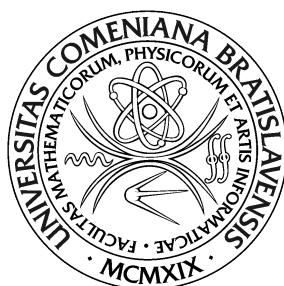


UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



INTERAKTÍVNE SOFTVÉROVÉ
LABORATÓRIUM NA SKÚMANIE
L-SYSTÉMOV PRE ŽIAKOV
STREDNEJ ŠKOLY

Diplomová práca

Bratislava, 2021

Bc. Norbert Jurík

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



INTERAKTÍVNE SOFTVÉROVÉ
LABORATÓRIUM NA SKÚMANIE
L-SYSTÉMOV PRE ŽIAKOV
STREDNEJ ŠKOLY

Diplomová práca

Študijný program: Aplikovaná informatika
Študijný odbor: Informatika
Školiace pracovisko: Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky
Školiteľ: prof. RNDr. Ivan Kalaš, PhD.

Bratislava, 2021

Bc. Norbert Jurík



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Norbert Jurík
Študijný program: aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: informatika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Interaktívne softvérové laboratórium na skúmanie L-systémov pre žiakov strednej školy
Interactive software laboratory for exploring L-systems by secondary school students

Anotácia: V rámci diplomovej práce vznikne softvérové laboratórium pre žiakov strednej školy na interaktívne skúmanie rôznych typov Lindenmayerových prepisovacích systémov. Žiaci v ňom budú interaktívnym spôsobom zostavovať jednoduché i zložitejšie deterministické a nedeterministické OL-systémy, ktoré umožňujú atraktívnu vizualizáciu prostredníctvom paradigmy korytnačej geometrie. Diplomová práca sa zameria na (a) interaktívny symbolický interface na vytváranie axiómy a pravidiel prepisovacieho systému s alebo bez vetvenia, (b) interpreter na generovanie odvodení a (c) okamžitú vizualizáciu výsledku odvodenia, s možnosťou parametrizácie pomocou rôznych typov perturbácie. Napriek komplexnosti informatickej teórie v pozadí týchto systémov je ich interpretácia/vizualizácia prostredníctvom korytnačej geometrie prekvapujúco intuitívnou príležitosťou na skúmanie pojmov ako pravidlá, generovanie slov, determinizmus a nedeterminizmus, náhodnosť a pod. práve vďaka atraktívnym výstupom, ktoré dokážu modelovať rôzne druhy rastlín.

Literatúra: P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer: The Algorithmic Beauty of Plants. Springer 2004
A. diSessa, H. Abelson: Turtle Geometry. The MIT Press, 1981
I. Kalaš: nepublikované študijné materiály pre interaktívne modelovanie rastlín pomocou L-systémov

Vedúci: prof. RNDr. Ivan Kalaš, PhD.
Katedra: FMFI.KDMFI - Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky
Vedúci katedry: prof. RNDr. Ivan Kalaš, PhD.
Dátum zadania: 11.12.2020
Dátum schválenia: 12.12.2020
prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.
garant študijného programu

Čestne prehlasujem, že túto diplomovú prácu som
vypracoval samostatne len s použitím uvedenej literatúry
a za pomoci konzultácií u môjho školiteľa.

Bratislava, 2021

.....

Bc. Norbert Jurík

Pod'akovanie

Ďakujem môjmu školiteľovi, prof. RNDr. Ivanovi Kalašovi, PhD., za odborné vedenie, za cenné rady, poskytnuté informácie a čas, ktorý mi venoval počas písania diplomovej práce. Ďakujem za jeho pomoc, ústretovosť a možnosť vykonávať výskum v skúmanej oblasti.

Ďakujem stredoškolskej pedagogičke Mgr. Dominike Békesovej za to, že mi umožnila overiť a otestovať funkčnosť softvérového laboratória v rámci výuky informatiky. Ďakujem jej za pomoc a odborný dohľad pri práci so žiakmi.

Ďalej sa chcem poďakovať žiakom, ktorí sa zúčastnili testovania, za ich čas a prejavenu ochotu spolupodieľať sa na overení funkčnosti laboratória.

Abstrakt

Vzdelávanie je neustále inovované využitím moderných technológií a učebných pomôcok, ktoré sa pre dnešnú generáciu stali takmer nenahraditeľnými. Na školách sa začínajú interaktívne pomôcky a programy využívať čoraz častejšie a ich začlenenie do vzdelávania sa začína stávať normou. Cieľom práce bolo vypracovať softvérové laboratórium pre študentov stredných škôl na interaktívne skúmanie rôznych typov Lindenmayerových systémov (ďalej len L-systémy), ktoré majú zaujímavé vlastnosti a sú chápané aj ako modely rastu rôznych rastlín v prírode. Výsledkom riešenia danej problematiky je laboratórium, ktoré prostredníctvom paradigmy korytnačej geometrie a symbolickej notácie pre vytváranie axióm a pravidiel poskytuje okamžitú vizualizáciu modelov rôznych druhov rastlín. Študenti majú možnosť v laboratóriu interaktívne zostavovať jednoduché i zložitejšie deterministické a nedeterministické L-systémy. Predpokladali sme, že práve grafická reprezentácia slov vygenerovaných gramatikami L-systémov upúta pozornosť študentov a poskytne príležitosť študentom oboznámiť sa s teóriou definovania pravidiel, symbolov a generovania slov.

Kľúčové slová: L-systém, determinizmus, nedeterminizmus, korytnačia geometria, interaktívne laboratórium

Abstract

Education is constantly being innovated using modern technologies and teaching tools, which have become almost irreplaceable for today's generation. Interactive tools and programs are starting to be used more and more in schools, and their integration into education is becoming the norm. The goal of the work was to develop a software laboratory for high school students for interactive research of various types of Lindenmayer systems (hereinafter referred to as L-systems), which have interesting properties and are also understood as models of growth of various plants in nature. The result of solving this problem is a laboratory which, through the paradigm of turtle geometry and symbolic notation for creating axioms and rules, provides immediate visualization of models of different plant species. Students have the opportunity to interactively compile simple and more complex deterministic and non-deterministic L-systems in the laboratory. We assumed that it is the graphical representation of words generated by L-systems grammars that will attract students' attention and provide students with the opportunity to become acquainted with the theory of defining rules, symbols and word generation.

Keywords: L-system, determinism, nondeterminism, turtle geometry, interactive laboratory

Obsah

1	Úvod	1
2	Cieľ práce	4
3	Základy L-Systémov	5
3.1	Vlastnosti L-systémov	6
3.1.1	DOL-Systémy	9
3.1.2	L-systémy s vetvením	12
3.1.3	Stochastické L-systémy	13
3.1.4	Kontextové L-systémy	14
3.1.5	Parametrické L-systémy	16
3.2	Korytnačia interpretácia symbolov	17
3.3	Modelovacie techniky	20
3.3.1	Modelovanie stromov	20
3.3.2	Modelovanie rastlín	21
4	Stav riešenej problematiky	23
4.1	Modelovanie rastlín pomocou L-sysémov	24
4.2	L-systémy v 3D grafike	24
4.3	Fraktály	24
4.4	L-systémy v grafickom dizajne	25

<i>OBSAH</i>	ix
4.5 Zhrnutie	25
5 Návrh laboratória	26
6 Implementácia	31
6.1 Aplikačná logika	32
6.1.1 Triedy	32
6.1.2 Stav	34
6.2 Používateľské rozhranie	35
6.3 Výstupy laboratória	37
7 Overovanie	39
7.1 Príprava	40
7.2 Priebeh	41
7.3 Zhodnotenie	41
8 Záver	49
A Pracovný list	55
B Dotazník	60
C Ukážky študentských prác	63
D Elektronická príloha	65

Kapitola 1

Úvod

Pozornosť matematikov už stáročia priťahuje krása rastlín a ich častí, pre ich nápadné geometrické prvky a opakujúce sa výskyty týchto prvkov, ako sú bilaterálne symetrické listy, rotačná symetria kvetov, či špirálovité usporiadanie šupín v šiškách. Zachytiť krásu rastlín, kvetov, stromov, či iných fraktálov vyskytujúcich sa v prírode bola pre človeka vždy veľká výzva. Vytvoriť systém, ktorý by dokázal modelovať a vykresľovať prírodné útvary, rastliny, stromy, vizualizovať veľké trojrozmerné scény vo foto-realistickej kvalite, zohráva významnú úlohu pri sprostredkovaní informácií v dnešnej dobe, kde je grafika neodmysliteľnou súčasťou každodenného života každého z nás.

Matematickým formalizmom pre simulovanie množenia buniek, či rastu rastlín sú Lindenmayerove systémy, tzv. L-systémy, ktoré vychádzajú zo systému paralelného prepisovania reťazcov podľa určitých pravidiel, kde výsledná postupnosť sa interpretuje graficky a kde jednotlivé symboly majú priradený grafický význam. Oblasť modelovania rastlín pomocou L-systémov je veľmi rozsiahlou kapitolou počítačovej grafiky. Napriek komplexnosti matematickej teórie L-systémov je ich vizualizácia prostredníctvom korytnačej geometrie prekvapujúco intuitívnou príležitosťou na skúmanie pojmov

ako pravidlá, generovanie slov, determinizmus a nedeterminizmus, náhodnosť a pod. práve vďaka atraktívnym výstupom, ktoré dokážu modelovať rôzne druhy rastlín.

Existujú aj iné metódy pre simuláciu rastlín, napríklad Artificial Life, tzv. A-life, kde bežným výpočtovým modelom je genetický algoritmus, ktorý však často uviazne v oblasti primerane dobrého riešenia a je navyše výpočtovo náročný. Najlepšie prepracovanou teóriou v oblasti modelovania rastlín sú naďalej L-systémy.

Priblížiť možnosť modelovania rastlín či už širšej verejnosti alebo vybranej skupine používateľov je výzvou. Vhodným nástrojom sa javí laboratórium, ktoré sa využíva na výskum širokého spektra problémov spadajúcich do oblasti softvérového inžinierstva s orientáciou na pokročilé metódy a softvérové nástroje pre vývoj programových a webových informačných systémov. Vybavené je relatívne pokročilými softvérovými nástrojmi, zodpovedajúcimi požiadavkám riešených projektov.

Laboratórne softvérové riešenia sú vhodnou didaktickou pomôckou pre študentov na rýchlejšie pochopenie problematiky. Sú to bezpečné informačné systémy, ktoré znižujú zaťaženie používateľov na tvorbu vlastného riešenia, či naprogramovania vlastnej aplikácie a tým im ponúkajú viac času na samotné experimenty, pochopenie samotného predmetu skúmania a interpretáciu výsledkov. Vzorové príklady a nadväzné údaje, ktoré si používateľ už vytvoril, možno kedykoľvek jednoducho vyvolať. Pracovné postupy a pokyny, ktoré boli pripravené pre študentov, uľahčuje ich interpretácia a vizualizácia. Laboratórium podporuje zhodu s teoretickými znalosťami L-systémov, a tak si študenti osvoja tie správne poznatky bez zbytočných omylov a chýb. Realizované riešenie formou webovej aplikácie zjednodušuje používanie laboratória a minimalizuje nároky na údržbu.

V nasledujúcej kapitole je definovaný hlavný cieľ práce a k nemu sa viažu čiastkové ciele. Tretia kapitola obsahuje aktuálny stav poznania v oblasti L-systémov. Vysvetľuje základné vlastnosti Lindermayerových systémov, venuje sa ich vizuálnej interpretácii a modelovacím technikám. Štvrtá kapitola popisuje stav riešenej problematiky v iných dostupných prácach, ktoré sa zaoberajú podobnou problematikou. V piatej a šiestej kapitole sa venujeme návrhu a implementácii interaktívneho softvérového laboratória na skúmanie L-systémov pre žiakov stredných škôl. Laboratórium, ktoré je výsledkom tejto práce, bolo otestované študentami Gymnázia na Bílikovej ulici v Bratislave. Príprava, priebeh a zhodnotenie práce s laboratóriom prostredníctvom dotazníkového prieskumu je popísané v siedmej kapitole.

Kapitola 2

Cieľ práce

Cieľom práce je navrhnúť softvérové laboratórium pre žiakov stredných škôl na interaktívne skúmanie rôznych typov Lindenmayerových prepisovacích systémov. Žiaci v ňom budú interaktívnym spôsobom zostavovať jednoduché i zložitejšie deterministické a nedeterministické 0L-systémy, ktoré umožňujú atraktívnu vizualizáciu prostredníctvom paradigmy korytnačej geometrie.

Softvérové laboratórium má za úlohu prezentovať najnovšie teoretické poznatky v oblasti L-systémov a zabezpečiť ich intuitívne zvládnutie študentami strednej školy. Rutinné a bezpečné využitie tohto nástroja umožňuje pretaviť nové príležitosti do praktických a užitočných riešení.

Diplomová práca sa orientuje na vytvorenie aplikácie s interaktívnym symbolickým rozhraním, prostredníctvom ktorého budú žiaci zadávať axiómy a pravidlá prepisovacieho systému a systém im poskytne okamžitú vizualizáciu výsledku odvodenia, s možnosťou parametrizácie pomocou rôznych typov perturbácie.

Kapitola 3

Základy L-Systemov

Kapitola popisuje teoretický úvod k problematike Lindermyerových systémov. Poskytuje matematický pohľad na popísanie prírodných štruktúr a predstavuje možnosti grafického znázornenia L-systémov.

Roku 1968 biológ Aristid Lindenmayer vynášiel a popísal postup plánovaného rastu pomocou mechanizmu, ktorý bol neskôr pomenovaný ako L-systém. Aby opísal Lindenmayer rast živých organizmov, zaviedol pojem systém paralelného prepisovania. Lindenmayerove systémy alebo L-systémy, vzbudili záujem mnohých výskumníkov a teórie L-systémov boli čoskoro značne vyvinuté. L-systémy neboli aplikované na obrázok. Grafická vizualizácia bola rozpracovaná matematikom Alvy Ray Smithom v roku 1984, ktorý L-systémy použil na vytvorenie realisticky vyzerajúcich obrázkov rastlín a stromov, ktoré nazýval graftály. Neskôr v roku 1986, počítačový vedec Przemyslaw Prusinkiewicz, začal detailne študovať pravidlá L-systémov za účelom opisu rastu živých organizmov, ktoré sú obzvlášť vhodné pre reprezentáciu vetviacich štruktúr rastlín. Výsledný matematický model interpretovaný pomocou korytnačej grafiky sa používa na generovanie širokého spektra fraktálových kriviek [Pru86].

Lindenmayerove systémy (L-systémy) sú formálny gramatický systém, ktorý opakovane vytvára nové reťazce z predchádzajúcich reťazcov prepisovaním každého z jeho symbolov paralelne podľa súboru pravidiel prepisovania. Symboly vo vytvorenej reťazovej sekvencii možno brať ako inštrukcie na vytvorenie vizualizácie procesu v priebehu času.

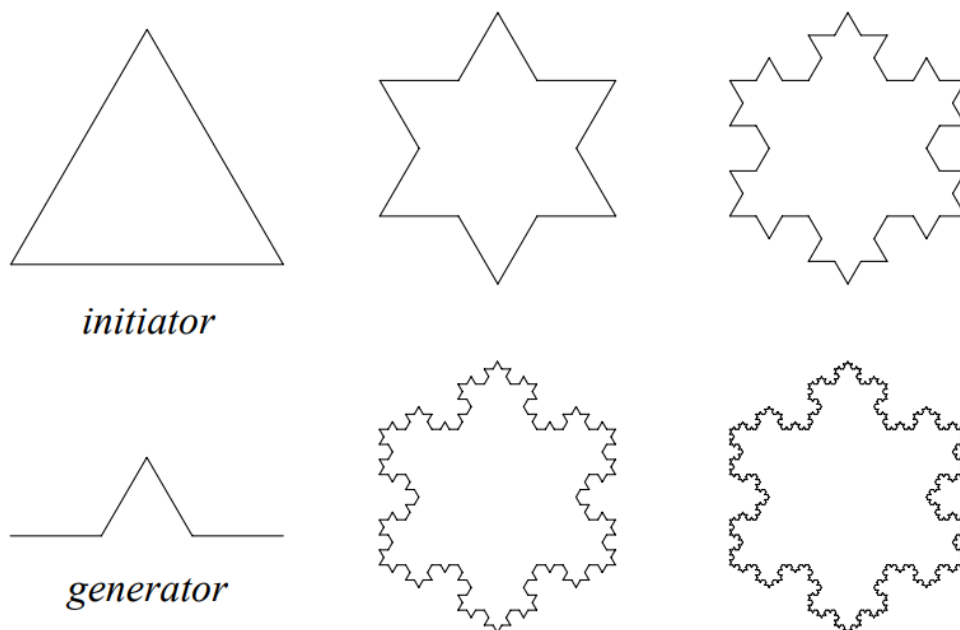
3.1 Vlastnosti L-systémov

L-systémy [PHF⁺96] sú súčasťou teórie jazykov a vychádzajú zo systému paralelného prepisovania reťazcov. Formálnym prostriedkom pre definovanie L-systémov je gramatika. Prepisovacia technika má jednoduchý základ vo formálnom jazyku a pozostáva zo symbolov:

- štartovací reťazec (axioma, iniciátor),
- prepisovacie pravidlo (pravidlo, generátor).

Prepisovanie je technika pre definovanie komplexných objektov postupným nahradzovaním časti z jednoduchého počiatočného objektu použitím množiny prepisovacích pravidiel. Prepisovanie sa rekurzívne opakuje a generovaný obrazec je stále detailnejší. V jednom kroku odvodzovania sa aplikuje toľko pravidiel naraz (paralelne), koľko je možné [Mar09].

Klasickým príkladom použitia prepisovania je napríklad snehová vločka navrhnutá v roku 1905 Von Kochom [PHF⁺96], znázornená na obrázku č. 3.1.

Obr. 3.1: Konštrukcia krivky snehovej vločky [PHF⁺96].

Konštrukcia Kochovej vločky je nasledovná. Začína sa s dvomi tvarmi, axiomou reprezentovanou rovnostranným trojuholníkom a pravidlom, ktoré je reprezentované ako orientovaná zalomená čiara vytvorená z N rovnakých strán s dĺžkou r . Každý tento kúsok konštrukcie začína s lámaním čiary a spočíva v nahradzovaní každého rovného intervalu kópiou generátora, zmenšuje a vytláča niektoré koncové body a tým nahradzuje intervaly. Kým Kochova konštrukcia rekurzívne nahradzuje otvorené polygóny, prepisovací systém ich prevádza na iné objekty, podľa toho akého tvaru boli vytvorené [Mar09].

L-systémy sú úzko späté s pojmami formálny jazyk a formálna gramatika. Formálny jazyk v logike, matematike, lingvistike, či informatike označuje množinu reťazcov symbolov (konečných slov) nad určitou abecedou. Formálny jazyk je tvorený presne danými špecifickými pravidlami, ktoré popisujú, akým spôsobom symboly, písmená skladať do reťazcov a aké operácie

nad symbolmi je možné používať, aby vznikali platné, regulárne slová. Formálne gramatiky sú úzko spojené s prirodzeným jazykom, pre ktorého popis boli primárne navrhnuté. V prirodzenom jazyku sa používajú pravidlá, podľa ktorých zo slov vznikajú gramaticky správne utvorené vety a súvetia. Obdobne sú využívané pravidlá vo formálnych gramatikách. V dnešnej dobe sú formálne gramatiky spolu s konečnými automatmi využívané v mnohých odvetviach. Konečný automat je teoreticky výpočtový model popisujúci jednoduchý počítač. Nachádza sa v jednom z konečnej množiny stavov, medzi ktorými prechádza pomocou symbolov zo vstupu. Uchováva si iba aktuálne informácie o stave a rozpoznáva iba regulárne jazyky. Používajú sa ako súčasť prekladačov alebo lexikálnych analyzátorov. Využitie nachádzajú aj v biológii (celulárne automaty, či simulácie rastu). Celulárne automaty predstavujú dynamické systémy v priestore a čase pracujúce v diskretných hodnotách. K simulácii rastu sa primárne využívajú L-systémy, ktoré formalizujú modely množenia buniek a simulujú rast od jednoduchých organizmov (trávy, riasy) až po vyššie rastliny (kríky, stromy) [MOR17].

L-systémy sú rozdelené do niekoľkých kategórií podľa zložitosti ich prepisovacích pravidiel:

- jednoduché L-systémy – vhodné pre simuláciu rastu rias, systémy s prepisovacími pravidlami iba jedným smerom, sem patria Kochova krivka, Hilbertova krivka, Sierpinského trojuholník, Ostrovy a jazerá, Gosperova krivka alebo Dračia krivka;
- L-systémy s vetvením – vhodné pre popis rastu vyšších rastlín, schopné vrátenia sa do predchádzajúceho stavu, príkladov sú binárne stromy, kríky, vetvičky;
- stochastické L-systémy – systémy rozšírené o náhodnosť pri iterácii,

vhodné pre simulácie lesu, kde je možné jeden organizmus interpretovať rôznymi spôsobmi;

- kontextové L-systémy – zohľadňujú spoluprácu susediacich buniek, či odovzdávanie si informácií cez hormóny, vhodné pre simuláciu napadnutia rastlín parazitmi;
- parametrické L-systémy – vhodné pre simuláciu listov.

Jednotlivé kategórie sú bližšie rozpísané v nasledujúcich kapitolách.

3.1.1 DOL-Systémy

DOL-systém je základným typom L-systémov, ktorý je charakterizovaný ako:

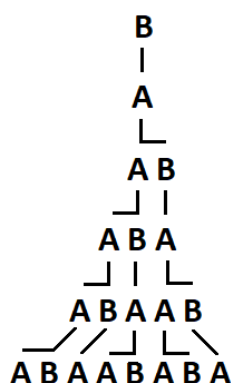
- deterministický, t.j. pre každý symbol existuje maximálne jedno pravidlo;
- bezkontextový, t.j. symboly, ktoré sa nachádzajú od skúmaného reťazca vpravo alebo vľavo sa neuvažujú, prechodové pravidlo je aplikované iba na jeden individuálny symbol.

Jednoduchým príkladom DOL-systému je generátor reťazca [PHF⁺96], ktorý je zostavený iba z dvoch písmen: A, B . Pre každé písmeno je definované prepisovacie pravidlo. Pravidlo $A \rightarrow AB$ hovorí, že písmeno A sa nahradí slovom AB . Pravidlo $B \rightarrow A$ hovorí, že písmeno B sa nahradí písmenom A . Prepisovací proces, t.j. odvodenie nového slova, začína reťazcom, ktorý nazývame axióma. Axióma obsahuje jedno písmeno B .

1. nastaví sa axióma B .
2. axióma B je nahradená písmenom A použitím pravidla $B \rightarrow A$

3. písmeno A je nahradené reťazcom AB pomocou pravidla $A \rightarrow AB$
4. v reťazci AB sú aplikované obe pravidlá a dostávame výsledný reťazec ABA

Takto by sa pokračovalo ďalej, na každé písmeno vo výslednom slove by sa aplikovalo príslušné pravidlo, ako je znázornené na obrázku č. 3.2.



Obr. 3.2: Postupná derivácia L-systému.

Výsledkom tohto L-systému je Fibonacciho postupnosť pre dĺžky výsledných reťazcov z jednotlivých derivácií. Tento L-systém bol Aristom Lindenmazerom použitý ako pôvodný L-systém pre modelovanie rastu rias. Práve riasa *Anabeana catenula* obsahuje 2 typy buniek, ktoré tvoria reťazky. Každá bunka z týchto typov má odlišné správanie, ktoré prebieha v iteráciách. Toto chovanie je zachytené na obrázku č. 3.2.

Formálne je DOL systém definovaný nasledovne:

Nech V označuje abecedu, V^* označuje množinu všetkých reťazcov nad abecedou V , a V^+ je množina všetkých neprázdnych reťazcov nad V . For-

málne je DOL-systém definovaný ako usporiadaná trojica

$$G = \langle V, \omega, P \rangle \quad (3.1)$$

Kde:

- V je abeceda systému,
- ω je axióma, neprázdna postupnosť symbolov $S \in V^+$
- P je konečná množina pravidiel v tvare $A \rightarrow B; A \in V; B \in V^*$.

Derivácia reťazca $A \in V^*$ znamená paralelné prepísanie všetkých symbolov $X \in A$ reťazca V z pravej strany pravidiel množiny P . Prepisovací proces začína reťazcom ω , ktorý sa nazýva axióma. Reťazec A a B v prepisovacom pravidle $P : A \rightarrow B$ a nazývajú predchodca a nasledovník. Počet krokov derivácií, resp. použítí prepisovacích pravidiel je označovaný znakom N .

Zápis Kochovej vložky prostredníctvom gramatiky L-systému je nasledovný:

$$G = \langle \{F, +, -\}, A, \{A \rightarrow F - -F - -F, F \rightarrow F + F - -F + F\} \rangle \quad (3.2)$$

Pre symboly $+$ a $-$ nie sú definované žiadne pravidlá a nebýva zvykom vypisovať pravidlá, ktoré prepisujú symbol na rovnaký symbol, v tomto prípade $+$ \rightarrow $+$, $-$ \rightarrow $-$.

Po dvoch deriváciách, výsledok pre Kochovu vložku je nasledovný:

$$A \rightarrow F - -F - -F \rightarrow F + F - -F + F - -F + F - -F + F - -F + F - -F + F \quad (3.3)$$

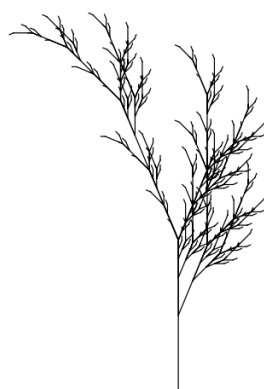
3.1.2 L-systémy s vetvením

Dôležitým rozšírením DOL-systémov sú L-systémy s vetvením [PHF⁺96], ktoré sa používajú pre vytvorenie tzv. stromovej vetviacej štruktúry rastlín. Pri odvodzovaní týchto obrazcov je potrebné, aby mala korytnačka schopnosť ukladať si do pamäte svoje predchádzajúce pozície a orientácie. Riešením je zavedenie zásobníka, do ktorého sa pri prepisovaní reťazca ukladá stav korytnačky.

Rozvetvené L-systémy využívajú symboly $[,]$ pre zaznamenanie svojej polohy a vrátenia sa do tejto polohy:

- $[$ uloží sa aktuálny stav korytnačky do zásobníka (pozícia, orientácia, farba, hrúbka čiary a pod.);
- $]$ vyzdvihne sa stav na vrchole zásobníka a tento sa stáva aktuálnym stavom korytnačky.

Táto kategória L-systémov dokáže popísať rast vyšších rastlín. Príklady definície a výsledku L-systémov s vetvením sú uvedené na nasledujúcom obrázku č. 3.3



Obr. 3.3: L-systém s vetvením [PHF⁺96].

3.1.3 Stochastické L-systémy

Všetky rastliny vytvorené pomocou deterministických L-systémov sú úplne identické. Aby z jednej definície rastliny vznikali podobné, ale nie úplne rovnaké rastliny, je potrebné do procesu prepisovania pridať faktor náhody. Pokiaľ existuje pre každý symbol viac pravidiel a každé je vyberané s nejakou pravdepodobnosťou, potom sa jedná o L-systém stochastický. Stochastické L-systémy [PHF⁺96] môžu byť rozšírené o náhodnosť v iterácii, či už v dĺžke kroku alebo veľkosti prírastkového uhla alebo o náhodný výber prepisovacieho pravidla. Vďaka tejto vlastnosti L-systému je možné vygenerovať tisíce rôznych interpretácií jedného L-systému.

Formálne je stochastický OL-systém definovaný ako štvorica:

$$G = \langle V, \omega, P, \pi \rangle \quad (3.4)$$

Kde:

- $\pi : P \rightarrow (0, 1]$ je funkcia, ktorá určuje pravdepodobnosť prepisu pravidla.

Prepisovacie pravidlá sa potom zapisujú v tvare:

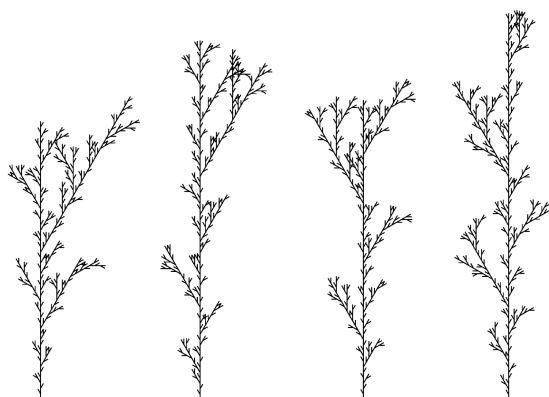
$$A \rightarrow B : prob \quad (3.5)$$

Kde:

- $prob$ je pravdepodobnosť, že symbol A bude prepísaný práve týmto pravidlom. Súčet pravdepodobností pravidiel pre práve jeden symbol musí byť 1.

Pomocou stochastických L-systémov je možné napríklad vymodelovať záhon rastlín, ktorý bude obsahovať podobné, avšak nie identické, náhodne rozmiestnené rastliny. Les vygenerovaný s takto definovaných stromov bude vyzeráť prirodzene, pretože v ňom nebudú existovať 2 rovnaké stromy.

Jednoduchý príklad stochastického L-systému je na obrázku č. 3.4, kde má každé pravidlo $1/3$ pravdepodobnosť, že bude použité.



Obr. 3.4: Reprezentácie stochastického L-systému [Duš06].

3.1.4 Kontextové L-systémy

L-systém, v ktorom pri aplikovaní pravidla nezávisí iba na jednom symbole, ale aj na jeho susedoch, sa nazýva kontextový. Kontextový L-systém [PHF⁺96] má pravidlá rozšírené tak, že sa pri prepisovaní symbolov zvažuje postupnosť symbolov na ľavej a pravej strane prepisovaného symbolu ako kontext, tzv. 2L-systémy. Pravidlá sa zapisujú nasledovne:

$$lc < A > rc \rightarrow B \quad (3.6)$$

Kde:

- lc sa nazýva ľavý kontext pravidla, $lc \in V^*$,

- rc sa nazýva pravý kontext pravidla, $rc \in V^*$,
- platí, že A (predchodca) je prepísaný reťazcom B práve vtedy, ak sa nachádza uprostred kontextov.

V prípade jednoduchších kontextových L-systémov sa uvažuje iba s pravým alebo ľavým kontextom. Pravidlá v jednostranných kontextových L-systémoch majú tvar $lc < A \rightarrow B$ alebo $A > rc \rightarrow B$ a nazývajú sa 1L-systémy.

Pravidlá kontextových L-systémov je možné kombinovať s pravidlami OL-systémov. Kontextové pravidlá bližšie špecifikujú prepisovaný symbol oproti bezkontextovým pravidlám, ktoré sú všeobecnejšie. Pri výbere pravidla majú kontextové pravidlá prednosť pred bezkontextovými. 1L-systémy povoľujú iba ľavý alebo pravý kontext, 2L-systémy obsahujú oba kontexty. Kombináciou L-systému s vetvením a kontextových pravidiel je možné modelovať listy, okvetné lístky a pod. V rámci formalizmu L-systémov s vetvením sa môže ľavý kontext použiť na simuláciu riadiacich signálov, ktoré sa šíria akropetálne, t.j. koreňové alebo bazálne listy smerom k vrcholom modelovanej rastliny. Pravý kontext sa použije na šírenie bazipetálnych signálov, t.j. od vrcholov smerom ku koreňu.

Napríklad nasledujúci 1L-systém simuluje šírenie akropetálneho signálu vo vetviacej sa štruktúre, ktorá nerastie:

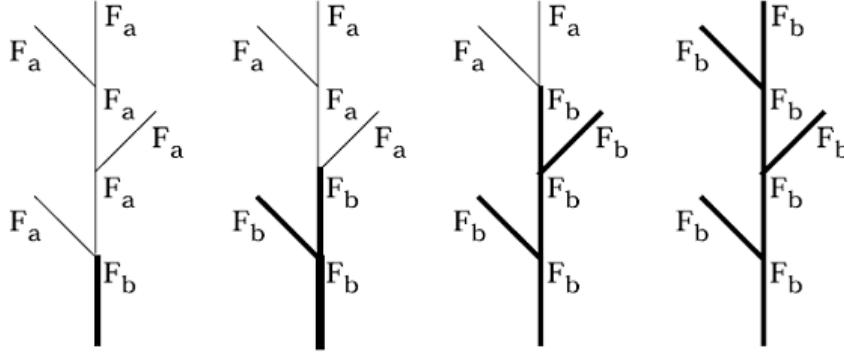
$\#ignore : + -$

$\omega : F_b[+F_a]F_a[-F_a]F_a[+F_a]F_a$

$p1 : F_b < F_a \rightarrow F_b$

Symbol F_b predstavuje segment, ktorý už signál dosiahol. F_a predstavuje segment, ktorý ešte nebol dosiahnutý. $\#ignore$ výrok znamená, že geometrické symboly $+$ a $-$ by mali byť pri porovnávaní kontextu považovať za

neexistujúce. Obrázok č. 3.5 predstavujúce po sebe idúce fázy šírenia signálu.



Obr. 3.5: Fázy šírenia signálu v kontextovom L-systéme [PHF⁺96].

3.1.5 Parametrické L-systémy

Parametrický L-systém [PHF⁺96] je rozšírením klasického L-systému o parametre. Tie sú zadane v guľatých zátvorkách (ľubovoľný konečný počet) a nepovažujú sa za symboly L-systému. Parameter je reálne číslo, funkcia, matematický výraz alebo premenná, ktoré postačuje poznať až pri derivovaní. Množina parametrov môže byť prázdna, ale musí byť konečná.

Parametrický OL-systém je definovaný ako usporiadaná štvorica:

$$G = \langle V, \Sigma, \omega, P \rangle \quad (3.7)$$

Kde:

- Σ je množina formálnych parametrov.

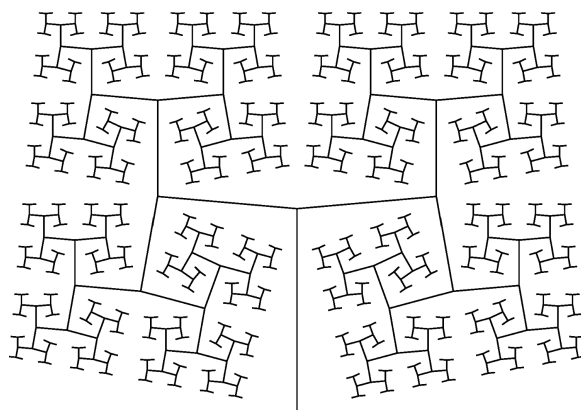
Pokiaľ má symbol jeden a viac parametrov, potom prvý parameter je interpretovaný korytnačkou. Ak je symbol použitý bez parametrov, použije sa defaultná hodnota.

Napríklad prepisovacie pravidlo $F(t) \rightarrow F(t/2) + (50)f(5)$ sa bude interpretovať ako posun v smere o dĺžku $t/2$, rotáciu doľava o 50° , posun o 5 bez kreslenia.

S ohľadom na korytnačiu grafiku sa zavádza symbol $!$, ktorý môže byť použitý s alebo bez parametra. Zásobník korytnačky samozrejme pri výskyte tohto symbolu bude uchovávať, resp. obnovovať aj veľkosť segmentu. Význam a použité symbolu $!$:

- $!$ je zmenšenie segmentu o defaultnú konštantu,
- $!(a)$ je zmena segmentu na hodnotu a

Bežným príkladom parametrického L-systému je tzv. zmenšujúci sa T systém, ktorý môžeme vidieť na obrázku č. 3.6



Obr. 3.6: Zmenšujúci sa parametrický systém [PHF⁺96]

3.2 Korytnačia interpretácia symbolov

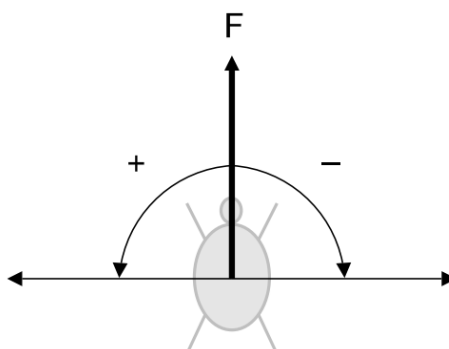
Výstup v tvare dlhého reťazca je vhodné graficky vizualizovať práve pomocou korytnačej grafiky.

Korytnačia grafika [AD86] je termín predovšetkým z oblasti počítačovej grafiky, kde pomocou virtuálneho kurzora (trojuholník, ikona korytnačky, ...) sa kreslí na plátno/obrazovku. Tento spôsob vykresľovania sa inšpiroval reálnym pohybom korytnačky, zachytením stopy, ktorú za sebou korytnačka zanecháva v piesku. Korytnačka sa pohybuje dopredu a otáča sa o určitý uhol (obrázok č. 3.6).

Korytnačka reprezentuje kresliace zariadenie. Stav korytnačky je definovaný v 2-D súradnicovom systéme ako trojica (x, y, α) , kde x, y sú karteziánske súradnice, ktoré reprezentujú pozíciu korytnačky a α je uhol, ktorý vyjadruje, ako je korytnačka otočená, teda smer, kam sa korytnačka pozerá. Definovaním dĺžky kroku d a prírastkom uhla δ a požadovaným počtom krokov odvodenia je možné jednoznačne definovať pohyb a smer korytnačky. Jednotlivé symboly reťazca sa pri tom chápu ako príkazy pre riadenie pohybu kresliaceho zariadenia [CC00].

Používané symboly sa reprezentujú nasledovne [PHF⁺96]:

- F je posun vpred o krok s dĺžkou d , stav korytnačky sa zmení na (x', y', α) , kde $x' = d \cos \alpha$ a $y' = d \sin \alpha$. Medzi dvojicu bodov (x, y) a (x', y') sa nakreslí čiara
- f je posun vpred o krok s dĺžkou d bez kreslenia čiary
- $+$ je otočenie korytnačky doľava o uhol δ , ďalší stav korytnačky je $(x, y, \alpha + \delta)$
- $-$ je otočenie doprava o uhol δ , ďalší stav korytnačky je $(x, y, \alpha - \delta)$

Obr. 3.7: Orientácia korytnačky v 2D (x, y, α) .

Ak pri odvodzovaní Kochovej vločky použijeme 2 kroky odvodzovania a prírastok uhla $\delta = 60^\circ$, výsledný mnohoúhelník je zobrazený na obrázku č. 3.1. Dĺžka kroku d sa medzi jednotlivými krokmi zníži vždy 3-krát a vzdialenosť medzi koncovými bodmi nového polygonu sa rovná dĺžke hrany predchodcu.

Generovanie snehovej vločky prostredníctvom L-systémov je v paralelnom aplikovaní pravidla vo všetkých jeho výskytoch. Tento prístup reflektuje biologické vlastnosti rastu živých organizmov, v ktorých sa vyskytuje väčší počet rastových oblastí v rovnaký čas.

Pomocou korytnačej grafiky je možné vykresliť jednoduché polygóny, ale aj zložité fraktály. Ide o opakovanie jednoduchých pravidiel, kde výsledná tvar máva na prvý pohľad zložitý tvar. Fraktál sa skladá z niekoľkých častí, ktoré sú si navzájom podobné a pri ich detailnom pozorovaní z akéhokoľvek uhlu alebo v akomkoľvek meradle, ide stále o jeden podobný motív.

Vykresľovanie L-systémov pomocou počítačovej grafiky je ľahko rozšíriteľné aj do 3-rozmerného priestoru [MOR17]. Kľúčovým aspektom je predstavenie si aktuálnej orientácie korytnačky v priestore 3 vektorov. Tieto vektory určujú smer pohľadu dopredu H (heading), smer, ktorým sa korytnačka

pozerá, doľava L (left), smer, ktorý ukazuje ľavú stranu korytnačky a hore U (up), smer orientácie panciera korytnačky. Všetky vektory majú rovnakú dĺžku, sú na seba kolmé a spĺňajú vzťah $HxL = U$.

Pohyb je interpretovaný pomocou znakov:

- $+$, $-$ otočenie doľava/doprava o zadaný uhol okolo osi U ,
- \wedge , $\&$ otočenie hore/dolu o zadaný uhol okolo osi L ,
- $/$, \backslash nahnutie doľava/doprava o zadaný uhol okolo osi H .

3.3 Modelovacie techniky

Modelovanie rastlín je proces spájajúci biologické poznatky a matematické formalizmy v počítačovej grafike na vytváranie virtuálnych rastlín. Technika L-systémov v kombinácii s korytnačou grafikou umožňuje modelovať rastliny a stromy tak, že vyzerajú ako skutočné. Integrovanie správnych parametrov ako napr. uhol medzi vetvami, pomer dĺžky vetiev, fylotaktické vzory, farby, umožňujú modelovať hodnovernejšie výsledky. L-systémy je potrebné zmysluplne využiť.

3.3.1 Modelovanie stromov

Skutočná rastlina, či strom sa zvyčajne skladá z mnohých častí, ako sú kónáre, kmene, listy a kvety.

Prvé modely stromových štruktúr kládli dôraz na interakcie medzi rôznymi prvkami rastúcej štruktúry, ale ignorovali také faktory, ako sú napríklad kolízie medzi vetvami. Prvý model stromu bol navrhnutý Hisao Hondom v roku 1971. Jeho technika vychádzala z predpokladov [Duš06]:

- Segmenty stromov sú rovné a ich priemer sa neuvažuje;

- Pri vetvení produkuje rodičovský segment (predchodca) dvoch potomkov (nasledovník);
- Dĺžka potomkov je skrátená konštantami r_1 a r_2 podľa dĺžky rodičovského segmentu;
- Rodičovský segment a potomkovia ležia v jednej rovine a vetvenie sa uskutočňuje podľa konštantných uhlov θ_1 a θ_2 ;
- Vetviaca rovina by mala rešpektovať gravitáciu, byť čo najbližšie k horizontálnej rovine.

Tento model bol ďalej rozširovaný o faktory tropizmu, stochastického rastu, vetra, atď. Stromy majú kmene silnejšie, vetvy tenšie. Pre zjednodušenie úlohy modelovania bez straty veľkej časti reality, nižšie uvedený príklad je zameraný iba na konáre a kmene a zvyšok sa ignoruje. Na úvode sa využije pozorovanie, sebakodobnosť charakteristická pre rastlinu. Následne sa spraví pár skutočných meraní.

Tropizmus je technika, ktorá sa používa pre zohľadnenie nejakej sily, ktorá ovplyvňuje rast stromov. Pri geotropizme sa vyhodnocuje gravitácia, pri fototropizme slnko. Pre simuláciu tohto efektu je korytnačka po každom vykreslenom segmente natočená v smere predefinovaného vektora tropizmu T . Uhol je vypočítaný z rovnice $\alpha = e|\vec{H}x\vec{T}|$, kde e je faktor určujúci ako sa bude korytnačka natáčať.

3.3.2 Modelovanie rastlín

V prípade rastlín [Duš06] je modelovanie o niečo zložitejšie. Okrem vetvenia je potrebné špecifikovať napríklad kvety. Pre modelovanie rastlín sa preto niekedy zavádzajú neúplné L-systémy, ktoré lepšie popisujú ich biologickú štruktúru.

Do modelu sa zavádzajú ďalšie symboly, ktoré reprezentujú rôzne časti rastliny, ako sú kvety, listy, rastové vrcholy a pod. Pravidlá odrážajú rastové fázy. Pre lepšiu názornosť je uvedený príklad neúplného L-systému:

$$\omega : a$$

$$p1 : a0.8 \rightarrow I[L]a$$

$$p2 : a0.2 \rightarrow I[L]A$$

$$p3 : a \rightarrow K$$

Malé písmeno a reprezentuje rastový vrchol, veľké A vrchol kvetu, L je list, K je kvet a I je vnútorný uzol. V každej derivácii sa rastový vrchol premení na vnútorný uzol, list a na nový rastový vrchol alebo na vrchol kvetu. Pre výber pravidla $p1$ alebo $p2$ je definovaná pravdepodobnosť (stochastický L-systém). Vrchol kvetu je v ďalšej derivácii prepísaný na vlastný kvet. Vydefinovaná štruktúra rastliny je následne graficky interpretovaná zodpovedajúcimi grafickými obrazcami.

Zavedenie pravdepodobnosti pre výber pravidla patrí k najjednoduchším spôsobom ovládania rastu. Ďalšími spôsobmi ovládania rastu pridanie parametrov vyjadrujúcich vplyv prostredia na srast rastliny ako teplota, množstvo svetla, atď. Takéto pokročilé systémy sa nazývajú otvorené L-systémy.

Kapitola 4

Stav riešenej problematiky

Problematika L-systémov spája v sebe oblasti matematiky, biológie a počítačovej grafiky. Využitie matematického formalizmu pre popísanie rastu živých organizmov priniesol v roku 1968 biológ Astrid Lindermayer, podľa ktorého sú tieto mechanizmy pomenované. L-systémy môžu byť použité aj na generovanie niektorých typov fraktálov. Grafická vizualizácia bola rozpracovaná matematikom Alvy Ray Smithom až v roku 1984 a súvisí s rozvojom počítačovej grafiky. Napriek komplexnosti matematickej teórie L-systémov, L-systémy sa tešia popularite práve z dôvodu vizualizácie a grafickej reprezentácii. Nachádzajú si svoje uplatnenie v oblasti simulácií reálneho sveta v digitálnom prostredí, počítačových hrách, či v medicíne.

Teoretická stránka skúmanej problematiky je popísaná v dostatočnej miere, v súčasnosti sa stav problematiky orientuje skôr na praktické využitie L-systémov a ich aplikácie do rôznych oblastí života. Vyplýva to aj z dostupných študentských prác, ktoré obsahujú teoretické poznatky o L-systémoch, ale prinášajú aj návrhy vlastných používateľských aplikácií v rôznych implementačných platformách.

4.1 Modelovanie rastlín pomocou L-systémov

Martin Dušek vo svojej práci [Duš06] oboznamuje čitateľov s teóriou L-systémov s ohľadom na techniky, ktoré sa aplikujú v počítačovej grafike pri modelovaní rastlín. Autor rieši návrh vlastnej aplikácie v jazyku C++ s využitím knižníc Qt a OpenGL a implementáciu prekladača pre prácu s pravidlami L-systému. Podarilo sa mu implementovať väčšinu typov L-systémov, i keď kontextové L-systémy sú obmedzené iba na jednosymbolové.

4.2 L-systémy v 3D grafike

Práca [Mar09], ktorej autorom je Ján Marček, analyzuje problémy súvisiace s modelovaním L-systémom a hľadá riešenie týchto problémov vo vlastnej aplikácii pre generovanie krajinky s využitím jME grafického rozhrania. Práca využíva hotové scény a absentuje tu tvorba vlastných L-systémov.

4.3 Fraktály

Fraktálmi sa zaoberá práca Jany Tulikovej [Tul18], pričom cieľ práce je zhrnúť základné teoretické poznatky o fraktáloch. Sú v nej vysvetlené pojmy a definície súvisiace s fraktálmi a spomína významných matematických odborníkov v tejto oblasti. Ďalej popisuje a uvádza jednotlivé druhy fraktálov: L - systémy, dynamické systémy, iterované systémy funkcií a náhodné fraktály. Záver je venovaný uplatneniu fraktálov v medicíne, informatike a iných vedách, pomenúva priestor pre ich praktické uplatnenie v živote. Praktická časť absentuje, ale ponúka kvalitný teoretický základ.

4.4 L-systémy v grafickom dizajne

Cieľom práce Terezy Moravcovej [MOR17] bolo vytvorenie používateľskej aplikácie pre generovanie vizuálnych výstupov generovaných pomocou vybraných L-systémov. Výsledná aplikácia bola implementovaná vo webovom prostredí pomocou HTML5 Canvas, JavaScriptu ES6 za pomoci frameworku React. Aplikácia nebola testovaná, neumožňuje vytvorenie vlastných domén, vlastných používateľských účtov a ich prispôsobenie, či zdieľanie už vytvorených L-systémov. Práca je orientovaná viac na vizuálnu stránku a manipuláciu (animácie, posun, rotácia, zväčšenie) s preddefinovanými L-systémami, nie na generovanie vlastných L-systémov a prácu s ich pravidlami a parametrami.

4.5 Zhrnutie

Niektoré práce sú orientované viac teoreticky, iné skúmajú ich aplikácie v reálnom svete, alebo sú zamerané na tvorbu používateľských aplikácií na tvorbu vlastných L-systémov, či úpravu preddefinovaných systémov. Práve v tvorbe vlastných používateľských aplikácií je vidno prínos do danej problematiky. Návrh aplikácie, ktorá umožní svojim používateľom pochopiť základné formalizmy L-systémov a ich prepojenie s grafickou reprezentáciou, otvára nové horizonty pre ich úspešné rozvíjanie.

Pri tvorbe takýchto aplikácií je dôležité zamerať sa na ich jednoduché používanie, aby boli dostupné čo najširšej vekovej skupine používateľov na interaktívne skúmanie rôznych typov L-systémov. Zároveň však treba klásť dôraz na atraktívnu vizualizáciu výsledkov, vďaka ktorým je možné podporiť záujem používateľov o hlbšie skúmanie a rozvoj problematiky L-systémov do budúcnosti.

Kapitola 5

Návrh laboratória

Z analýzy stavu riešenej problematiky vyplýva, že je tu priestor na vytvorenie softvérového laboratória pre žiakov stredných škôl. Práve na problematike L-systémov je možné priblížiť pútavým spôsobom študentom prepojenie matematiky, formálnych jazykov, grafickej vizualizácie prvkov z reálneho sveta a tým v nich vzbudiť záujem o hlbšie štúdium aplikovanej informatiky.

Vývoj softvérového laboratória realizujeme v niekoľkých fázach. Cesta k úspešnému laboratóriu prechádza fázami od analýzy a návrhu riešenia, implementáciu až po finálnu verziu a testovanie.

Cieľovými používateľmi laboratória sú študenti strednej školy. Pre vzdelávací proces je relevantný konečný výsledok, ktorý by mal spĺňať určité kritériá. Dostupnosť laboratória je prvým predpokladom jeho úspešného využitia. V súčasnosti sú už počítačové učebne na školách štandardom, rovnako aj internetové pripojenie. Na základe týchto faktov sme sa rozhodli riešiť laboratórium ako webovú aplikáciu.

Výhody tohto riešenia sú v tom, že webová aplikácia, konkrétne aplikácia na strane klienta, je dostupná používateľom z webového servera cez internet. Výhodou je ďalej fakt, že má rovnaké používateľské rozhranie dostupné cez

ľubovoľný webový prehliadač bez nutnosti inštalácie špeciálneho softvéru. Toto riešenie nám umožní prezentáciu aj na rôznych typoch platforiem. Zdrojový kód je možné ľahko aktualizovať na jednom mieste na strane servera. Odstránené sú problémy s kompatibilitou, pretože používatelia majú prístup k rovnakej verzii. Neočakáva sa vysoká špecifikácia počítačov v počítačových učebniach. Prístup k laboratóriu je možný odkiaľkoľvek pomocou prístupu na internet. To môže niekto považovať aj za nevýhodu, nutnosť internetového pripojenia, ale to už v dnešnej dobe nie je významný problém.

S ohľadom na teoretické znalosti v oblasti L-systémom a ich vizualizáciu, identifikovali sme potrebu navrhnuť a implementovať 3 základné entity:

- L-systém, vrátane jeho vlastností ako axióma a pravidiel;
- Korytnačku, známu aj ako grafické pero, spolu s funkciami pre zadávanie príkazov pre pohyb, prácu s perom, atď.;
- Kresliace plátno.

Korytnačia grafika je všeobecne známy pojem a s jej využitím sa mohli stretnúť už žiaci základných škôl. Korytnačka je však šikovný nástroj a zabaví aj zdatných programátorov. Študenti stredných škôl by nemali mať problém zvládnuť aj elegantné fraktály, či modelovanie rastlín pomocou L-systémov.

Vzhľadom na cieľovú skupinu používateľov laboratória, bude možné:

- Pre výpočet L-systému:
 - zadefinovať štartovací reťazec pre L-systém,
 - zadefinovať pravidlá L-systému,
 - nastaviť počet krokov derivácií;
- Pre prácu s korytnačkou/perom:

- nastaviť dĺžku kroku korytnačky,
 - nastaviť uhol natočenia korytnačky,
 - nastaviť šírku pera,
 - nastaviť farbu pera,
 - umožniť dynamicky zmenšiť šírku pera po vnorení do vetvenia;
- Pre prácu s plátnom:
 - vykresliť definovaný L-systém,
 - nastaviť farbu pozadia,
 - vrátiť korytnačku na iniciálnu pozíciu,
 - vyčistiť plátno.

Laboratórium podporuje D0L- systémy, L-systémy s vetvením a stochastické L-systémy.

Aby bolo možné dosiahnuť lepšie vizuálne prevedenia modelov a precvičiť si prácu so stochastickými modelmi, používateľ bude vedieť nastaviť chybu dĺžky kroku korytnačky a náhodnosť kroku, inak povedané, o koľko percent sa môže líšiť dĺžka kroku od nastavenej iniciálnej hodnoty. Obdobne bude možné určiť odchýlku pre uhol natočenia korytnačky a jeho náhodnosť.

Úroveň práce v laboratóriu bude reflektovať na vek a odbornú spôsobilosť žiakov. Zabezpečenie korektnosti zadefinovanej axiomy a pravidiel rieši samotný systém. Každý atribút je doplnený o online nápovedu. Aplikáciou techniky drag&drop bude v laboratóriu zabezpečené, že používateľ nevie zadať gramaticky nesprávne pravidlo. Rôznorodosť názorných reprezentácií L-systémov bude podporená možnosťou importu a exportu modelov. Pre menej zdatných používateľov budú pripravené už hotové stimulujúce príklady modelov, ktoré si môže používateľ vložiť do laboratória a pokračovať v práci

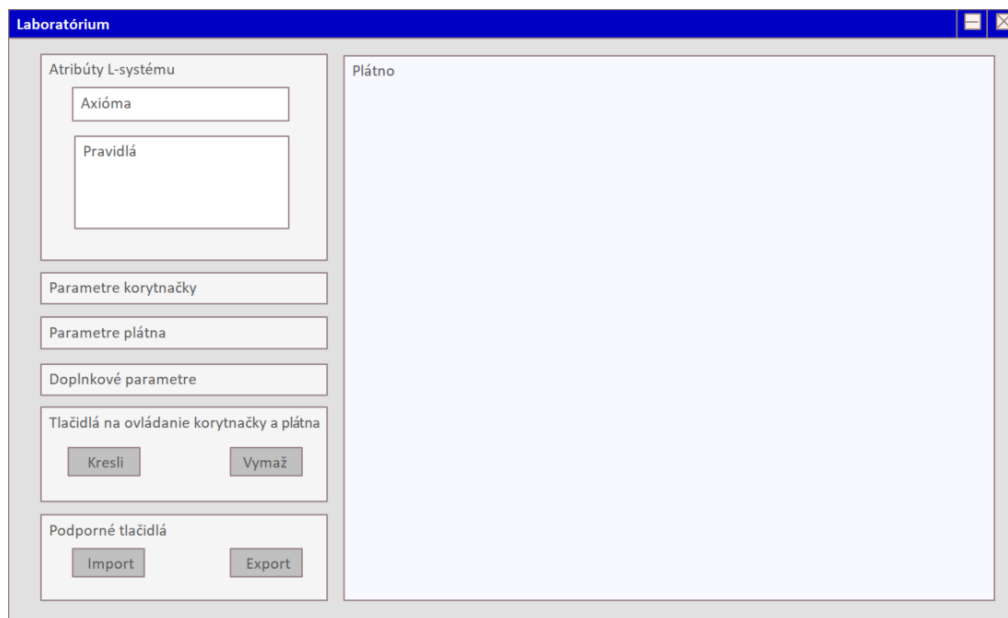
vzhľadom na svoje schopnosti. Naopak, rozpracované alebo vlastné modely si používateľ môže uložiť pre budúcu prácu.

Aplikácie pre žiakov by mali byť nielen edukačné, ale mali by obsahovať aj pozitívny digitálny obsah. Laboratórium sa snažíme navrhnuť tak, aby sa zohľadnili aj hodnoty z hľadiska potencionálneho vplyvu na študenta. V laboratóriu sú zabudované jednoduché grafické štruktúry, ako list, plod, či kvet. Tým je možné dosiahnuť vyššiu pútavosť a atraktivnosť vytváraných modelov rastlín, ktoré reprezentujú L-systémy. Možnosti vlastného farebného nastavenia pozadia plátna, kresliaceho pera, či preddefinovaných štruktúr môžu byť pre študentov inšpirujúce, podporia zvedavosť naučiť sa viac.

Laboratórium je koncipované ako jednoduchá web stránka, ktorá je rozdelená na samostatné sekcie. Pri návrhu používateľského rozhrania sme vychádzali z požadovanej funkcionality na softvérové laboratórium. Používateľské rozhranie sa skladá z nasledovných sekcií:

- sekcia pre definovanie základných atribútov L-systému (axióma, pravidlá);
- sekcia pre nastavenie doplnkových parametrov pre definovanie L-systému;
- sekcia pre nastavenie parametrov korytnačky;
- sekcia pre nastavenie farebnej škály plátna;
- sekcia tlačidiel pre ovládanie korytnačky a plátna;
- sekcia podporných tlačidiel pre import a export modelov do/z laboratória;
- sekcia plátna pre vykresľovanie zadaného L-systému.

Návrh možného dizajnu laboratória je uvedený na obrázku č. 5.1



Obr. 5.1: Návrh používateľského rozhrania

Kapitola 6

Implementácia

Interaktívne softvérovo laboratórium na skúmanie L-systémov je implementované ako internetová aplikácia s využitím programovacích jazykov JavaScript, HTML a CSS. Ide o webovú aplikáciu, kde aplikačná aj používateľská vrstva bežia v prehliadači na strane klienta. Aplikácia je síce nasadená na webovom serveri GitHub Pages, ale po jej načítaní už server neplní žiadnu úlohu. Pri programovaní aplikácie bol použitý multiplatformový editor kódu Visual Studio Code od spoločnosti Microsoft s priamou podporou pre vývoj softvéru cez Git.

Pre efektívnejší vývoj takéhoto typu aplikácie sme sa rozhodli použiť framework Vue.js. Jedná sa o progresívny javascriptový framework na vytváranie používateľského rozhrania. Predstavuje adaptibilnú architektúru, ktorá sa zameriava na deklaratívne renderovanie a zloženie komponentov prezenračnej vrstvy. Pre uchovávanie a prácu s dátami sme zvolili knižnicu Vuex, čo je stavový kontajner pre Vue.js aplikácie. Stav je reprezentovaný ako objekt, v ktorom sú uložené nie len dáta, ale aj mutačné funkcie, ktoré zabezpečujú správne ukladanie údajov pri ich zmene, a getter funkcie, ktoré umožňujú dáta získať v požadovanom formáte. Štýlovanie komponentov je okrem sa-

motných kaskádových štýlov riešené pomocou jednej z najznámejších CSS knižníc Bootstrap. Tá poskytuje sadu nástrojov pre tvorbu grafického rozhrania komponentov s dôrazom na ich prehľadnosť a responzivitu na rôznych zariadeniach. Väčšiu mieru interaktívnosti pri tvorbe axiém a pravidiel sme docielili využitím knižnice Vue.Draggable so systémom drag&drop, ktorá poskytuje zoznamy s možnosťou presúvania myšou. Výhodou je, že si funkčnosť zachováva aj na dotykových zariadeniach.

Zdrojový kód je rozdelený do nasledovných častí:

- **scripts** - definície tried aplikačnej logiky
- **store** - definície modulov úložiska dát
- **components** - definície prvkov používateľského rozhrania

6.1 Aplikačná logika

Logika aplikácie je oddelená od prezentačnej časti. Entity aplikačnej logiky sa používajú na reprezentáciu stavu laboratória a na služby pre získavanie a zmenu dát na základe akcií používateľa. V nasledujúcich podkapitolách priblížime z pohľadu implementácie stav a jednotlivé triedy pre tvorbu a vizualizáciu L-systémov.

6.1.1 Triedy

Definovanie dátových štruktúr a pravidiel pre prácu s L-systémami, kroytnačkou a plátnom je rozdelené do troch tried:

- **LSystem**
- **Canvas**

- Turtle

Tvorba L-systémov je reprezentovaná ako trieda `LSystem`. Obsahuje dve metódy, `rewrite()` a `computeSystem()`, ktoré úzko spolupracujú pri aplikovaní prepisovacích pravidiel. Výpočet začína s axiómou vo forme znakového reťazca, pričom v každej iterácii nahradí všetky znaky definované v pravidlách. Ak sa jedná o stochastický systém, kde pre jeden symbol definujeme viacero pravidiel prepisu, metóda zvolí náhodne jedno z nich. Po dosiahnutí stanoveného počtu interácií dostávame výsledný znakový reťazec.

Ovládanie plátna je definované v triede `Canvas`. Základným atribútom tejto triedy je samotný HTML element `canvas`, ktorého kontext slúži na vykresľovanie objektov a zmenu farby či veľkosti pozadia a pera. Zároveň pri inicializácii naškáluje plátno podľa potreby na základe rozlíšenia zariadenia na ktorom je aplikácia spustená.

Trieda `Turtle`, reprezentujúca korytnačku, využíva obe predchádzajúce triedy k vizualizácii L-systémov. Obsahuje základné metódy pre pohyb a natočenie korytnačky, zmenu pozície a nastavenie zdvihnutia pera. Okrem toho má implementovanú interpretačnú metódu L-systému `draw()`, ktorá prevedie znakové inštrukcie na konkrétne príkazy pre korytnačku a následne systém vykreslí na plátno. Metóda `computeAutoLength()` sa stará o škálovanie systému tak, aby jeho veľkosť nepresiahla hranice plátna. Ďalej tu nájdeme metódy na výpočet pravdepodobnosti a chybovosti dĺžky kroku a veľkosti uhla alebo výskytu definovaných štruktúr, ktorými sú `leaf()`, `fruit()`, `flower()`. Pre realistickejšie zobrazenie týchto štruktúr sa využíva metóda `closeColor()`, ktorá nastaví ich farbu v blízkom rozsahu definovanej farby.

6.1.2 Stav

Pri spustení webového laboratória sa aplikácia nastaví do inicializačného stavu. Ten je reprezentovaný ako štrukturovaný objekt, pozostávajúci z dvoch modulov:

- **Turtle**
- **System**

Modul korytnačky **Turtle** obsahuje inšanciu triedy **Turtle** s jej atribútmi a metódami. Jedným z jej atribútov je aj inštancia triedy **Canvas**. Modul nám týmto spôsobom umožňuje ovládať kompletnú vizuálnu funkcionálnosť aplikácie kdekoľvek na stránke.

Jednotlivé hodnoty L-systému sú uložené v stavovom module **System**. Tento objekt obsahuje okrem axiomy a pravidiel s prislúchajúcimi symbolmi aj všetky ostatné parametre laboratória. Tabuľka 6.1 zobrazuje zoznam a popis niektorých parametrov tohoto modelu.

Aplikácia poskytuje aj možnosť exportovania a importovania definovaného systému. Dátový objekt **System** je možné stiahnuť a uložiť do lokálneho priečinka v počítači vo formáte JSON a opätovne nahráť späť do aplikácie. Rovnako umožňuje uloženie vytvoreného obrazca cez modul **Turtle**, ktorý stiahne aktuálny stav kontextu plátna vo formáte PNG.

Tabuľka 6.1: Tabuľka niektorých parametrov stavu laboratória.

Parameter stavu	Popis
order	rád / počet iterácii systému
length	dĺžka kroku
angle	veľkosť uhla
penSize	hrúbka pera
penSizeDecrease	zmenšenie hrúbky pera pri vnorení do vetvy systému
backgroundColor	farba pozadia
penColor	farba pera
faultyStep	veľkosť chybovosti kroku
probabilityFaultyStep	pravdepodobnosť aplikovania chybovosti kroku
leaf	označenie možnosti vykreslenia listu na konci vetvy systému
leafSize	veľkosť listu
leafProbability	pravdepodobnosť vykreslenia listu na konci vetvy systému
leafColor	farba listu

6.2 Používateľské rozhranie

Používateľ má prístup k aplikácii prostredníctvom webovej stránky. Aplikácia je rozdelená na viaceré elementy, ktoré sú definované v samostatných komponentoch:

- Canvas
- Header
- Manual
- Menu

- `MenuGeneral`
- `MenuRandomness`
- `MenuStructures`

Inicializačný komponent aplikácie, reprezentovaný triedou `App`, sa stará o prepojenie komponentárneho systému s objektovým modelom dokumentu a následne vykresľuje jednotlivé komponenty na stránku.

Komponent `Canvas` definuje element plátna pre laboratórium a jeho úzke prepojenie s inštanciami tried `Turtle` a `Canvas`. Zároveň rieši vykresľovanie a manipuláciu s korytnačnou, ktorú je možné po plátne ľubovoľne presúvať a otáčať.

O zobrazenie hlavičky stránky sa stará komponent `Header`. V tomto komponente sa nachádzajú tlačidlá pre import a export aktuálneho stavu systému, ako aj tlačidlo pre uloženie obrazca vykresleného na plátne laboratória.

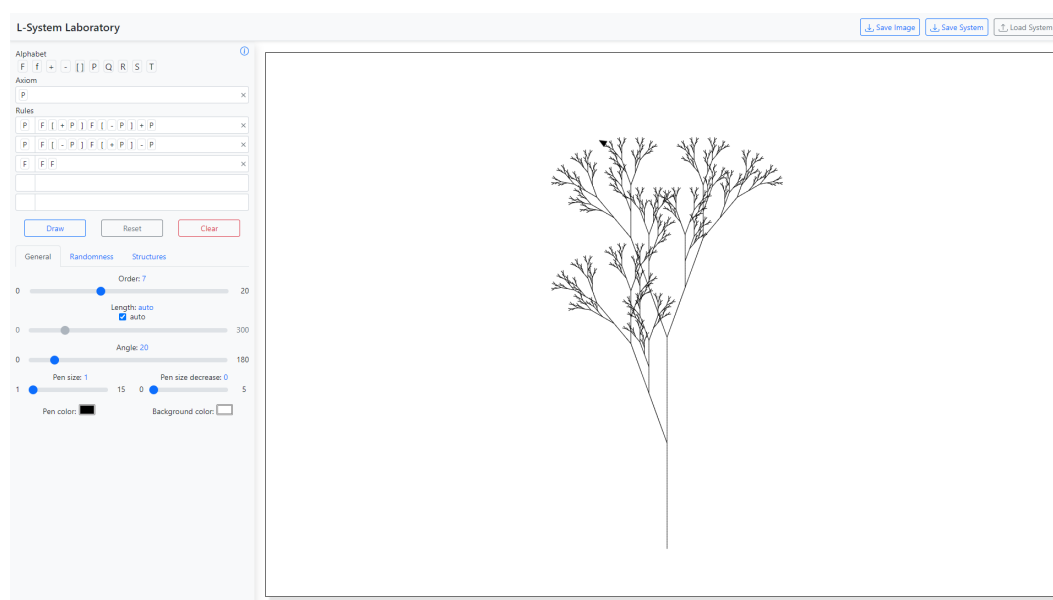
Axiómu a pravidlá môže používateľ zostaviť pomocou komponentu `Menu`, ktorý implementuje už spomínaný drag&drop systém. Menu obsahuje abecedu znakov, ktoré slúžia na interpretáciu inštrukcií L-systému. Všetky polia je možné aj jednoducho vymazať pomocnými tlačidlami alebo presunutím znakov späť do abecedy. Tiež sa tu nachádzajú tlačidlá pre vykreslenie systému, zresetovanie polohy korytnačky do štartovacej pozície a premazanie celého plátna.

Parametre systému sú ovládané cez komponenty `MenuGeneral`, `MenuRandomness` a `MenuStructures`. Zobrazené sú ako záložky pre skompaktňovanie grafického rozhrania. Nachádzajú sa tu všetky ostatné atribúty ako počet iterácií, dĺžka kroku, veľkosť uhla, farby, veľkosti chýb s pravdepodobnosťou a možnosti vykreslenia preddefinovaných štruktúr. Číselné

hodnoty sa nastavjú pomocou posúvačou, ktoré zabezpečia validnosť vstupu od používateľa.

Posledným komponentom je **Manual**, v ktorom je spísaný stručný návod k používaniu laboratória a jeho funkcionality. Pre ušetrenie miesta obrazovky je komponent primárne skrytý a zobrazí sa až pri nadídení myšou na ikonu informácií.

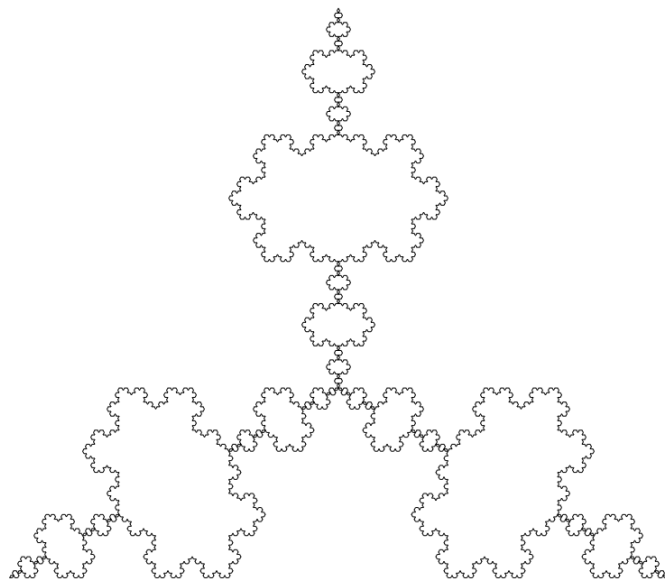
Ukážka kompletného používateľského rozhrania je na obrázku č. 6.1.



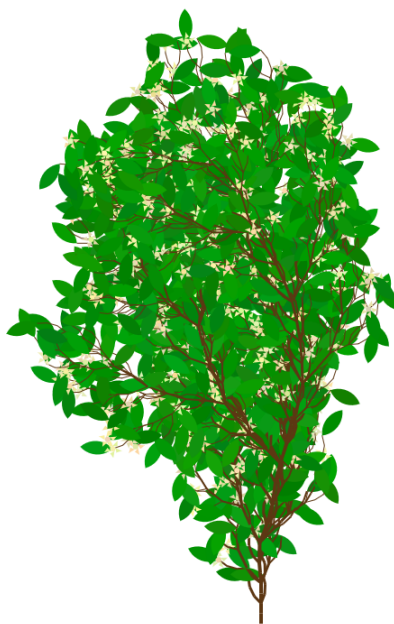
Obr. 6.1: Ukážka používateľského rozhrania laboratória.

6.3 Výstupy laboratória

Finálna verzia implementácie softvérového laboratória na skúmanie L-systémov poksytuje široké spektrum možností pri ich vizualizácii. Nasledujúce obrázky č. 6.2 a č. 6.3 ilustrujú možné výstupy laboratória pre rôzne typy L-systémov.



Obr. 6.2: Ukážka fraktálu vytvoreného DOL-systémom.



Obr. 6.3: Ukážka modelu rastliny vytvoreného stochastickým L-systémom s vetvením.

Kapitola 7

Overovanie

Overiť funkčnosť laboratória sme sa rozhodli v pilotnom testovaní. Stanovili sme si nasledovné predmety skúmania:

Bod skúmania 1: Žiaci po absolvovaní práce v softvérovom laboratóriu pochopia, čo sú L-systémy, zvládnu matematický formalizmus a budú schopní modelovať jednoduché modely L-systémov.

Bod skúmania 2: Práca v laboratóriu bude vhodná pre cieľovú skupinu žiakov stredných škôl a intuitívne ju zvládnu.

Bod skúmania 3: Implementácia laboratória a jeho nasadenie ako didaktickej pomôcky je vhodná pre rozvoj informatického myslenia u mladých ľudí. Žiaci majú záujem o získavanie nových vedomostí nad rámec učebných osnov.

7.1 Príprava

Ako absolvent Gymnázia Bílikova v Bratislave som oslovil učiteľov informatiky práve na tejto strednej škole. Dostalo sa mi plnej podpory od Mgr. Dominiky Békesovej, ktorá vyučuje informatiku na tomto gymnáziu. Po úvodnej mailovej komunikácii, v rámci ktorej som v skratke prezentoval laboratórium a jeho obsah, sme dohodli moju aktívnu účasť na seminári z informatiky priamo so študentami.

Primárne sme sa sústredili na to, aby študenti overili funkčnosť laboratória ako takého a aby sami intuitívne pochopili, čo sú to L-systémy, na základe vlastného experimentovania a skúmania.

Samotnému testovaniu predchádzala príprava primeraného pracovného listu so zjednodušeným vysvetlením teoretických informácií o L-systémoch a názornými príkladmi (príloha A). Pokyny k navigácii neboli súčasťou pracovného listu, nakoľko sme mali v pláne priamo počas priebehu testovania sledovať, ako sa budú orientovať a ako zvládnu navigáciu v laboratóriu bez pomoci. Bola to cesta, aby sme identifikovali, kde môžeme používateľské rozhranie vylepšiť. Na základe tohto prístupu sme očakávali, že žiaci nepôjdu iba „optimálnymi“ testovacími scenármi, ale nepriamo testovali aj negatívne scenáre.

Na získanie spätnej väzby sme navrhli krátky dotazník (príloha B), ktorý obsahoval 8 jednoduchých otázok. Otázky boli zamerané na zistenie atraktívnosti zvolenej témy a jej pochopenie, na zvládnutie práce v softvérovom laboratóriu a v neposlednom rade otázky zamerané na zistenie možných nedostatkov laboratória a odporúčaní pre jeho ďalší rozvoj. Prostredníctvom Formulárov Google, ktoré sú k dispozícii bezplatne, sme pripravili formulár pre zber dát od žiakov.

Funkčnú verziu aplikácie sme nasadili na GitHub Pages a webovú stránku

sprístupnili žiakom.

7.2 Priebeh

Po dohode s pedagogičkou bolo overenie predmetov skúmania nastavené nasledovne.

Na seminári z informatiky pre študentov 4. ročníka boli vyhradené dve vyučovacie hodiny na prácu s laboratóriom. Vopred pripravený pracovný list dostali študenti na začiatku hodiny v papierovej forme. Úvod do teórie L-systémov bol riešený prostredníctvom jednoduchého ústneho výkladu v trvaní 15 minút. Ďalej nasledovala spoločná práca pri skúšaní si pripravených príkladov. Žiaci plynule prešli do samostatnej práce. Pokračovali v modelovaní príkladov uvedených v pracovnom liste a tí zdatnejší modelovali aj vlastné modely. Ukážka niektorých výsledných prác je uvedená v prílohe C.

Na záver študenti vyplnili dotazník. Prvotná odozva bola pozitívna. Detailná analýza odpovedí žiakov v dotazníkovom prieskume je v nasledujúcej kapitole.

7.3 Zhodnotenie

Na seminári bolo prítomných 14 študentov. Všetci študenti sa aktívne zapojili do procesu overovania laboratória a vyplnili dotazník.

V otázkach s číselným hodnotením boli čísla reprezentované nasledovne:

- 1 = vôbec nevýznamné;
- 2 = nevýznamné;

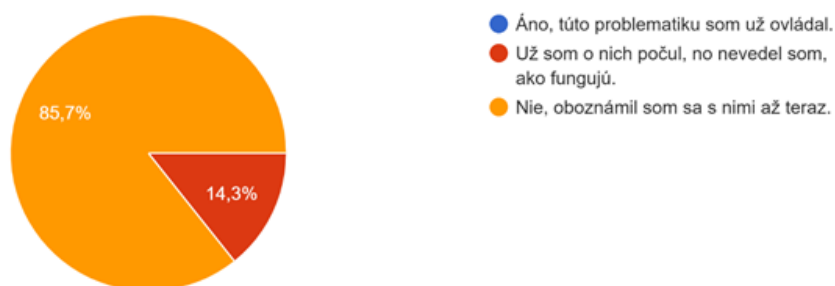
- 3 = sčasti významné;
- 4 = významné;
- 5 = veľmi významné.

1. Otázka: Stretli ste sa už predtým s L-systémami?

Problematika L-systémov nebola pre všetkých žiakov úplne nová. Dvaja žiaci už počuli o L-systémoch bez ďalších znalostí, čo zodpovedá 14,3 %. Pre zvyšných žiakov (85,7 %) bola táto téma nová (obr. č. 7.1).

Stretli ste sa už predtým s L-systémami?

14 odpovedí



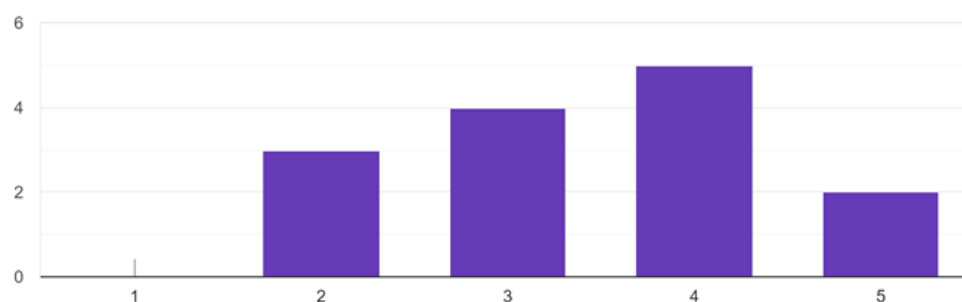
Obr. 7.1: Stretli ste sa už predtým s L-systémami?

2. Otázka: Považujete L-systémy za atraktívnu tému?

Žiaci na stupnici hodnotenia 1 až 5 mali vyjadriť, ako ich zaujala téma. Z odpovedí (obr. č. 7.2) vyplynulo, že pre 85,7 % žiakov sú L-systémy viac-menej zaujímavé, napriek matematickému formalizmu, ktorí sa za nimi skrýva.

Považujete L-systémy za atraktívnu tému?

14 odpovedí



Obr. 7.2: Považujete L-systémy za atraktívnu tému?

3. Otázka: Čo vás na L-systémoch najviac zaujalo?

V tejto otázke boli žiakom ponúknuté 4 možné odpovede, ktoré smerovali na oblasti vizuálnej interpretácie (využitie korytnačej geometrie), generovania fraktálov, modelovania rastlín alebo na prácu v laboratóriu, kedy pri zmene parametrov mohli vizuálne meniť vlastnosti L-systémov (obr. č. 7.3).

Najviac zaujali práve fraktály, 7 žiakov (50 %). Najmenej oslovila korytnačia geometria (14,3 %), čo mohlo byť spôsobené tým, že korytnačka bola pre všetkých už známy pojem. Druhá téma, ktorá oslovila 35,7 % žiakov, bola práve rozmanitosť tvorby L-systémov s využitím parametrizácie a perturbácie. Modelovanie rastlín zaujalo 28,6 % žiakov.



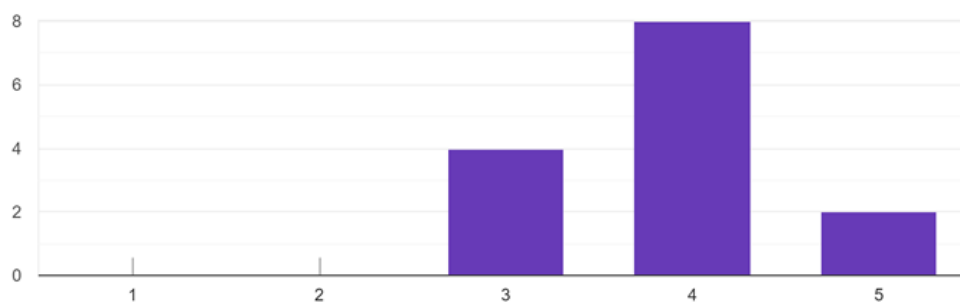
Obr. 7.3: Čo vás na L-systémoch najviac zaujalo?

4. Otázka: Pomohlo vám interaktívne laboratórium pri pochopení princípov L-systémov?

Na stupnici hodnotenia od 1 do 5, všetci žiaci pozitívne ocenili prácu v softvérovom laboratóriu ako užitočnú pre pochopenie L-systémov (obr. č. 7.4). Ani jeden žiak sa nevyjadril, že by mu laboratórium nič neprinieslo. Práve naopak, aj na základe osobných rozhovorov so žiakmi sa ukázalo, že práve takéto vyučovacie hodiny, kedy interaktívnou formou aplikujú získané vedomosti, sú pre nich atraktívne.

Pomohlo vám interaktívne laboratórium pri pochopení princípov L-systémov?

14 odpovedí



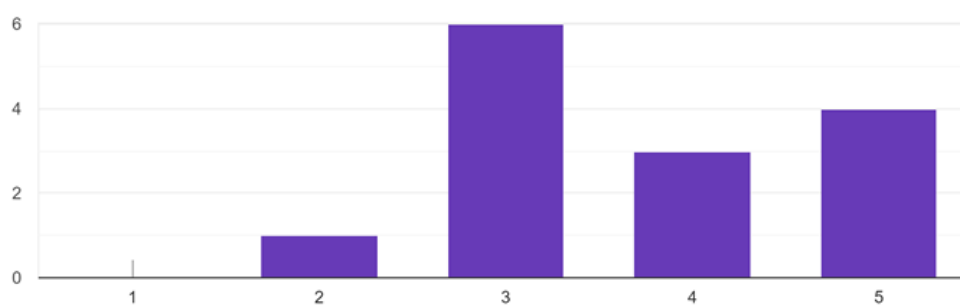
Obr. 7.4: Pomohlo vám interaktívne laboratórium pri pochopení princípov L-systémov?

5. Otázka: Ako intuitívne sa s laboratóriom pracovalo?

Prácu v laboratóriu zvládli bezproblémovo takmer všetci (92,8 %), až na jedného žiaka (obr. č. 7.5). Problémy pri práci vyplývali z nepresnosti myši v kombinácii s drag&drop systémom definovania axiómy a pravidiel.

Ako intuitívne sa s laboratóriom pracovalo?

14 odpovedí



Obr. 7.5: Ako intuitívne sa s laboratóriom pracovalo?

6. Otázka: Čo sa vám na laboratóriu páčilo?

Voľné odpovede na otázku, čo sa páčilo na laboratóriu, prispievajú k potvrdeniu platnosti stanovených predmetov skúmania. Žiaci na laboratóriu ocenili hlavne nasledovné aspekty:

- možnosť modelovať zaujímavé útvary,
- jednoduché a intuitívne používanie,
- široké spektrum možností parametrizácie,
- pomoc pri oboznámení sa s princípmi L-systémov.

7. Otázka: Čo sa vám na laboratóriu nepáčilo, čo vám chýbalo, čo by ste zmenili?

Opäť tu bola zaradená otázka s voľnou odpoveďou. Práve tu sa ukázalo, že technické vybavenie počítačových miestností na našich školách má ešte rezervy. Čo ale bolo viac zaujímavé, boli postrehy študentov, ako zlepšiť ovládanie aplikácie. Na základe týchto odpovedí bolo doimplementovaná možnosť nastavenia automatickej dĺžky kroku korytnačky, ktorá zabezpečí že sa celý systém zmestí na plátno. Žiaci uviedli nasledovné body:

- absencia priameho zadávania axiómy a pravidiel ručne pomocou klávesnice,
- zložité odhadnúť dĺžku kroku tak, aby obrázok nevyčnieval z plátna.

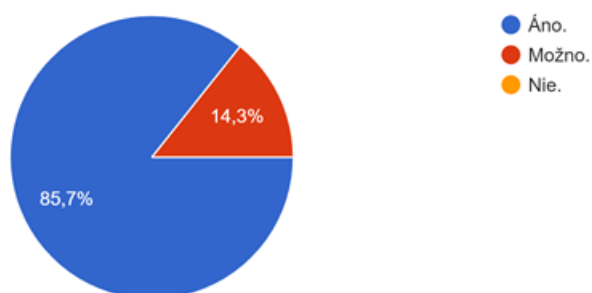
8. Otázka: Odporučili by ste nástroj ďalším žiakom pri výučbe L-systémov?

Posledná otázka bola nepriamo smerovaná na potvrdenie platnosti bodu skúmania 3, teda, či vidia samotní žiaci zmysel v interaktívnej forme výučby.

85,7 % žiakov sa vyjadrilo jednoznačne áno, 14,3 % žiakov možno, teda nikto nezamietol takúto formu výuky (obr. č. 7.6).

Odporučili by ste nástroj ďalším žiakom pri výučbe L-systémov?

14 odpovedí



Obr. 7.6: Odporučili by ste nástroj ďalším žiakom pri výučbe L-systémov?

V našom prvom bode skúmania sme predpokladali, že po absolvovaní práce v softvérovom laboratóriu žiaci budú schopní zvládnuť matematický formalizmus pri modelovaní L-systémov. Na základe odpovedí žiakov na otázku č. 1 a č. 4 a na základe toho, že každý žiak dokázal vytvoriť funkčný model, či už podľa pracovného listu alebo vlastný, môžeme prehlásiť, že bod 1 sa potvrdil.

Na základe odpovedí na otázku č. 5, č. 6 a č. 7 je možné povedať, že práca v laboratóriu bola vhodná pre žiakov stredných škôl, ktorý ju intuitívne zvládli a nenarazali na žiadne závažné problémy. Týmto môžeme uznať platnosť bodu 2.

Platnosť tretieho bodu skúmania potvrdzujú odpovede na otázku č. 2, č. 3 a č. 8, ktoré dokázali že implementácia laboratória a jeho nasadenie ako didaktickej pomôcky je vhodná pre rozvoj informatického myslenia u mladých ľudí a podnecuje záujem žiakov o získavanie nových vedomostí nad

rámec učebných osnov.

Na základe pripomienok a rozhovorov so žiakmi sa nám taktiež podarilo nástroj vylepšiť implementovaním automatického výpočtu dĺžky kroku. Veríme, že táto funkcionality žiakom umožní ešte kvalitnejší zážitok pri ďalšom skúmaní L-systémov.

Pilotné testovanie softvérového laboratória na skúmanie L-systémov pre žiakov strednej školy celkovo hodnotíme ako úspešne realizované.

Kapitola 8

Záver

Dynamická doba si žiada maximálnu prispôsobivosť. Do popredia sa dostáva aplikovaný prístup k matematickým, či informatickým vedným disciplínam. Matematické formalizmy, grafické interpretácie objektov reálneho sveta, modelovanie rastu buniek, rastlín, stromov, jedným slovom L-systémy majú čo povedať širokému spektru ľudí. Bežne sa využívajú vo virtuálnych simuláciách, v biológii, v počítačovej grafike a mnohých ďalších odvetviach.

Cieľom diplomovej práce bolo vytvorenie softvérového laboratória na skúmanie L-systémom práve ako vzdelávací program pre žiakov strednej školy.

Laboratórium predstavuje efektívny spôsob objavovať digitálny svet rastlín. Softvérové laboratórium, ktoré je predmetom tejto diplomovej práce, využíva vedecké poznatky v oblasti L-systémov. Realizáciou takéhoto laboratória významne zvyšujeme dostupnosť vedeckých poznatkov medzi širšou verejnosťou, medzi mladými ľuďmi. Pri tvorbe obsahu a používateľského rozhrania sme mali na pamäti predovšetkým plánovanú vekovú skupinu koncových používateľov a tomu bol prispôsobený jeho obsah. Laboratórium je primárne určené žiakom strednej školy. Analytické a matematické prístupy, možnosť realizácie vlastných experimentov umožňujú študentom vyťažiť uži-

točné informácie z im doposiaľ neznámych oblastí a posúvajú možnosti ich riešení na novú úroveň.

Na základe výsledkov prieskumu môžeme prehlásiť, že tento cieľ sa nám podarilo splniť. Žiaci prácu s laboratóriom zvládli na výbornú, pochopili teóriu modelovania L-systémov a niektorým žiakom sa podarili vygenerovať veľmi zaujímavé modely rastlín a fraktálov.

Softvérové laboratórium ocenia nie len žiaci, ale aj pedagógovia. Interaktívne didaktické výučbové programy sú pre žiakov podnetné, inovatívne, zábavné a zároveň plnia vzdelávacie funkcie. Je to vhodný spôsob komunikácie s mladými ľuďmi, ktorý rozvíja ich informatické myslenie a podporuje záujem mladej generácie o štúdium moderných vedeckých disciplín.

Aplikácia má viacero oblastí, ktoré je možné ďalej rozvíjať. Odporúčaním do budúcnosti by mohlo byť, aby sa implemetovala aj možnosť zápisu axiém a pravidiel pomocou klávesnice, keďže tento spôsob niektorí študenti postrádali. Zároveň je tu priestor rozšíriť aplikáciu o zvyšné typy L-systémov, ako kontextové alebo parametrické L-systémy. Ďalším krokom by mohla byť reprezentácia v 3D priestore, ktorá by do skúmania vniesla nový uhol pohľadu.

Literatúra

- [AD86] H. Abelson and A.A. DiSessa. *Turtle Geometry: The Computer as a Medium for Exploring Mathematics*. Artificial Intelligence Series. AAAI Press, 1986.
- [CC00] Michael E Caspersen and Henrik Bærbak Christensen. Here, there and everywhere- on the recurring use of turtle graphics in cs 1. In *ACM International Conference Proceeding Series*, volume 8, pages 34–40, 2000.
- [Duš06] Martin Dušek. Modelování rostlin pomocí l-systému. Bakalářská práce, České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Praha, 2006.
- [Mar09] Ján Marček. L-systémy v 3d grafike. Bakalárska práca, Vysoké učení technické, Fakulta informačních technologií, Brno, 2009.
- [MOR17] Tereza MORAVCOVÁ. L-systémy v grafickém designu. Diplomová práce, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno, 2017.
- [PHF⁺96] P. Prusinkiewicz, J.S. Hanan, F.D. Fracchia, A. Lindenmayer, D.R. Fowler, M.J.M. de Boer, and L. Mercer. *The Algorithmic*

Beauty of Plants. The Virtual Laboratory. Springer New York, 1996.

[Pru86] Przemysław Prusinkiewicz. Graphical applications of l-systems. In *Proceedings of graphics interface*, volume 86, pages 247–253, 1986.

[Tul18] Jana Tuliková. Fraktály. Bakalárska práca, Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Brno, 2018.

Zoznam obrázkov

3.1	Konštrukcia krivky snehovej vločky [PHF ⁺ 96].	7
3.2	Postupná derivácia L-systému.	10
3.3	L-systém s vetvením [PHF ⁺ 96].	12
3.4	Reprezentácie stochastického L-systému [Duš06].	14
3.5	Fázy šírenia signálu v kontextovom L-systéme [PHF ⁺ 96]. . . .	16
3.6	Zmenšujúci sa parametrický systém [PHF ⁺ 96]	17
3.7	Orientácia korytnačky v 2D (x, y, α)	19
5.1	Návrh používateľského rozhrania	30
6.1	Ukážka používateľského rozhrania laboratória.	37
6.2	Ukážka fraktálu vytvoreného DOL-systémom.	38
6.3	Ukážka modelu rastliny vytvoreného stochastickým L-systémom s vetvením.	38
7.1	Stretli ste sa už predtým s L-systémami?	42
7.2	Považujete L-systémy za atraktívnu tému?	43
7.3	Čo vás na L-systémoch najviac zaujalo?	44
7.4	Pomohlo vám interaktívne laboratórium pri pochopení princí- pov L-systémov?	45
7.5	Ako intuitívne sa s laboratóriom pracovalo?	45

7.6	Odporučili by ste nástroj ďalším žiakom pri výučbe L-systémov?	47
-----	--	----

Dodatok A

Pracovný list

L-systémy

L-systém alebo **Lindenmayerov systém** je druh formálnej gramatiky (formálny jazyk s prepisovacími pravidlami) známy najmä vďaka svojmu použitiu pri modelovaní vývinu rastlín, ako aj ďalším biologickým aplikáciám. Taktiež môžu byť použité aj na generovanie niektorých typov fraktálov.

Prepisovací systém - na začiatku je axióma (napr. znak/symbol, niekoľko znakov/slovo) a je daných niekoľko prepisovacích pravidiel, ktoré sa paralelne aplikujú na prvé slovo. Tak vznikne druhé slovo, resp. i-té slovo podľa počtu iterácií aplikovania pravidiel.

L-systémy sa interpretujú pomocou geometrických metód, napr. pomocou **korytnačej geometrie**, a spolu vytvorili univerzálny nástroj na modelovanie rastu rastlín v prírode.

Interpretácia základov jazyka pre korytnačku:

- **F** je pohyb vpred (**f** je pohyb bez kreslenia čiary)
- **+** je otočenie vľavo
- **-** je otočenie vpravo

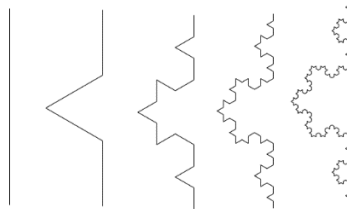
Úlohy – Fraktály

Fraktál - geometrický objekt vybudovaný pomocou rekursie. Ide o nepravidelný, fragmentovaný geometrický tvar, ktorý môže byť rozdelený na časti, z ktorých je každá aspoň približne podobná, zmenšená kópia celého geometrického tvaru. Táto vlastnosť tiež býva nazývaná sebepodobnosť.

Kochova snehová vločka

Vytvorte jednu z prvých objavených fraktálnych kriviek. Postupne zvyšujte počet iterácií.

Axióma: **F**
Pravidlo: **F** → **F + F - - F + F**
Uhol: **60°**

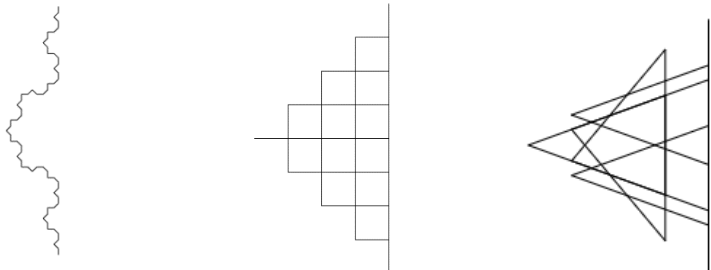


[F]
[F+F--F+F]
[F+F--F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F]
[F+F--F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F--F+F--F+ ...

Variácie s uhlom a axiómou

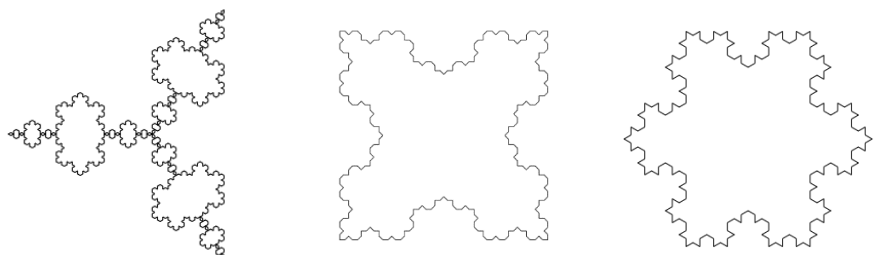
Vyskúšajte upraviť uhol:

45, 90, 110, ...



Upravte axióm systému:

F + + F + + F, pre uhol 60°
F + + F + + F + + F, pre uhol 45°
F - - F - - F, pre uhol 60°



Kochov ostrov

Vytvorte Kochov ostrov, pričom využite alternatívny zápis pre dlhé pravidlá. (Pozor! Nepárne iterácie sa nevykreslia. Skúste sa zamyslieť prečo.)

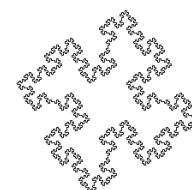
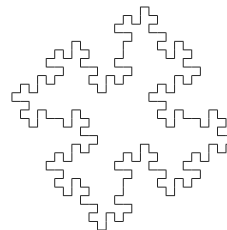
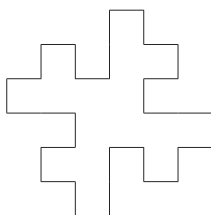
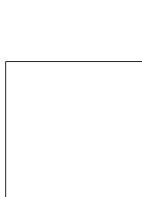
Axióma: **F - F - F - F**

Pravidlá: **F → P Q**

P → F - F + F + F

Q → F - F - F + F

Uhol: **90°**



Parametrizácia a perturbácia

Panel náhodnosti umožňuje vnieť do našich obrazcov chcenú chybu. Jej mieru vieme ovládať pomocou posúvačov “Faulty step” / “Faulty turn” a k nim prislúchajúcim posúvačom “Probability”, ktoré menia pravdepodobnosť výskytu danej chyby.

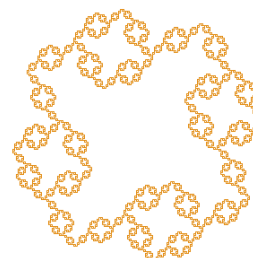
Preskúmajte ďalšie fraktály a využite pritom možnosti parametrizácie farby, hrúbky pera a náhodnosti. Jeden z vytvorených obrázkov si uložte.

Rôzne varianty **fraktálov**:

Axióma: **F - F - F - F**

Pravidlo: **F → F F - F - F - F - F + F**

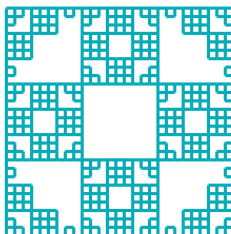
Uhol: **90°**



Axióma: **F - F - F - F**

Pravidlo: **F → F F - F - F - F - F F**

Uhol: **90°**



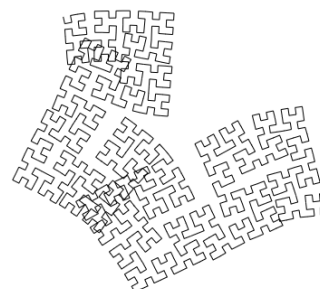
Hilbertova krivka:

Axióma: **P**

Pravidlá: **P → + Q F - P F P - F Q +**

Q → - P F + Q F Q + F P -

Uhol: **90°**



Úlohy – Modelovanie rastlín

Pre L-Systémy s vetvením rozšírime abecedu o dva nové znaky [a]. Pri interpretovaní slova i-tej generácie budeme [zátvorku chápať takto: korytnačka (pero) sa pred zátvorkou rozklonuje a svojmu klonu zverí interpretovanie nasledujúcej časti slova až po zodpovedajúcu] zátvorku. Ona sama paralelne pokračuje v interpretovaní slova za touto zátvorkou. Klonovanie tu predstavuje delenie rastových buniek a ich ďalší paralelný rast podľa zodpovedajúcich programov (zákonitostí).

Po každom vetvení, čiže po symbole], je možné pridať list, kvet alebo plod. Túto funkcionálnu obsahujú **panel štruktúr**.

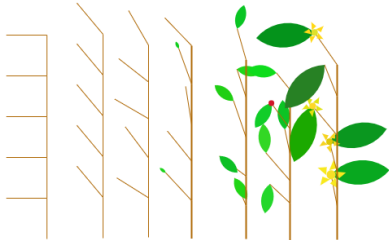
Byliny a stromy

Vyskúšajte symboly vetvenia pri vytváraní modelov rastlín. Experimentujte s iteráciami, parametrami, náhodnosťou, či štruktúrami. Opäť si jeden z vytvorených obrázkov si uložte.

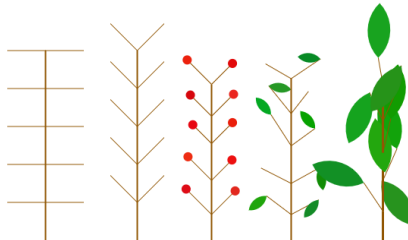
Základné vetviace sa štruktúry:

Axióma: **P**

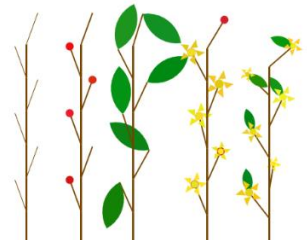
Pravidlo: **$P \rightarrow F [+ F] P$**



Pravidlo: **$P \rightarrow F [+ F] [- F] P$**



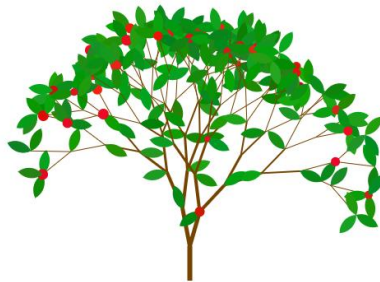
Pravidlo: **$P \rightarrow F [+ F] F [- F] P$**



Stromovité štruktúry:

Axióma: **P**

Pravidlo: **$P \rightarrow F [+ P] [- P]$**



Axióma: **F F F P**

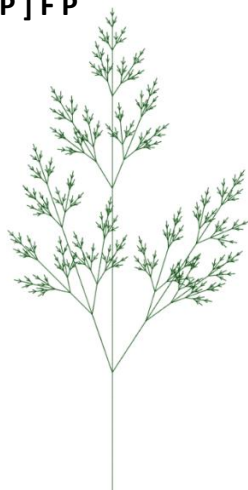
Pravidlo: **$P \rightarrow F [+ P] [- P]$**



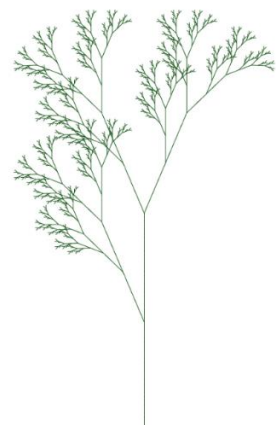
Byliny:

Axióma: **P**

Pravidlá: **$P \rightarrow F [+ P] [- P] F P$
 $F \rightarrow F F$**



Pravidlá: **$P \rightarrow F [+ P] F [- P] + P$
 $F \rightarrow F F$**



Systémy s nedeterminizmom

Ide o nahodný výber medzi pravidlami definovanými pre rovnaký znak.

Vyskúšajte definovať viacero pravidiel pre jeden znak a vykreslite tieto systémy viac krát.

Axióma: **F**

Pravidlá: **$F \rightarrow F[+F]F[-F]F$**

$F \rightarrow F[+F]$

$F \rightarrow F[-F]$



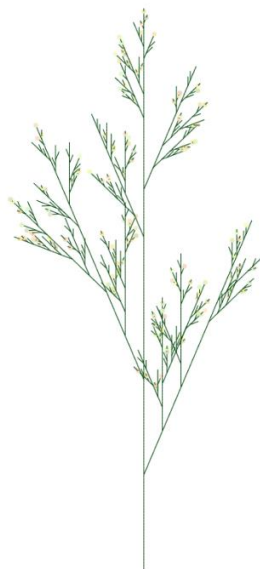
Axióma: **P**

Pravidlá: **$P \rightarrow F[QP]F[QP]QP$**

$F \rightarrow FF$

$Q \rightarrow +$

$Q \rightarrow -$



Skúste posledné **Q** v pravidle nahradiť znakom **F**.

Skúste pravidlo **$Q \rightarrow +$** zadať ešte raz. Vedeli by ste povedať, čo to spôsobí?

Dodatok B

Dotazník

Laboratórium L-systémov

Volám sa Norbert Jurík a som študentom FMFI. Implementácia interaktívneho laboratória na skúmanie L-systémov je predmetom mojej diplomovej práce. Chcel by som vás poprosiť o vyplnenie krátkeho dotazníka. Vaša spätná väzba mi pomôže pri posudzovaní užitočnosti, hľadani potencionálnych chýb alebo vylepšení samotného nástroja.

<https://l-system-lab.github.io/>

Vopred ďakujem za odpovede :)

* Povinné

1. Stretli ste sa už predtým s L-systémami? *

Označte iba jednu elipsu.

- ☐ Áno, túto problematiku som už ovládal.
- ☐ Už som o nich počul, no nevedel som, ako fungujú.
- ☐ Nie, oboznámil som sa s nimi až teraz.

2. Považujete L-systémy za atraktívnu tému? *

Označte iba jednu elipsu.

	1	2	3	4	5	
Vôbec	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Veľmi

3. Čo vás na L-systémoch najviac zaujalo? *

Začiarknite všetky vyhovujúce možnosti.

- ☐ Využitie korytnačej geometrie pri ich interpretácií.
- ☐ Možnosť generovania fraktálov.
- ☐ Možnosť modelovania rastlín.
- ☐ Rozmanitosť ich tvorby pomocou parametrizácie a perturbácie.
- ☐ Iné: _____

4. Pomohlo vám interaktívne laboratórium pri pochopení princípov L-systémov? *

Označte iba jednu elipsu.

	1	2	3	4	5	
Vôbec	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Veľmi

5. Ako intuitívne sa s laboratóriom pracovalo? *

Označte iba jednu elipsu.

	1	2	3	4	5	
Zle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Dobre

6. Čo sa vám na laboratóriu páčilo?

7. Čo sa vám na laboratóriu nepáčilo, čo vám chýbalo, čo by ste zmenili?

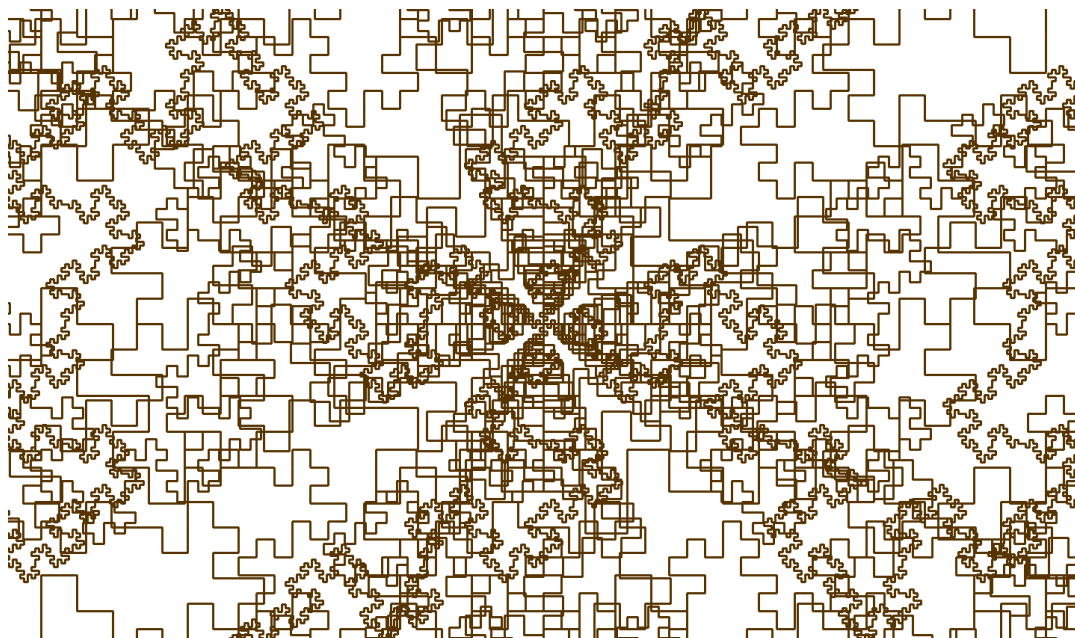
8. Odporučili by ste nástroj ďalším žiakom pri výučbe L-systémov? *

Označte iba jednu elipsu.

- ☐ Áno.
- ☐ Možno.
- ☐ Nie.

Dodatok C

Ukážky študenských prác



Dodatok D

Elektronická príloha

Zdrojový kód softvérového laboratória na skúmanie L-systémov tvorí elektronickú prílohu tejto práce. Taktiež je dostupný online na adrese <https://github.com/NorbertJu/diploma-thesis>. Skompilovaná verzia aplikácie sa nachádza na adrese <https://l-system-lab.github.io>.