návrh a implementáciu celulárneho automatu v projekte ku predmetu IMS, ktorý modeluje proces rastu machov a lišajníkov na skalnej ploche. Implementácia je založená na modeli z vedeckej publikácie [10] za účelom overenia tohto modelu a porovnania výsledkov experimentov.

Štúdia rastu machov a lišajníkov je dôležitá k pochopenia základných prírodných javov a spojitostí. Zmyslom modelu je ukázať interakciu týchto druhov v danom priestore a spôsob ich šírenia v daných podmienkach.

Zostavenie takéhoto modelu je náročné najmä kvôli veľkému množstvu faktorov, ktoré ovplyvňujú prírodné procesy a teda potrebnému procesu štúdie týchto javov. Z dôvodu čo najvierohodnejších výsledkov sa zakladá na modeli vzorového článku a abstrahuje sa od ostatných vplyvov.

Celulárne automaty (CA) [1] [6] [12] nachádzajú aplikáciu v biológii [8], keďže aj napriek množstvu štúdií existuje množstvo dostatočne neprebádaných procesov.

Výhoda simulácie celulárnym automatom spočíva v značnej redukcii času potrebného pre pozorovanie požadovaných javov a možnosti experimentácie na základe daného užívateľského vstupu.

CA modeluje [13] skalnú plochu ako dvoj-dimenzionálne pole identických buniek a konečnú množinu pravidiel určujúcich nasledujúci stav. Nasledujúci stav (volná bunka/mach/lišajník) sa zakladá na pravidlách určujúcich rast bunike v Moorovom okolí [2] z predošlého stavu.

1.1 Zdroje

Táto dokumentácia a súvisiaca implementácia sú výsledkom spolupráce autorov: Marek Beňo a Zuzana Studená.

Pri vypracovaní práce boli využité zdroje uvedené v sekcii „Použitá Literatúra“ získaných z online databáz.[10][9]

Počas štúdie problematiky pomohol k lepšiemu pochopeniu závislosti rastu machov na rôznych podmienkach pán Harald G Zechmeister zaslaním výsledkov svojej štúdie[15] pre účely tejto práce.

1.2 Overovanie validity

Validácia modelu [13] spočíva z kolerácie výsledkov experimentov a výsledkov podľa originálneho zdroja. Pomocou špecifických hodnôt uvedených v článku[10] je možno sledovať priebeh a výsledky experimentu, ktoré sú dostatočné minimálne na čiastočné prehlásenie validity modelu.

2 Rozbor témy a použitých metód/technológií

Téma zaoberajúca sa šírením machov a lišajníkov predpokladá základné stavy reprezentujúce prázdne - „neobývané“ polia, čo je počiatočný stav. Pre reprezentáciu rastlín a húb sa udržiava stavová informácia v bunke.

Pravidlá pre určenie nasledujúceho stavu predstavujú pravidlá pre rast a šírenie rastlín a húb stavovým priestorom. Zakladajú sa na stavoch ôsmich okolitých buniek a ich pomere. Kvôli overeniu validity sú pravidlá zachované z originálneho článku.

2.1 Šírenie machov

Šírenie buniek rastom sa zakladá na vzorci, ktorý určuje pravdepodobnosť $P_{moss}(t+1)$, že v nasledujúcom vzťahu dôjde k rozšíreniu bunky.

$$P_{moss}(t+1) = MIN[1.0, C * f_t] \quad (1)$$

Hodnota C vo vzorci predstavuje konštantu rastu machu a v tomto modeli platí: $C = 2$. Táto hodnota je prebraná z originálneho článku.

Hodnota f_t vo vzorci predstavuje pomer „infikovaných“ buniek k celkovému počtu susedných buniek. Vo vzorci sa ráta s Moorovým okolím a teda počet okolitých buniek je 8. Tento vzťah možno vyjadriť ako:

$$f_t = \frac{n_{infected}}{8} \quad (2)$$

Vďaka tomuto vzťahu sa modeluje skutočnosť, že bunka machu môže vzniknúť len na voľnej bunke a v prípade prerastenia bunky machu lišajníkom tento mach sa nemôže ďalej šíriť keďže zmení svoj stav na lišajník a nemá ďalší vplyv na rast machov.

Počiatočný stav machov určuje konštanta n_{moss} a ďalšie šírenie machov je závislé výlučne na vzťahu 1 a P_{moss} v prípade šírenia vzduchom.

2.2 Šírenie lišajníkov

Šírenie lišajníkov rastom sa riadi podľa vzťahu 1 vynásobeného konštantou rýchlosti rastu lišajníkov R_{lichen} . V modeli sa predpokladá východzia hodnota konštanty 1.

Lišajníky sa šíria parazitne bunkami machu, nemôžu vzniknúť na prázdnej bunke a zabráňujú ďalšiemu rastu machu.

Parametrizácia modelu umožňuje zvoliť počet časových krokov t_{lichen} , ktorý musí uplynúť a počiatočný počet buniek lišajníkov n_{lichen} , ktoré sú vytvorené po uplynutí tohto časového obdobia. Je teda možné rast lišajníkov kompletne vylúčiť počas simulácie, poprípade špecifikovať čas vzniku a ich množstvo.

2.3 Šírenie vzduchom

Machy aj lišajníky sa môžu šíriť pohlavne - teda rastom podľa vzťahu 1, no zároveň sa môžu šíriť vzduchom - šírením spór do okolia. Tento jav je modelovaný rovnomernou pravdepodobnosťou pri každom časovom kroku.

Predtým ako je možné na voľnej bunke započítať rast pri šírení vzduchom je potreba aby sa na tomto mieste predtým rozšírili iné druhy umožňujúce rast.

Tento jav je simulovaný konštantou t_{vacant} , ktorá určuje počet krokov, ktoré musia uplynúť predtým ako je možné túto bunku osídlit vzduchom. Pri pohlavnom raste táto konštanta nemá žiadny vplyv.

2.4 Odlupovanie machu vlastnou váhou

Pri raste machu na skalnom povrchu sa simuluje rast v 2D, avšak v modeli sa pridáva v každom časovom kroku ku každej bunke jednotka váhy. V prípade, že bunka nadobudne váhu vyššiu ako minimum pre započatie odlupovania existuje možnosť, že sa stane ohniskom prepadnutia. Pravdepodobnosť tohto javu je určená nasledovne:

$$P_{slump} = (C_{slump} * m) \quad (3)$$

Pre pravdepodobnosť odlupovania pri východných hodnotách platí: $m \in [5, 10]$ a $C_{slump} = 0.01$, teda pravdepodobnosť v akomkoľvek okamžiku patrí intervalu: $P_{slump} \in [0, 0.1]$.

Po vzniku ohniska prepadu sa tento prepád šíri bunkami machu podľa vzťahu 1 až dokým nedosiahne maximálnu plochu prepadu. Bunky lišajníkov bránia rastu machov avšak neobmedzujú rast prepadu. Po dosiahnutí maximálnej plochy sa celá plocha prepadu stane voľnou a všetky bunky sú znova inicializované.

2.5 Použité postupy a technológie

Ako implementačný jazyk bol zvolený jazyk C++, kvôli rozšíreným možnostiam objektovo orientovaného prístupu abstrahovať reálne objekty. Oproti jazyku C má tento jazyk modernejší prístup k ukladaniu objektov vo vektoroch, reťazcoch a manipulácií s dátami.

Okrem štandardných knižníc bola využitá open source knižnica EasyBMP [11] pre jednoduché vytváranie bitmapových súborov reprezentujúcich stavový priestor automatu a knižnica pugixml [3] pre parametrizácia vstupu zo súboru vo forme XML.

3 Koncepcia modelu

Na rast machov a lišajníkov má vplyv mnoho rôznych faktorov ako teplota, vlhkosť [4] [5], nadmorská výška, slnečný svit, množstvo kovov v okolí alebo vplyv živočíchov [14]. Tieto aspekty značne ovplyvňujú hlavne rýchlosť rastu a pohlavného či nepohlavného rozmnožovania. Povrch hrá dôležitú úlohu hlavne pri nepohlavnom rozmnožovaní, kedy sa semená machu prenášajú prostredníctvom vody a vetru. V zhustených, suchých pôdach[7] alebo na skalách je menšia pravdepodobnosť, reprodukcie prenesených spór. Pri pohlavnom rozmnožovaní tieto faktory ovplyvňujú rýchlosť a tvar rozrastania. Pre zjednodušenie modelu je zvolená abstrakcia na faktory podľa originálneho článku.

Na rast machov a lišajníkov má vplyv mnoho rôznych faktorov ako teplota, vlhkosť, nadmorská výška, slnečný svit a dokonca množstvo kovov v okolí, či populácie bylinožravcov [14]. Pre zjednodušenie modelu je zvolená abstrakcia na faktory podľa originálneho článku.

Oproti vzorovému článku došlo ku pozmeneniu tohoto vzorca nahradením pôvodnej funkcie MAX funkciou MIN. V prípade úvahy, že vzťah 1 určuje pravdepodobnosť a druhý parameter funkcie $C * f_t$ nadobúda hodnoty x , kde: $x \in [0, 2]$ by dochádzalo ku hodnote pravdepodobnosti väčšej ako 1. Táto zmena bola braná na úvahu pri vyhodnocovaní modelu a jeho testovaní.

Kvôli implementácii stavu modelu konečným polom buniek dochádza k stavu kedy šírenie machov a lišajníkov narazí na okraj stavového pola. Tento fakt nevedie ku konfliktom s reálnym modelom, pretože modeluje stav, kedy expanzia narazí na koniec skalnej steny. V modeli v tomto prípade dochádza k vyhodnoteniu okolitých buniek ako neexistujúcich a vo vzorci 2 sa predpokladá východzia hodnota bunky ako neinfikovaná.

3.1 Základné princípy modelu

Základnou funkciou modelu je algoritmus *Run*, ktorý na základe predošlého a aktuálneho stavu vykonáva zmenu stavového priestoru. Využíva sa jednoduchý cyklus, ktorý počas behu programu prevádza oneskorenú generáciu populácie lišajníkov, výpočet nasledujúceho stavu podľa daných pravidiel, zmenu stavového priestoru a zároveň zbieranie dát a štatistík.

Algoritmus 1: Run

```
1:   while generation < duration do
2:       if generation == tLichen then
3:           GenerateLichen()
4:       end if
5:       Update();
6:       GetStats();
7:       increment generation
8:       previous state = actual state
9:   end while
10:  SaveToBitmap();
```

V priebehu jedného behu cyklu je potrebné aktualizovať všetky hodnoty všetkých buniek a stao-
vové informácie automatu. Generácia nových buniek prebieha na základe pravidiel, zatiaľ, čo kontrola
parametrov automatu je implementovaná vo vnútornej logike automatu.

4 Architektúra

Model sa zakladá na množstve veličín potrebných pre jeho parametrizáciu.

4.1 Štruktúra

Abstraktný objekt *Automaton* reprezentuje základ pre akúkoľvek prácu s modelom. Zaobahuje vstupné premenné, uchováva stavy buniek v objektoch, štatistiky a poskytuje logiku zabezpečujúcu beh automatu.

Stavový priestor automatu pozostáva z dvoch stavových polí reprezentovaných objektom *State* o veľkosti *dimension*. Aktuálny stav *actual_state* a predošlý stav *previous_state*. Tieto polia zaobahujú informácie o všetkých bunkách. Na počiatku je nastavenie aktuálneho stavu na východzie hodnoty buniek a vygenerovanie predošlého stavu podľa vstupných parametrov.

Výpočet nasledujúceho stavu prebieha vo funkcii *Update*.

Algorithmus 2: Update

```
1:   for cells in previous state do
2:       if generation == tLichen then
3:           GenerateLichen()
4:       end if
5:       Update();
6:       GetStats();
7:       increment generation
8:       previous state = actual state
9:   end for
```

Objekt *Cell* reprezentuje konkrétnu bunku modelu uchovávajúcu všetky potrebné informácie pre generáciu nasledujúcich stavov.

- status stavový indikátor voľnej bunky, machu alebo lišajníku
- slump_id ID odpadávajúceho zhluku
- weight váha bunky využívaná vo vzťahu 3
- time_vacant počet časových krokov odkedy je bunka prázdna
- isSlump indikátor odpadávajúceho zhluku

5 Podstata a priebeh simulačných experimentov

Cieľom experimentov je overiť či sa v daných prípadoch model správa podľa očakávaní. Experimenty zakladajú na vzorovom článku a majú za cieľ vyvolať identické podmienky, kedy je možno porovnať správanie obidvoch modelov.

Výsledky experimentov sú štatistický pomer populácií machov a lišajníkov voči veľkosti prostredia a obrázok reprezentujúci finálny stav automatu. Obrázok reprezentuje vnútorné stavy buniek *status*. Stavy sú reprezentované nasledovne:

- biela - prázdna bunka
- šedá - bunka machu
- čierna - bunka lišajníku

5.1 Postup experimentovania

Samotný experiment pozostáva z vytvorenia konfiguračného súboru *.xml, ktorý dodáva vstupné parametre programu. Spustenie simulačného modelu pozostáva z načítania vstupných parametrov z konfiguračného súboru, vytvorenia automatu, behu automatu, zastavenia automatu a zobrazenia výsledkov a štatistik.

Predvolený experiment možno spustiť príkazom `make run`.

5.2 Dokumentácia experimentov

5.2.1 Experiment č.1

Experiment je zameraný na rast a šírenie machu do jeho okolia. Počiatočné hodnoty sú nastavené nasledovne:

Rozmery stavového priestoru	<i>dimension</i>	100
Počiatočná populácia machu	<i>n_{moss}</i>	15
Počiatočná populácia lišajníkov	<i>n_{lichen}</i>	0
Simulačná perióda	<i>t_{total}</i>	15
Oneskorenie generácie lišajníkov	<i>t_{lichen}</i>	0
Pomer rastu lišajníkov ku machu	<i>R_{lichen}</i>	0.0
Pravdepodobnosť šírenia machu	<i>P_{moss}</i>	0.001
Pravdepodobnosť šírenia lišajníkov	<i>P_{lichen}</i>	0.0
Počet časových krokov pred šírením	<i>t_{vacant}</i>	2

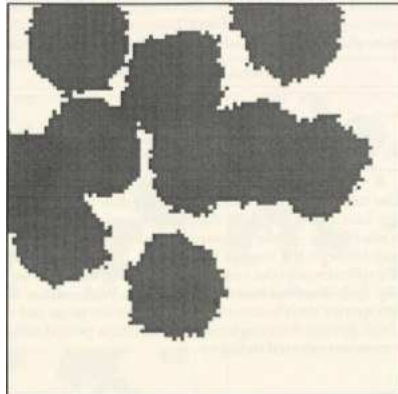
Tabulka 1: Hodnoty experimentu č.1

Neuvedené hodnoty sú nastavené explicitne podľa tabuľky 2.

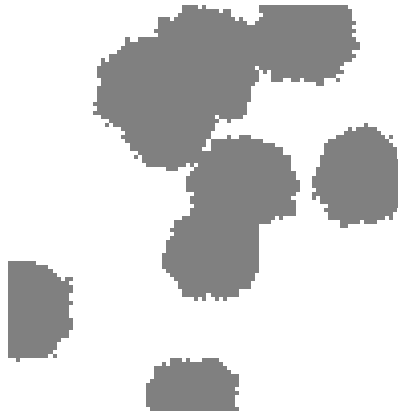
Cieľom experimentu je zistiť schopnosť šírenia machu prostredníctvom pohlavného rozmnožovania (simulácia rastu machu do jeho okolia) a nepohlavného rozmnožovania pod vplyvom vonkajších javov (vietor, voda). Simulácia rastu do okolia je implementovaná podľa vzorca 1. Simulácia šírenia prostredníctvom vonkajších javov je hodnota konštanty P_{moss} z tabuľky 1.

Experiment by mal potvrdiť simuláciu šírenia popísanú v článku [10]. Výsledok simulácia prevedenej v článku je zobrazený na obrázku 1

Opakovaný experiment je prevedený prostredníctvom vytvoreného programu "CA". Výsledok simulácie je zobrazený na obrázku 2.



Obrázek 1: Výsledok simulácie zo vzorového článku



Obrázek 2: Výsledok simulácie pomocou programu CA

Porovnaním oboch obrázkov môžeme potvrdiť vlastnosti rozrastania machu do okolia. Experiment ukazuje, že machy sa rozrastajú približne v pravidelných kruhových útvaroch. Po rozrastení sa niektoré machy spoja čím vytvoria väčší súvislý porast. Výsledok experimentu ukazuje, že výsledný machový porast je výrazne závislý na počiatočne vygenerovaných stavoch.

Experiment potvrdil chovanie rastu machu zo vzorového článku. A teda môžeme konštatovať, že model bol navrhnutý správne.

V ďalšom experimente je možné zohľadniť spájanie machových porastov a vplyv na ich veľkosť a váhu, ktorá môže spôsobovať vyhynutie jedného alebo viacerých porastov.

5.2.2 Experiment č.2

Experiment zameraný na interakciu machov a lišajníkov v prostredí, kde dochádza k odlupovaniu vplyvom hmotnosti. Všetky parametre behy sú nastavené ako východzie hodnoty.

Na obrázku možno vidieť skupiny machov a lišajníkov, ktoré pri zadanom parametri $area_{max}$ formujú množstvo malých skupín, čo je očakávaný výsledok.



Obrázek 3: Výsledok experimentu 2 pomocou programu CA



Obrázek 4: Výsledok experimentu 3 pomocou programu CA

Výsledok simulácie sa približuje výsledku z originálneho článku pri zadaní parametru $area_{max}$ na hodnotu 100, no v prípade zadania vyššej hodnoty alebo v prípade dostatočného počtu opakovaní možno vidieť chybné odpadávanie vrstiev machov a lišajníkov čo má za vplyv generáciu veľkého množstva buniek do stavového priestoru a ich nedostatočný úbytok.

5.3 Záver experimentov

Experimenty potvrdili korektné správanie modelu v prípade rastu machov a lišajníkov a simuláciu tvorby plochy odpadávanie. Simulácia odpadávania má však značné nedostatky v rozlišovaní veľkosti plochy a tým pádom má za následok nesprávne odpadávanie buniek - teda nesprávne premazávanie stavového priestoru.

6 Záver

Výsledky experimentov preukazujú použitie modelu na simuláciu rastu machov a lišajníkov, s možným využitím v zahradkárstve [4] , čo je typicky opačné využitie, teda prevencia šírenia machov a lišajníkov.

V prípade rozšírenia tohto o ďalšie faktory ako dáta o slnečnom svite, vlhkosti a ostatné faktory podľa štúdie je možno poskytnúť model schopný korektne simulovať rýchlosť a tvar rastu machov a lišajníkov.

Z výsledkov experimentov vyplýva že v prípade zanedbania faktoru odpadávania je možné dokázať validitu modelu. V prípade začlenenia tohto faktoru má model nepredvídané správanie.

7 Použitá literatura

Reference

- [1] *Cellular Automaton* [online]. 12/2015 [cit. 2015-12-7]. Dostupné na: <<http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>>.
- [2] *Moore Neighborhood* [online]. 12/2015 [cit. 2015-12-7]. Dostupné na: <<http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>>.
- [3] *PugiXML*. Dostupné na: <<http://bryophytes.science.oregonstate.edu/page3.htm>>.
- [4] *How-To Grow Moss* [online]. 2015 [cit. 2015-12-8]. Dostupné na: <<http://www.mossandstonegardens.com/blog/how-to-grow-moss/>>.
- [5] *The truth about moss – dispelling moss myths* [online]. 2015 [cit. 2015-12-8]. Dostupné na: <<http://www.mossandstonegardens.com/blog/the-truth-about-moss-dispelling-moss-myths/>>.
- [6] BERTO, F. a TOGLIABUE, J. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [online]. 03/2012 [cit. 2015-12-7]. Dostupné na: <<http://plato.stanford.edu/entries/cellular-automata/#2.1>>.
- [7] DELLA, K. *Why Does Moss Grow In Areas Of My Lawn And Not My Grass?* [online]. červenec 2012 [cit. 2015-12-8]. Dostupné na: <<https://sampson.ces.ncsu.edu/2012/07/why-does-moss-grow-in-areas-of-my-lawn-and-not-my-grass-2/>>.
- [8] ERMENTROUT, B. G. a EDELSTEIN KESHET, L. *Cellular Automata Approaches to Biological Modeling*. In *Biologically motivated cellular automata*. Pittsburgh, U.S.A: University of Pittsburgh, 1992. Dostupné na: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s0030000000170>>.
- [9] KRISTEN, W. *Basic Moss Biology* [online]. 2000 [cit. 2015-12-8]. Dostupné na: <<http://bryophytes.science.oregonstate.edu/page3.htm>>.
- [10] MICHAEL, B. Simple models of pattern and process. *Proceedings of The Linnean Society of New South Wales* [online]. 1995, č. 115 [cit. 2015-12-7]. Dostupné na: <<http://www.biodiversitylibrary.org/page/34937791#page/21/mode/1up>>.
- [11] PAUL, M. *Easy BMP*. Dostupné na: <<http://bryophytes.science.oregonstate.edu/page3.htm>>.
- [12] PERINGER, P. *Modelování a simulace* [online]. 09/2015 [cit. 2015-12-7]. Dostupné na: <<https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/course-files-st.php/course/IMS-IT/lectures/IMS.pdf?cid=10316>>.
- [13] PERINGER, P. *Modelování a simulace IMS: Studijní opora*. Prosinec 2012. 2, s. 6–15. Dostupné na: <<https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/course-files-st.php/course/IMS-IT/texts/opora-ims.pdf?cid=10316>>.
- [14] WAL, R., LIESHOUT, S. M. J. a LOONEN, M. J. J. E. Herbivore impact on moss depth, soil temperature and arctic plant growth. *Polar Biology* [online]. 2001, č. 24 [cit. 2015-12-7]. S. 23–32. Dostupné na: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s0030000000170>>. ISSN 1432-2056.
- [15] ZECHMEISTER, H. G. Growth rates of five pleurocarpous moss species under various climatic conditions. *Journal of Bryology*. 1995. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/272226831_Growth_rates_of_five_pleurocarpous_moss_species_under_various_climatic_conditions>.

8 Prílohy

Rozmery stavového priestoru	<i>dimension</i>	100
Počiatočná populácia machu	<i>n_moss</i>	100
Počiatočná populácia lišajníkov	<i>n_lichen</i>	100
Simulačná perióda	<i>t_total</i>	200
Oneskorenie generácie lišajníkov	<i>t_lichen</i>	4
Pomer rastu lišajníkov ku machu	<i>R_lichen</i>	1.0
Pravdepodobnosť šírenia machu	<i>P_moss</i>	0.001
Pravdepodobnosť šírenia lišajníkov	<i>P_lichen</i>	0.001
Maximálna váha machu	<i>m_max</i>	10
Minimálna váha pre opadávanie	<i>m_min</i>	5
Konštanta opadávania	<i>C_slump</i>	0.01
Maximálna plocha zosuvu	<i>area_max</i>	100
Počet časových krokov pred šírením	<i>t_vacant</i>	2
Pravdepodobnosť zosuvu	<i>P_slump</i>	1.0

Tabulka 2: Východzie hodnoty