

Sem vložte zadání Vaší práce.



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNologiÍ
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

Engine pro renderování a procedurální generování voxelových světů

Bc. Lukáš Hepner

Katedra softwarového inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Adam Vesecký

11. ledna 2022

Poděkování

Doplňte, máte-li komu a za co děkovat. V opačném případě úplně odstraňte tento příkaz.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 2373 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů, tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu) licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 11. ledna 2022

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2022 Lukáš Hepner. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Hepner, Lukáš. *Engine pro renderování a procedurální generování voxelových světů*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2022.

Abstrakt

V několika větách shrňte obsah a přínos této práce v češtině. Po přečtení abstraktu by se čtenář měl mít čtenář dost informací pro rozhodnutí, zda chce Vaši práci číst.

Klíčová slova Nahrad'te seznamem klíčových slov v češtině oddělených čárkou.

Abstract

Sem doplňte ekvivalent abstraktu Vaší práce v angličtině.

Keywords Nahrad'te seznamem klíčových slov v angličtině oddělených čárkou.

Obsah

Úvod	1
1 Cíl práce	3
2 Modelování rostlin s využitím L-systémů	5
2.1 L-systém	6
2.2 Interpretace řetězců pomocí želvy	6
2.3 Větvění v L-systémech	6
2.4 Stochastické L-systémy	8
2.5 Implementace	10
2.5.1 Formát L-systému	10
2.5.2 Želva	10
2.5.3 Rozšířená abeceda	11
2.5.4 Ovládání želvy	12
Závěr	15
Literatura	17
A Seznam použitých zkratek	19
B Obsah přiloženého CD	21

Seznam obrázků

2.1	Identické stromy	5
2.2	Kvadratické Kochovy ostrovy	7
2.3	Struktury připomínajících rostliny	8
2.4	Využití stochastického L-systému	9

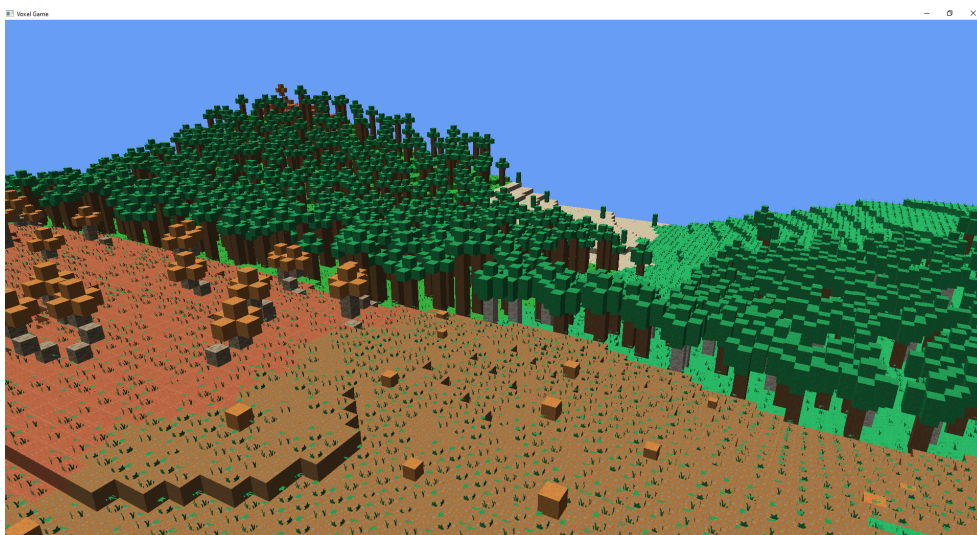
Úvod

Cíl práce

Modelování rostlin s využitím L-systémů

Herní svět obsahuje velké množství vegetace a ač jsou si všechny stromy, které typově podobné, hráč si velice rychle všimne, že jsou identické. Na obrázku 2.1 vidíme tři druhy stromů, které jsou zkopírované po scéně. Stromy v levé zadní části mají různou výšku, přesto působí umělým dojmem.

Stromy v reálném světě jsou si podobné – rozeznáváme jednotlivé druhy stromů, přesto neexistují dva stejné stromy. Pokud druh stromu zapíšeme formální gramatikou nazývanou L-systém, docílíme podobné struktury stromů, které se budou lišit v detailech.



Obrázek 2.1: Identické stromy

2.1 L-systém

L-systém nebo také Lindenmayerův systém je paralelní přepisovací systém vyvinutý maďarským teoretickým biologem a botanistou Aristidem Lindenmayerem v roce 1968. L-systém je typ formální gramatiky skládající se z abecedy, přepisovacích pravidel a počátečního axiomu. Pomocí postupného derivování počátečního axiomu je možné simulovat vývoj rostliny v čase [1].

2.2 Interpretace řetězců pomocí želvy

Řetězce lze graficky reprezentovat pomocí želvy, konzumující symboly abecedy. Každý symbol určuje akci, kterou má želva vykonat. Želva se může pohybovat ve 2D nebo 3D prostoru. Ve 2D si můžeme interpretaci představit jako želvu, držící tužku, pohybující se po papíře.

Želvu lze reprezentovat jako trojici (x, y, α) , kde (x, y) představuje kartézské souřadnice reprezentující polohu v prostoru a α úhel kam želva směřuje. Zadáním délky kroku d a změny úhlu δ lze želvu ovládat pomocí následujících symbolů.

- F – Posun dopředu o délku d . Stav želvy se změní na (x', y', α) , kde $x = x + d \cos \alpha$ a $y = y + d \sin \alpha$. Mezi body (x, y) a (x', y') je nakreslena čára.
- + – Rotace doleva o úhel δ . Nový stav želvy $(x, y, \alpha + \delta)$.
- - – Rotace doprava o úhel δ . Nový stav želvy $(x, y, \alpha - \delta)$.

Nechť je definován následující L-systém. Bud' ω počáteční axiom, p přepisovací pravidlo, $\delta = 90^\circ$ a d zmenšené čtyřnásobně pro každý obrázek [2].

$$\omega : F - F - F - F$$

$$p : F \rightarrow F - F + F + FF - F - F + F$$

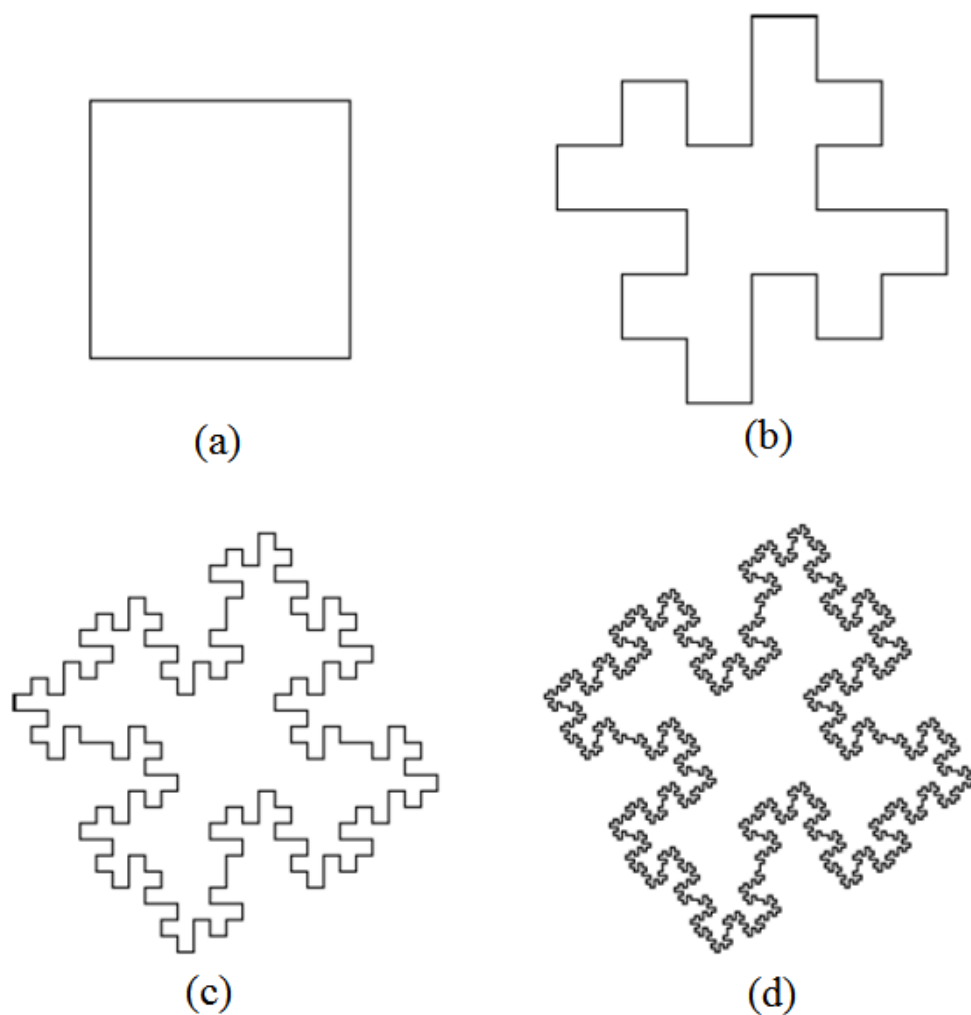
Želva interpretující daný L-systém generuje kvadratické Kochovy ostrovy 2.2. Obrázky jsou vygenerovány derivacemi o délce 0 až 3.

2.3 Větvení v L-systémech

S danými přepisovacími pravidly není možné generovat větvíci se struktury. Želva vždy pokračuje od své poslední pozice. Říše rostlin je dominovaná větvicemi se strukturami, potřebujeme proto matematické vyjádření této skutečnosti.

Větvení v řetězci můžeme reprezentovat pomocí dvou symbolů $[$ a $]$, kde $[$ značí začátek větve a $]$ konec větve [3].

Symbolsy jsou interpretovány želvou následovně:



Obrázek 2.2: Kvadratické Kochovy ostrovy

- [– Ulož atributy želvy do zásobníku.
-] – Načti atributy želvy ze zásobníku a smaž je z vrcholu zásobníku (operace pop). Při této operaci není nakreslená žádná čára.

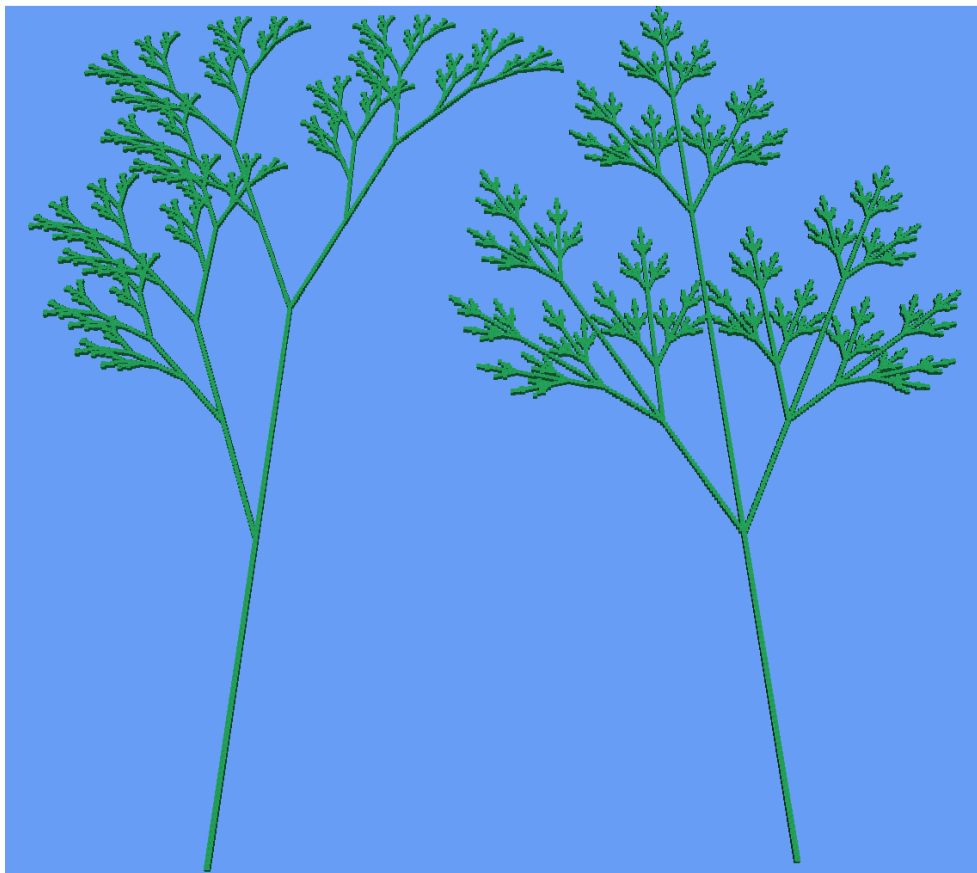
Díky nově přidaným symbolům lze generovat struktury připomínající rostliny. Struktury na obrázku 2.3 jsou generované následujícími L-systémy:

$$1. \delta = 20^\circ$$

$$\omega : E$$

$$p1 : F \rightarrow FF$$

$$p2 : E \rightarrow F[+E]F[-E] + E$$



Obrázek 2.3: Struktury připomínajících rostliny generované pomocí závorkovaného systému

$$2. \delta = 25,7^\circ$$

$$\omega : E$$

$$p1 : F \rightarrow FF$$

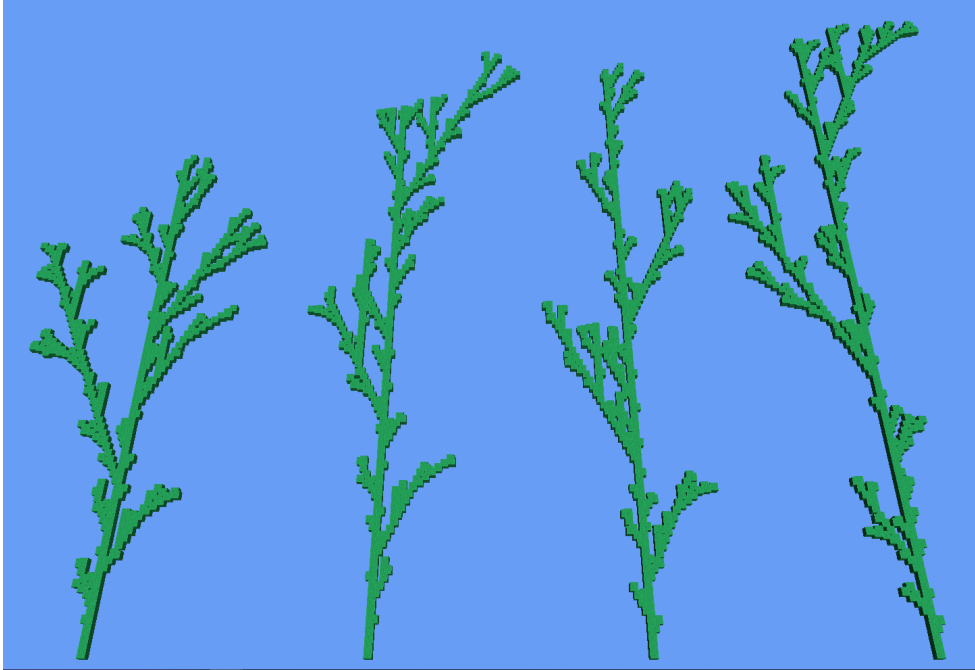
$$p2 : E \rightarrow F[+E][-E]FE$$

L-systém 1 generuje rostlinu vlevo, L-systém 2 generuje rostlinu vpravo.

2.4 Stochastické L-systémy

Rostliny generované deterministickým L-systémem jsou všechny stejné. Jejich použití v scéně by vytvářelo stejný efekt, který je popsán na začátku kapitoly.

K předejití tohoto efektu je nutné zavést variace v rámci druhu. Náhodná interpretace řetězce má limitované využití. Změna úhlu větvení, šířky a výšky



Obrázek 2.4: Využití stochastického L-systému

segmentů rostliny zachovávají topologii struktury, ze které je generovaná. Stochastické L-systémy mohou měnit topologii struktury [4].

-systém, který byl do teď používán nemohl mít více přepisovacích pravidel pro stejný symbol abecedy. Pokud má stochastický L-systém více přepisovacích pravidel, je z nich vybrána jedna s pravděpodobností $1/n$, kde n je počet přepisovacích pravidel pro daný symbol abecedy ¹.

Scéna 2.4 byla vygenerována za pomoci stochastického L-systému, kde:

$$\delta = 25,7^\circ$$

$$\omega : F$$

$$p1 : F \rightarrow F[+F]F[-F]F$$

$$p2 : F \rightarrow F[+F]F$$

$$p3 : F \rightarrow F[-F]F$$

¹Tato definice se liší, od definice uvedené ve [4]. Tento způsob náhodného výběru je použit v implementaci, kde pravděpodobností distribuci zastupuje několikanásobné zopakování přepisovacího pravidla.

2.5 Implementace

2.5.1 Formát L-systému

L-systém může být načten ze souboru pomocí třídy `LSystemParser`. L-systém musí mít následující formát:

```
yaw_angle pitch_angle shring_ratio
axiom
letter > production
.
.
.
letter > production
```

Soubor může obsahovat za sebou jdoucí L-systémy. `LSystemParser` je vrátí jako pole. Soubor může obsahovat komentáře na nových řádcích, začínající symbolem `#`.

Třída `LSystem` obsahuje gramatiku a tři atributy specifikující úhel náklonu podle osy *y* (*yaw*), podle osy *x* (*pitch*) a změnu velikosti bloku. Poslední atribut je využit při rozvětvení rostliny. Potomci mateřské větve by se měly řídit postulátem Leonarda da Vinci: „všechny větve stromu, v každé úrovni jeho růstu jsou v součtu jejich tloušťky rovné tloušťce kmene pod nimi.“ V případě dvojitého rozvětvení, tloušťky mateřské větve w_1 , tloušťky potomků w_2 dostaneme rovnici [5]:

$$w_1^2 = 2w_2^2$$
$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$$

Hodnotu 0,7 je možné nalézt v L-systémech modelující keře.

2.5.2 Želva

Třída `Turtle` rozšiřuje pohyb želvy — popsané v kapitole Interpretace řetězců pomocí želvy — do 3D prostoru. Vnitřní stav želvy určují následující atributy:

- Pozice v prostoru.
- Velikost bloku vytvořeného želvou.
- Barva použitá pro kreslení (výstupní pole).
- Yaw — rotace podle osy *y*.
- Pitch — rotace podle osy *x*.

Želva si udržuje tři navzájem kolmé směrové vektory (nahoru, dopředu, doprava) jednotkové délky, které využívá pro pohyb po scéně. Vektory jsou aktualizované po každé rotaci. Pro výpočet je nutné znát vektor směřující kolmo vzhůru vůči scéně (WORLD_UP). Generovaný svět je plochý, proto lze tento vektor nahradit konstantním vektorem $(0, 1, 0)$.

```
glm::vec3 front;
front.x = cos(glm::radians(Yaw_)) * cos(glm::radians(Pitch_));
front.y = sin(glm::radians(Pitch_));
front.z = sin(glm::radians(Yaw_)) * cos(glm::radians(Pitch_));

Front_ = glm::normalize(front);
Right_ = glm::normalize(glm::cross(Front_, WORLD_UP));
Up_ = glm::normalize(glm::cross(Right_, Front_));
```

Délku x v rovině určené osami x a z lze spočítat jako délku přilehlé odvěsny. $\cos(Yaw) = x/h$, kde h je délka přepony. Víme, že vektor má jednotkovou délku, proto $h = 1$. Stejný postup aplikujeme pro rovinu určenou osami x a y .

Tímto způsobem dopočítáme délky y a z vektoru směřujícího dopředu a normalizujeme ho. Jelikož jsou na sebe vektory kolmé, využijeme vektorového součinu, jehož výsledkem je vektor kolmý k oběma původním vektorům. Všechny vektory je nutné normalizovat, aby se předešlo jejich zkracování s tím, jak se Pitch blíží $\pm 90^\circ$.

K zamezení převrácení os jsou z definičního oboru Pitch vyjmuty násobky 90° .

```
if (Helpers::Math::Equal(cos(glm::radians(Pitch_)), 0.0f))
    Pitch_ -= 0.01f;
```

Výsledná nepřesnost je menší než maximální rozdíl dvou čísel typu float ϵ , která jsou považována za stejná. Funkce Equal porovnává desetinná čísla s přesností ϵ .

Želva vystavuje metody pro pohyb ve všech třech osách využívající vektorů Up_, Right_, Forward_. K pozici želvy je přičten patřičný vektor naškálovaný délkou pohybu. Např.:

```
void LSystems::Detail::Turtle::MoveForward(float dz) {
    Position_ += Front_ * dz;
}
```

2.5.3 Rozšířená abeceda

Následující symboly abecedy mají speciální význam pro jejich interpretaci.

- U a u — Posuň želvu nahoru.

- F a f — Posuň želvu dopředu.
- x — Zmenši želvu.
- X — Zvětši želvu.
- S — Nastav původní velikost želvy.
- + — Rotuj želvu doleva podle osy y.
- - — Rotuj želvu doprava podle osy y.
- ^ — Rotuj želvu nahoru podle osy x.
- & — Rotuj želvu dolů podle osy x.
- [— Ulož kopii želvy na vrchol zásobníku.
-] — Vyjmi želvu z vrcholu zásobníku.
- 0 – 9 — Přepni výstupní pole.

L-systém může obsahovat jakýkoliv jiný ASCII symbol — mimo bílých znaků a # — určený pro expanzi přepisovacích pravidel. Není želvou interpretován.

2.5.4 Ovládání želvy

Implementace želvy se nachází ve jmenném prostoru `LSystems:Detail`, uživatel by ji neměl využívat přímo, ale je pro něj připravena třída `LSystemExecutor` zajišťující generování herních objektů z poskytnutého L-systému.

`LSystemExecutor` umožňuje generovat herní objekty na základě stochastického L-systému — topologie struktury výsledného modelu se může měnit mezi jednotlivými voláními generátoru na základě parametru `salt`. L-systém lze náhodně interpretovat na základě těchto parametrů:

- Rozsah počtu provedených derivací.
- Variace v rotaci želvy. K úhlu, o který se má želva otočit, se přičte $x \cdot \text{původní úhel}$, kde x je z `[-angleVar, angleVar]`. Defaultní hodnota `angleVar` je 0,2.
- Výchozí velikost generovaných objektů. Lze určit rozsahem korespondujícím s počtem derivací.

Přidání náhodného úhlu má výrazný efekt na organický vzhled rostliny. Na obrázku níže lze vidět akáciové stromy vyznačující se plochou korunou. V definici L-systému jsou všechny listy ve stejné výšce, výsledný rozdíl ve výškách je způsoben opakovaným rotováním želvy. V zápisu lze vidět, že se

želva otočí o 45° nahoru (^), pokládá větve (u, U), skloní se o 45° (&) a pokládá listy (F). Listy by tak měly být ve stejné rovině, ale nejsou.

L-systém generující akácie:

```
45.0 45.0 0.8
# make sure the plant has splits
# random lenght stem - then split
^uA1S&F+F+F+F
U > uU
A > +uuE
A > -uE
A > +uE
A > -E
A > uuE
A > uE
# top of the plant
E > x[++++UE1S&F+F+F+F]+UE
E > x[++++++UE1S&F+F+F+F]++UE
E > x[++UE1S&F+F+F+F]-UE
```

Závěr

Literatura

- [1] Togelius, J.; Shaker, N.; Nelson, M. J.: Grammars and L-systems with applications to vegetation and levels. In *Procedural Content Generation in Games: A Textbook and an Overview of Current Research*, editace N. Shaker; J. Togelius; M. J. Nelson, Springer, 2016, str. 75, [cit. 2022-01-10].
- [2] Przemyslaw Prusinkiewicz, A. L.: Graphical modeling using L-systems. In *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer, 1996, str. 7, [cit. 2022-01-10].
- [3] Przemyslaw Prusinkiewicz, A. L.: Graphical modeling using L-systems. In *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer, 1996, str. 24, [cit. 2022-01-10].
- [4] Przemyslaw Prusinkiewicz, A. L.: Graphical modeling using L-systems. In *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer, 1996, str. 28, [cit. 2022-01-10].
- [5] Przemyslaw Prusinkiewicz, A. L.: Modeling of trees. In *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer, 1996, str. 57, [cit. 2022-01-10].

Seznam použitých zkratek

GUI Graphical user interface

XML Extensible markup language

Obsah přiloženého CD

	readme.txt	stručný popis obsahu CD
	exe	adresář se spustitelnou formou implementace
	src	
	impl.....	zdrojové kódy implementace
	thesis	zdrojová forma práce ve formátu L ^A T _E X
	text	text práce
	thesis.pdf	text práce ve formátu PDF
	thesis.ps	text práce ve formátu PS