



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**GENEROVÁNÍ 2D MAP PRO POČÍTAČOVÉ HRY**  
2D MAP GENERATION FOR COMPUTER GAMES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**KRYŠTOF GLOS**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MICHAL MATÝŠEK**

**BRNO 2021**

## Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na jednotlivé metody procedurálního generování z hlediska herního průmyslu, zejména v oblasti vytváření map. Cílem této práce, je vytvoření hry žánru Colony-sim, využívající procedurální generování obsahu.

Zaměřil jsem se na analýzu různých způsobů vytváření obsahu a rozbor metod pomocí kterých lze automatizovaně generovat herní prostředí.

Zvolenou metodou pro tvoření herní oblasti byl Perlinův šum, s následným využitím výškových map. V práci představuji algoritmus, jenž na základě vstupních parametrů generuje funkční, unikátní a neopakující se mapy, což zajišťuje opakovatelnou hratelnost. Klíčovým výstupem této práce, je hra implementující procedurální algoritmus generující mapy, který je aplikovatelný v širokém spektru 2D her.

## Abstract

This work focuses on individual methods of procedural generation in the context of the gaming industry, particularly in the realm of map creation. The aim of this study is to develop a Colony-sim genre game utilizing procedural content generation.

I have concentrated on analyzing various methods of content creation and scrutinizing techniques through which gaming environments can be automatedly generated.

The chosen method for crafting the gaming area was Perlin noise, coupled with the subsequent utilization of height maps. In this work, I present an algorithm that, based on input parameters, generates functional, unique, and non-repeating maps, ensuring repetitive playability. The key outcome of this study is the implementation of a game incorporating a procedural algorithm for map generation, applicable across a broad spectrum of 2D games.

## Klíčová slova

Procedurální generování obsahu, 2D mapy, 2D hry, počítačové hry, hry o přežití

## Keywords

Procedural content generation, 2D maps, 2D games, computer games, survival games

## Citace

GLOS, Kryštof. *Generování 2D map pro počítačové hry*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Michal Matýšek

# Generování 2D map pro počítačové hry

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana X... Další informace mi poskytli... Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Kryštof Glos  
27. února 2024

## Poděkování

V této sekci je možno uvést poděkování vedoucímu práce a těm, kteří poskytli odbornou pomoc (externí zadavatel, konzultant apod.).

# Obsah

<b>1</b>	<b>Vytváření obsahu v herním světě</b>	<b>4</b>
1.1	Způsoby generování obsahu . . . . .	4
1.1.1	Mechanické generování obsahu . . . . .	5
1.1.2	Procedurální generování obsahu . . . . .	5
1.2	Procedurální generování v herním průmyslu . . . . .	7
1.2.1	Text . . . . .	7
1.2.2	Krajina a úrovně . . . . .	8
1.2.3	Textury . . . . .	8
1.2.4	Zvuky a hudba . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Enginy na vývoj her</b>	<b>9</b>
2.1	Construct 2 . . . . .	9
2.2	Unreal engine . . . . .	9
2.3	Unity . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Metody procedurálního generování</b>	<b>12</b>
3.1	Celulární automaty pro procedurální generování . . . . .	12
3.2	L-systémy . . . . .	13
3.2.1	Geometrie pomocí L-systémů . . . . .	14
3.3	Šumy . . . . .	15
3.3.1	Definice šumu . . . . .	15
3.3.2	Gradientní mřížkové šumy . . . . .	16
3.3.3	Explicitní šumy . . . . .	17
3.3.4	Řídké konvoluční šumy . . . . .	21
3.4	Výškové mapy . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Procedurální generování krajiny</b>	<b>25</b>
4.1	Metody pro procedurální generování krajiny . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Návrh řešení</b>	<b>29</b>
5.1	Vybraná metoda generování . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Implementace</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Experimenty a vyhodnocení</b>	<b>55</b>
7.1	testování . . . . .	55
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>61</b>



# Úvod

Procedurálně vytvářený obsah v herním průmyslu je velmi důležitou součástí her už po několik let. Mnoho her postavených na tomto principu, se již prosadilo na trhu a stále více se uplatňuje. Náhodné vytváření obsahu se používá například na tvoření herních map, včetně místnosti, skládání různých dopředu vytvořených místností tak aby vznikla jedinečná mapa. Takto implementované hry mají výhodu v opakování hratelnosti a nepředvídatelnosti.

Cílem této práce je návrh a vytvoření prototypu 2D hry, v herním enginu Unity, založené na procedurálním generování herního obsahu. Samotný generační algoritmus pracuje s Perlinovým šumem a výškovými mapami, ty slouží k vytvoření elevace různých bodů na mapě.

Inspirací na téma hry je počítačová hra RimWorld, která se řadí do her typu Colony-sim. Jedná se o žánr, ve kterém hráč ovládá skupinu lidí, kolonii, kterou se snaží, pomocí dobrého vedení, dovést k nějakému danému cíli. V navržené hře je úkolem hráče dostat kolonisty do stavu prosperity a mimo stav nouze o potravu a zdroje. Pohyb kolonistů využívá takzvané NavMesh agenty, kteří spolupracují s vytvořenou navigační sítí (NavMesh).

Vytváření mapy je stěžejní částí celé hry, určuje zdroje pro hráče a tudíž částečně i obtížnost celé hry. Ve hře se objevují nepřátelé, kteří mají jednoduchou umělou inteligenci a jsou jednou z překážek, se kterou se hráč musí během hry vypořádávat. Implementace generačních algoritmů, AI nepřátel a dalšího je popsána v kapitole 6.

Hra je implementována v herním enginu Unity, které je v dnešní době, jedním z nejvíce používaných vývojových nástrojů pro vývoj her. Mezi další oblíbená vývojová prostředí se řadí například, GameMaker, Unreal Engine, Godot. O vývoji v jednotlivých enginech pojednává kapitola 2.

Po dokončení implementační části bylo zahájeno experimentování s herními systémy a následovné uživatelské testování. Průběh a výsledky této části práce jsou dále popsány v kapitole 7.

# Kapitola 1

## Vytváření obsahu v herním světě

Ve světě her jsou dvě možnosti jak přistupovat ke tvoření obsahu, jedním z těchto způsobů je tradiční nebo také **mechanické**, je jednodušší, vzhledem k tomu že není potřeba žádný algoritmus, ale pracnější. Další možností vytváření obsahu je pomocí metod implementující náhodné nebo také **procedurální generování obsahu**.

Hry které mají pouze dvě dimenze se nazývají 2D (z anglického two dimensions). Je mnoho žánrů 2D her, RPG (role playing game) hry na hrdiny s příběhem, strategií, Co-op (kooperační) které jsou postavené na spolupráci více hráčů, survival (hry o přežití), colony-sim (z anglického colonization simulation) které mají simulovat kolonizaci ovládanou hráčem a tak dále. Tato bakalářská práce se zabývá hrou žánru colony-sim. Je mnoho způsobů jak vyvíjet takovou hru, nejčastěji se používají takzvané **herní enginy**, které takové vyvíjení hry ulehčují a jsou na to stavěné.

### 1.1 Způsoby generování obsahu

V této části porovnáme mechanické generování obsahu s procedurálním, vysvětlíme co je lepší kdy použít a jaké známe metody pro procedurální generování. Následující tři body popisují faktory, které je třeba zvážit při rozhodování, zda bude využita nějaká procedurální metoda generování, nebo bude lepší použít manuální design úrovní a obsahu:

**Žánr tvořené hry** Při vývoji například takové hry z prvního pohledu (FPS) hry, u které záleží hlavně na ovládání a souboji hráče proti hráči, není třeba vytvářet mapy a další obsah procedurálně. Většinou stačí vytvořit například pouze jednu úroveň a v takovém případě není třeba používat procedurální generování. Při hrách, které závisí na okolí, surovinách a přežití kde každá okolnost nějak ovlivňuje hráče, už procedurální generování hraje větší roli. Zároveň pro vytváření obsahu jako je text, může být PG velmi obtížnou volbou, neboť v RPG hrách bývá textová část velmi důležitá a generování textu je stále dost obtížné

**Opakovaná hratelnost** Některé hry jsou dělané tak, že čím déle hráč hraje stejnou úroveň (anglicky level), tím více se zlepšuje a je za to například odměňován je právě manuální tvoření úrovní lepší než procedurální. Naopak u jiných her, které mají úrovně procedurálně generované, většinou hráč danou úroveň zvládne, pokračuje na další a nepředpokládá se že se k ní bude ještě vracet.

**Aspekt designu hry** Jestliže hra závisí z velké části na jedné úrovni s jejími mechanikami, vlastnostmi a obsahem, pak je lepší ji vytvářet mechanicky a doladit všechny vlastnosti a interakce s hráčem.

### 1.1.1 Mechanické generování obsahu

Mechanický typ generování je jedním z nejobvyklejších tvoření obsahu ve hrách. Používá se převážně v žánrech, jako je RPG (Role Play Game), RTS (Real Time Strategy) a další, ve kterých pozice objektů a struktura mapy hraje velkou roli a bez lidské tvorby by nebylo dosaženo potřebných výsledků. Toto tvoření lze interpretovat jako proces u něhož se návrhář za pomoci různých nástrojů, které postupně aplikuje, snaží dosáhnout požadovaného výsledku. Jde tedy o metodu ručního vytváření obsahu kde designér, nebo grafik navrhuje a postupně vytváří úroveň, či jinou část hry tak, aby vyhovovala potřebám, ať už se jedná o pozici stromu, nebo o to co hráči sdělují NPC.

Díky tomuto přístupu nehrozí nesrovnatosti ve výsledku, například se nemůže stát že určitá část mapy bude nedostupná, nebo úplně nesmyslná. Další výhodou je, že výsledek bude přesně takový jak byl naplánovaný, avšak takovéto tvoření je u větších her, kde je nutná opětovná hratelnost, velmi časově náročné.

### 1.1.2 Procedurální generování obsahu

Tento typ vytváření obsahu se používá ve více žánrech, ale asi nejznámější z hlediska generování map je Roguelike, kde každá nová hra má unikátní náhodnou mapu. Procedurální generování se ovšem nepoužívá pouze na generování map, ale také na vytváření objektů, jako jsou stromy, textury, animace, text a další. Procedurální generování obsahu není úplně to stejné, jako náhodné generování obsahu. Více do hloubky je tento typ modelování krajiny a textur rozebrán v kapitole [Procedurální generování](#).

V zásadě je to proces obrácený jak u mechanického generování obsahu. Uživatel sice stále definuje různé nástroje, které jsou použity pro vytváření obsahu, ale nikoli pro své vlastní použití, ale naopak je vytváří pro algoritmus. Uživatel dále určuje pravidla podle kterých se generátor musí řídit tak, aby se dobral káženého výsledku.



Obrázek 1.1: Příklad hry Roguelike žánru jménem Binding of Isaac, vpravo nahoře je vidět mapa dungeonu, která je procedurálně vygenerovaná.

### Příklad procedurálního generování vegetace

Simulace lesních prostředí má mnoho aplikací, od zábavní po výzkumné modelování. Pro lepší představu uvádíme příklad od Newlandse a Zaunera. [30]

Program má funkci procedurálního generátoru lesů na mapě, cílem tohoto programu je náhodně naskládat stromy s rozumnými rozestupy od sebe. Metody pro vegetaci se dají opět řadit jako procedurální a mechanické. Neprocedurální přístup nabízí velkou kontrolu nad celým procesem a velký detail modelů, výměnou za cenu vyžadujícího značného množství uživatelských zásahů, často na úrovni vysazování rostliny po rostlině. V případě procedurálního generování, se jedná o modely které jsou zkonztruovány algoritricky a kontrolovaný skrze parametrické hodnoty, bez nutnosti vyšší úrovně manuálního vstupu nebo specializace v daném oboru.

Jednou z nejvíce prozkoumanou modelační technikou postavenou na rekurzivních hierarchiích je koncept **L-systému**. Existuje mnoho typů a rozšíření těchto systémů [36], včetně stochastických, parametrických, diferenciálních [37], citlivých na okolí [38], nebo otevřených [29].

Distribuce stromů na scéně lze udělat například pomocí simulace ekosystému. To vytváří více realistickou distribuci vegetace, než náhodné rozestavení, protože vznikají přirozená chování, jako je shlukování druhů a oblasti negativního růstu kolem stromů. [30] Jedná se o simulace, ve kterých každá rostlina žije vlastní život, je ovlivňována ostatními rostlinami a vnějšími podmínkami. [4]

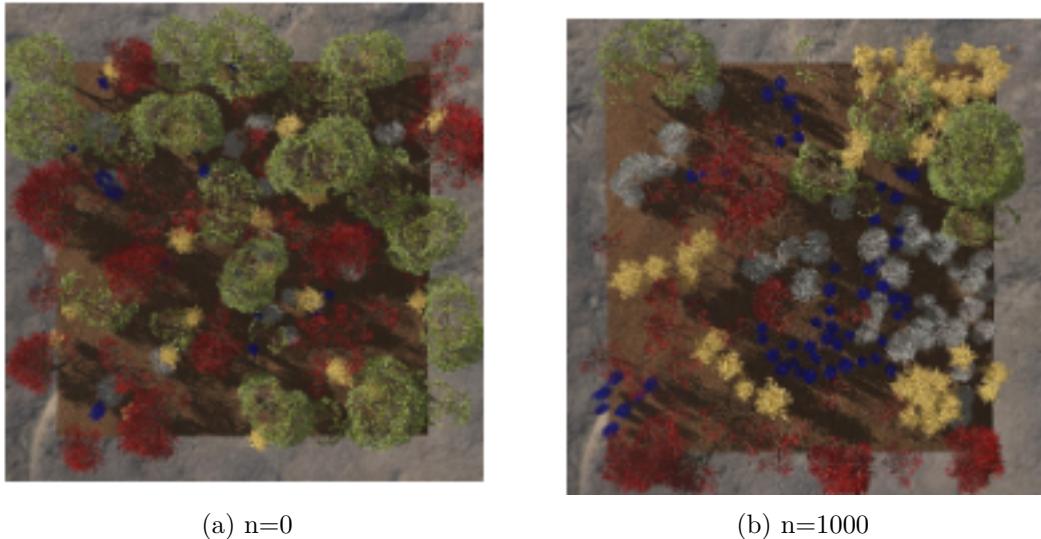
Při inicializaci simulace se pro každý specifický druh stromu vytvoří určité množství stromů (pro výpočet slouží rovnice 1.1) ve věku  $a_i \in \langle 0, a_M \rangle$ - kde  $a_M$  je maximální věk stromu pro daný druh a jsou náhodně rozestavěny po oblasti od největšího po nejmenší. [30]

$$n_I = \frac{d_0 \cdot \rho}{n_T} w^2 \quad (1.1)$$

Hodnota  $n_I$  představuje počet instancí k vytvoření,  $w$  je šířka scény,  $d_0$  původní hustota pro objekt a  $\rho$  je parametr hustoty jednotlivých objektů.

Po úspěšné inicializaci simulace běží  $N$  kroků, kde  $N_Y$  kroků utváří rok. Pro každý krok se děje následující:

- 1 Pokud je konec roku, všechny stromy vysejí počet nových rostlin, v kruhu okolo nich.
- 2 U každého páru stromů je rostlina s menší důležitostí odstraněna.
- 3 Stromy starší než jejich maximální věk, jsou považovány za mrtvé a odstraněny.
- 4 Všechny rostliny rostou (jejich věk se zvýší o 1).



Obrázek 1.2: Vzhled ekosystému po inicializaci a rozložení vegetace po prvních 1000 iteracích. Je vidět že se vytváří shluky rostlinných druhů, tyto klastry zůstávají, pouze se mění jejich pozice. Obrázky převzaty z práce<sup>1</sup>.

[[chyba odkazu]]

## 1.2 Procedurální generování v herním průmyslu

Algoritmů na generování obsahu existuje mnoho, každý používá jiné nástroje, ale všechny se musí podrobovat pravidlům která stanovuje programátor a podle kterých se řídí. Je více způsobů a míst kde se dá procedurální generování uplatnit, různé způsoby a důvody jsou popsány v této kapitole.

### 1.2.1 Text

Skoro všechny hry používají text. Z důvodu že každá informace v textu musí odpovídat realitě, je nutno velké množství omezení pro generování. Například když je v textu informace že král je mrtvý [27], musí být toto tvrzení pravdivé.

<sup>1</sup><https://arxiv.org/pdf/2208.01471.pdf>

Velkým plusem procedurálního generování textu je vyprávění [8], takto vytvořené příběhy jsou často kreativnější a zajímavější, než ty co by vytvořil člověk, neboť lidé mají sklon k příběhům které již slyšeli, nebo ze svých zkušeností, což dost omezuje nápady.

### 1.2.2 Krajina a úrovně

Nejvíce obvyklý obsah který se ve hrách generuje, a který je zároveň hlavním zaměřením této práce, jsou krajiny a úrovně. Generování lokací, úrovní, nebo obsahu mapy lze jak u 2D her, tak u 3D her. Za úroveň nebo oblast lze označovat otevřené, třeba krajina s lesy, i uzavřené prostranství, vnitřek budovy, nebo jeskyně. Tato část PG je rozvedená a podrobněji popsána v následující kapitole ??.

### 1.2.3 Textury

Jednou z nejčastějších metod, která se používá na tvoření textur, jsou L-systémy, nebo Perlinův šum, který je detailněji popsán v sekci 3.3.

### 1.2.4 Zvuky a hudba

Většina her má soundtrack a zvukové efekty. Soundtrack obvykle nemá nijak zvlášť přísná pravidla, ale zvukové efekty musejí být výstižné a odpovídající akci v daný moment.

Jukebox [6] je model který dokáže generovat hudbu se zpěvem v originální nezpracované formě zvukových dat, s délkou v řádu minut, i s určením žánru a vokálního stylu. Modelů jako je tento již existuje více, avšak zatím to nejsou plně hodnotné soundtracky pro hry a ještě chvíli potrvá, než bude možné jednoduše vygenerovat hudbu a efekty pro hru pomocí pouhého nástroje.

# Kapitola 2

## Enginy na vývoj her

Herní engine představuje platformu složenou z interagujícího softwaru, který dohromady vytváří integrovaný celek a umožňuje spouštění samotných her. Herní engine se skládá z několika částí s přesně specifikovanou funkcionalitou: rendering, fyzika, síťování, zvuk atd. [31]

Platforem na vývoj her existuje mnoho, některými z nich jsou například Unity, Construct 2, MonoGame, Unreal Engine, nebo GameMaker Studio 2. Každý herní engine je v něčem jiný a tudíž se hodí na jiné žánry, nebo styly her. Při rozhodování, který engine použít, se z hlediska vývojáře musí zohlednit více faktorů, například podporovaný programovací jazyk, nebo platformu na kterou je hra vyvíjena. [43]

### 2.1 Construct 2

Tento engine dovoluje lidem, kteří nejsou programátori, vytvářet 2D hry. Používá drag and drop editor pro všechnu logiku založenou na událostech a chování. Může být rozšířen a skriptován pomocí JavaScriptu.

I když Construct tvrdí že zveřejňují hry na většině mobilních a desktopových platformách, jejich primární cíl je HTML5/JavaScript. Tudíž jakákoli verze která není ve vyhledávači je obsažena v DOM a obalovacím rozhraní umožňujícím použití JavaScriptu. Tato architektura obecně snižuje výkon. [1]

### 2.2 Unreal engine

Podporuje multiplatformní vydávání her, jmenovitě DirectX, OpenGL, nebo WebGL.

Jedná se o engine který je zdarma, ale pouze pro nekomerční užití a ve všech ostatních případech licencování softwaru za malé předplatné a licenční poplatek. Přes to, že původně byl vyvinut pro podporu *Unreal* her z první osoby a neměl tolik nástrojů jako Unity, vyrostl Unreal Engine do podoby velmi výkonného enginu, schopného podporovat jakýkoli žánr her. [1]

Skriptování je v enginu pomocí jazyka C++.

## 2.3 Unity

Unity je multiplatformní herní engine, podporující vývoj her na Windows, Linux i macOS. Vyvinula ho společnost Unity Technologies v roce 2005. Oproti jiným herním enginům podporuje vývoj her ve 2D, 3D, rozšířenou realitu (AR), nebo virtuální realitu (VR).

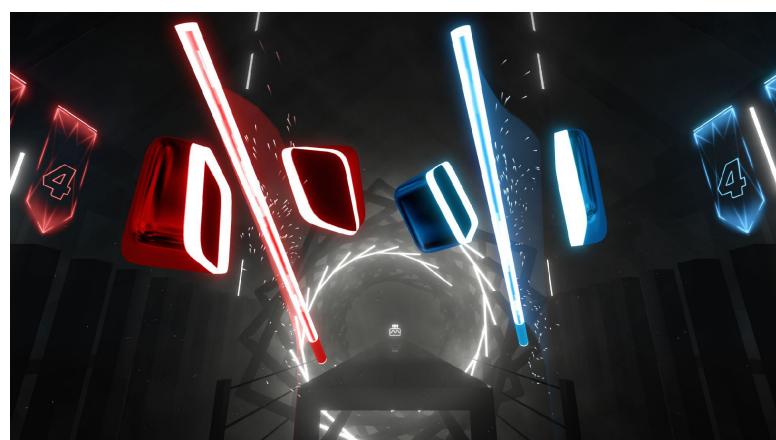
Unity má více plánů které mohou vývojáři využívat, jedná se o personal, pro, enterprise a industry. Ze základu je pro všechny vývojáře zdarma k užívání, ale po překročení 100 000\$ za posledních dvanáct měsíců, je nutné pořídit si jeden z placených plánů. Tyto plány mají i jisté výhody, jako je třeba Havok Physics, přidávající robustní detekci kolizí a fyzikální simulace, technickou podporu, nebo prioritní frontu na zákaznickou podporu. [42]

Další výhodou je integrované fyzikální jádro PhysX, které pracuje v reálném čase a je vyvíjeno společností Nvidia. Toto jádro zahrnuje efektivní podporu pro multithreading a využívá akceleraci fyzikální simulace prostřednictvím GPU. Programování je v enginu zařízené pomocí jazyka C#.

Z Unity vzešlo mnoho oblíbených herních titulů, řadí se mezi ně hra ve virtuální realitě Beat Saber 2.2, mobilní hra Pokémon Go 2.3, nebo multiplatformní Cuphead 2.1.



Obrázek 2.1: Ukázka hry Cuphead



Obrázek 2.2: Ukázka hry Beat Saber



Obrázek 2.3: Ukázka mobilní hry Pokemon Go

## Kapitola 3

# Metody procedurálního generování

Tato kapitola popisuje metody pro generování geometrie, vegetace, celulární automaty, perlinův šum a použití procedurálního generování v herním průmyslu, do detailu popisuje PG krajiny, generování fraktálů.

Procedurální modelování je téma které se aktivně zkoumá už přes čtyřicet let. Myšlenka je, jak již bylo zmíněno, aby obsah který se vytvářel ručně, dal modelovat pomocí navržené procedury automaticky. Takovýto přístup se již uplatnil na generování například textur, geometrických modelů, zvukových nahrávek, nebo animací. V roce 1980 se začalo pracovat s různými metodami na vytváření terénu, jako hory, pláně a jezera. Začal se také řešit růst rostlin a obecně práce s přírodou. [41]

Roden and Parberry [40] pojmenovávají tento druh algoritmů *amplifikační algoritmy* (*amplification algorithms*), přijímají menší množství vstupních informací, které zpracují a vracejí větší objem dat na výstupu. Hendrikx et al. [15] pojímají procedurální generování jako alternativu k mechanickému navrhování obsahu, ale kladou důraz na zdokonalování a přidávání parametrů umožňujících zásah návrháře do takto vygenerovaných objektů.

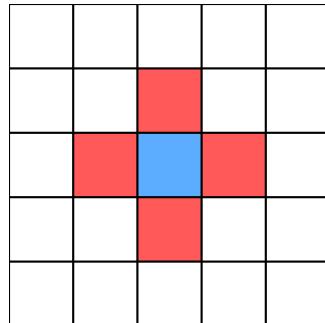
### 3.1 Celulární automaty pro procedurální generování

Celulární automaty se ve hrách používají intenzivně zejména pro modelování týkajícího se systémů v prostředí, jako jsou teplo, oheň, děšť, tlak a exploze. Zatím podle průzkumu nejsou známé žádné hry, které by postavili generování celého 2D herního světa, pouze pomocí celulárních automatů. Momentálně existují webové stránky, které možnost generování malých map pomocí mřížek navrhují, ale není jich mnoho a neexistuje žádné spolehlivé ohodnocení těchto algoritmů. [17]

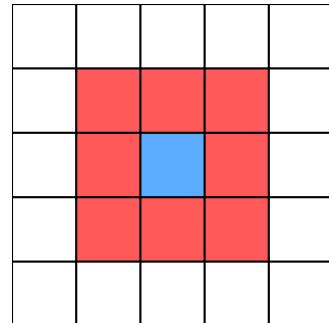
Původně byly CA vymyšleny Johnem Von Neumannem jako formální model sebereprodukujících se organismů. Šlo o dvou-dimenzionální celulární automat, kde každá buňka, tzv. cell, je malý čtverec na velkém čtverečkovém papíru. Každá buňka má dva možné stav, černý a červený, které jsou určeny jejich sousedstvím. V John Von Neumannově teorii, je sousedství tvořené čtyřmi přilehlými čtverci a na obrázku 3.1a jsou vyznačeny červenou barvou. [11]

Nejznámější celulární automat byl vytvořen v roce 1970 britským matematikem Johnem Hortonem Conwayem, který se jmenoval Game Of Life. Stejně jako Von Neumannův byl i tento automat dvou-dimenzionální a mohli nabývat pouze hodnot živá, nebo mrtvá. Využívá Moorovo sousedství, které oproti Von Neumannově považuje za sousední buňky všech osm přilehlých, vyobrazené na obrázku 3.1b. Fungování automatu je následovně, buňka zůstává

naživu, pokud má dvě, nebo tři sousedící buňky živé. Což simuluje, že buňka nepřežije pokud je osamělá, ale zároveň pokud je okolí přeplněné organismy, tak je utlačována. Další pravidlo je, že pokud je libovolná buňka mrtvá, může se "narodit", pokud jsou v sousedství alespoň tři živé buňky. Toto pravidlo má simulovat rození, kde každá buňka musí mít tři rodiče. Automat díky těmto jednoduchým pravidlům dokáže vytvářet simulace které působily jako živý organismus. [11]



(a) Von Neumannovo sousedství



(b) Moorovo sousedství

Obrázek 3.1: Sousedství z pohledu Von Neumanna a Moora

## 3.2 L-systémy

L-systémy (Lindenmayerovy systémy) jsou formálním nástrojem [36], který se používá pro modelování vývoje rostlin a buněčných struktur. Tyto systémy byly zavedeny biologem Aristidem Lindenmayerem v roce 1968. [12] Jedná se o paralelní řetězce přepisující systémy, za účelem modelovat růst celulárních organismů. L-systém  $\mathcal{L}$  je entice

$$\mathcal{L} = \langle M, \omega, R \rangle,$$

kde  $M$  je abeceda L-systému,  $\omega$  je axiom a  $R$  je množina pravidel přepisování. Abeceda obsahuje parametrizované moduly  $M = A(P), B(P), \dots$ , kde  $P = p_1, p_2, \dots, p_n$  jsou modulové parametry, jako jsou rotace, zvětšení, zmenšení. Axiom  $\omega \in M^+$  je neprázdná sekvence modulů a  $M^+$  jsou všechny možné prázdné řetězce z  $M$ . Pravidla pro přepisování mají následující formu:

$$id_1 : A(P) : cond \rightarrow x, x \in M^*,$$

$$id_1 : A(P) : cond \rightarrow x, x \in M^*,$$

...

kde  $M^*$  jsou všechny možné řetězce z  $M$  včetně prázdného  $\epsilon$ . Pravidlo  $id_i$  přepisuje znak na levé straně z abecedy  $A(P)$  posloupností písmen z pravé strany, pokud je podmínka  $cond$  pravdivá. Modul, který se nenachází na levé straně pravidla, se nazývá *terminální symbol*, neboť se nemůže dál měnit, všechny ostatní moduly se nazývají *neterminální symboly*.[39]

Každé písmeno má vlastní pravidlo derivace řetězce, ale probíhá paralelním provedením aplikovatelných pravidel, z množiny  $R$  pro každé písmeno které obsahuje. Produkční pravidla přepisují začínající symbol sekvencí modulů a pokračují v úspěšných derivacích  $\omega \Rightarrow m_1 \Rightarrow m_2 \Rightarrow \dots$ , dokud není možné žádný další modul přepsat (řetězec končí pouze

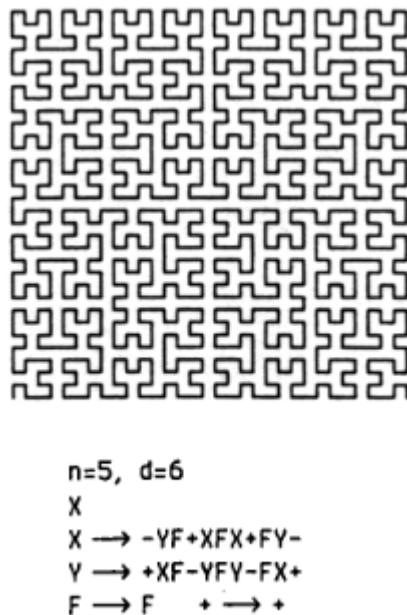
terminálními symboly), řetězec modulů je prázdný, kvůli aplikaci pravidla epsilon, nebo byl proces ukončen kvůli maximálnímu počtu iterací, které stanovil uživatel.[25]

Rekurze nastává v L-systémech tehdy, když se symbol z levé strany objevuje na pravé straně toho stejného pravidla (i když ne přímo). Nedeterminismus povoluje více pravidel pro jeden znak z abecedy. Toto navíc vyžaduje specifikaci pravděpodobnosti jejich aplikace.[26]

### 3.2.1 Geometrie pomocí L-systémů

Pro tvoření geometrie z textových řetězců, je každý řetězec reprezentován želvou, která vytváří geometrické symboly jako čáry, nebo dokonce 3D geometrii. Ve 2D má želva stav  $S(p, 0)$  kde  $p = [x, y]$  je její pozice a 0 je směrový vektor, který udává směr jejího pohybu.

Želva sekvenčně čte písmena interpretovaného řetězce z modulu od začátku po konec, kde každé písmeno je interpretované jako příkaz. Písmeno F si překládá jako "pohyb od p směrem k 0 o vzdálenosti d, která je zadána a nakresli linku mezi starou pozicí a novou." Příkazy  $+(\alpha)$  a  $- (\alpha)$  mění směr pohybu želvy, jejím otočením doleva, či doprava o  $\alpha$ . Cokoliv v závorkách  $[M^+]$  je geometricky interpretováno jako větev vygenerované struktury. Výhodou je že ne všechna písmena abecedy musí mít nastavenou geometrickou interpretaci, pokud ji nemají, tak je želva ignoruje. [36]



Obrázek 3.2: Vygenerovaných obrázek L-systémy želví interpretací, jsou zde vidět jednotlivé posuvy i hodnoty o které se posouvá, převzatý ze článku<sup>1</sup>

[[chyba odkazu]]

---

<sup>1</sup><http://algorithmicbotany.org/papers/graphical.gi86.pdf>

## 3.3 Šumy

Šumy se v počítačové grafice využívají například pro přidání kvalitních detailů do synteticky vytvořených obrázků. Perlinův šum, navržený Kenem Perlinem [33], se v dnešní době používá ve vytváření procedurálních textur včetně mraků, vln, tornád, raketových cest, atd. Tato kapitola poskytuje detailní přehled jednotlivých funkcí generujících šum. Rozděluje tyto funkce do tří kategorií: gradientní mřížkové šumy 3.3.2, explicitní šumy 3.3.3 a řídké konvoluční šumy 3.3.4. V každé z těchto kapitol je popsáno několik reprezentativních šumových funkcí rozebraných do detailu a další související příklady [19].

### 3.3.1 Definice šumu

Šum je generátor náhodných čísel počítačové grafiky. [33] Jedná se o náhodný a neuspořádaný vzor, který je užitečný všude tam, kde je potřebný detail bez evidentní struktury. Jednoduchý šum pracuje například takto:

1. Uvažujme množinu všech bodů v prostoru, jejichž souřadnice  $x$ ,  $y$  a  $z$  jsou všechny celočíselné. Tuto množinu nazveme celočíselná mřížka. Každému bodu v této mřížce přiřaďte pseudonáhodnou hodnotu a gradientní hodnoty  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Přesněji, zobrazte každou uspořádanou posloupnost tří celých čísel do nekorelované uspořádané posloupnosti čtyř reálných čísel:  $[a, b, c, d] = H([x, y, z])$ , kde  $[a, b, c, d]$  definují lineární rovnici s gradientem  $[a, b, c]$  a hodnotou  $d$  v bodě  $[x, y, z]$ .  $H$  je nejlépe implementováno jako hashovací funkce.
2. Pokud  $[x, y, z]$  je na celočíselné mřížce, definujeme  $Noise([x, y, z]) = d_{[x, y, z]}$ . Pokud  $[x, y, z]$  není v celočíselné mřížce, spočítáme hladkou (např. kubickou polynomickou) interpolaci mezi koeficienty rovnic mřížky, aplikovanou nejprve v  $x$  (podél hran mřížky), pak v  $y$  (ve vnitřních plochách mřížky  $z$ ) a nakonec v  $z$ . Poté vyhodnotíme tuto interpolovanou rovnici v bodě  $[x, y, z]$ .

Ohodnocením hodnot takového šumu jsme schopni vytvářet jednoduché náhodné textury povrchu. [33]

Například při ohodnocení šumu pouze bílou barvou:

$$color = white * Noise(point)$$

Výše uvedená textura má omezený frekvenční charakter, není zde žádný detail mimo určitý rozsah velikosti. Vzniklý obrázek je 3.3a.

S hodnotou vrácenou funkcí  $Noise()$  [34] lze dále dělat mnoho různých věcí, s pomocí funkční kompozice, lze například mapovat různé rozsahy hodnot do různých barev:

$$color = Colorful(Noise(k * point))$$

V příkladu výše, byla textura škálována pomocí násobení domény funkce  $Noise()$  konstantou  $k$ . Jednou z výhod přístupu funkční kompozice je jednoduchost se kterou lze takovéto úpravy provádět, výsledný obrázek je níže 3.3b.



(a) Kobliha s puntíkovým vzorem



(b) Kobliha s barevným vzorem

Obrázek 3.3: Na obrázcích jsou vidět koblihy se vzory podle aplikovaných ohodnocení šumů, obrázky jsou převzaty z [33]

### 3.3.2 Gradientní mřížkové šumy

*Gradientní mřížkové šumy* vytvářejí šum pomocí interpolace, nebo konvolucí náhodných hodnot a/nebo gradientů definovaných v bodech celočíselné mřížky. Reprezentativním příkladem je **Perlinův šum** [19].

#### Perlinův šum

Roku 1985 Perlin představil *Perlinův šum*, jeho slavnou procedurální funkci pro generování šumu. [33] [34] Perlinův šum určuje šum v bodě prostoru výpočtem pseudonáhodného gradientu u každého z osmi nejbližších vrcholů na celočíselné krychlové mřížce a následným provedením spline interpolace. Pseudonáhodný gradient je získán hashováním mřížkového bodu a použitím výsledku k výběru gradientu. Mřížkové body jsou hashovány pomocí postupné aplikace pseudonáhodné permutace na souřadnice k dekorelací indexů do pole pseudonáhodných jednotkových gradientových vektorů. Sada gradientů se skládá z 12 vektorů definovaných směry od středu krychle k jejím hranám. Interpolantem je kvintický polynom, který zajišťuje spojitou derivaci šumu, neboli hladké přechody mezi jednotlivými body.

Již od svého uvedení před skoro čtyřmi desetiletími se Perlinův šum široce využívá v grafice, například při generování textur, které je vidět na obrázku 3.4. Perlinův šum je rychlý, jednoduchý a nadále zůstává pilířem průmyslu.



Obrázek 3.4: Váza s vygenerovanou texturou pomocí Perlinova šumu. Obrázek převzat z [33]

### Lepší gradientový šum

Modifikovaná hashovací funkce kombinovaná s oddělenou gradientní tabulkou vylepšuje axiální dekorelaci. Jiné rekonstrukční jádro zlepšuje omezení pásmu. Metoda projekce zlepšuje kvalitu šumu na 2D površích pomocí pevného šumu. Je třeba poznamenat, že tyto zlepšení platí pro několik druhů gradientových šumů mřížky. [18]

### Hardwareové implementace

Již mnoho autorů představilo hardwareové implementace funkcí podobných Perlinovu šumu. Hart a spol. [14] prezentovali VLSI hardwareovou implementaci Perlinova šumu. Dále byly prezentovány GPU implementace Perlinova šumu, jak od Harta [13] tak i od Olano [32]. Dále je Perlinův šum nedílnou součástí OpenGL Shading Language (GLSL).

#### 3.3.3 Explicitní šumy

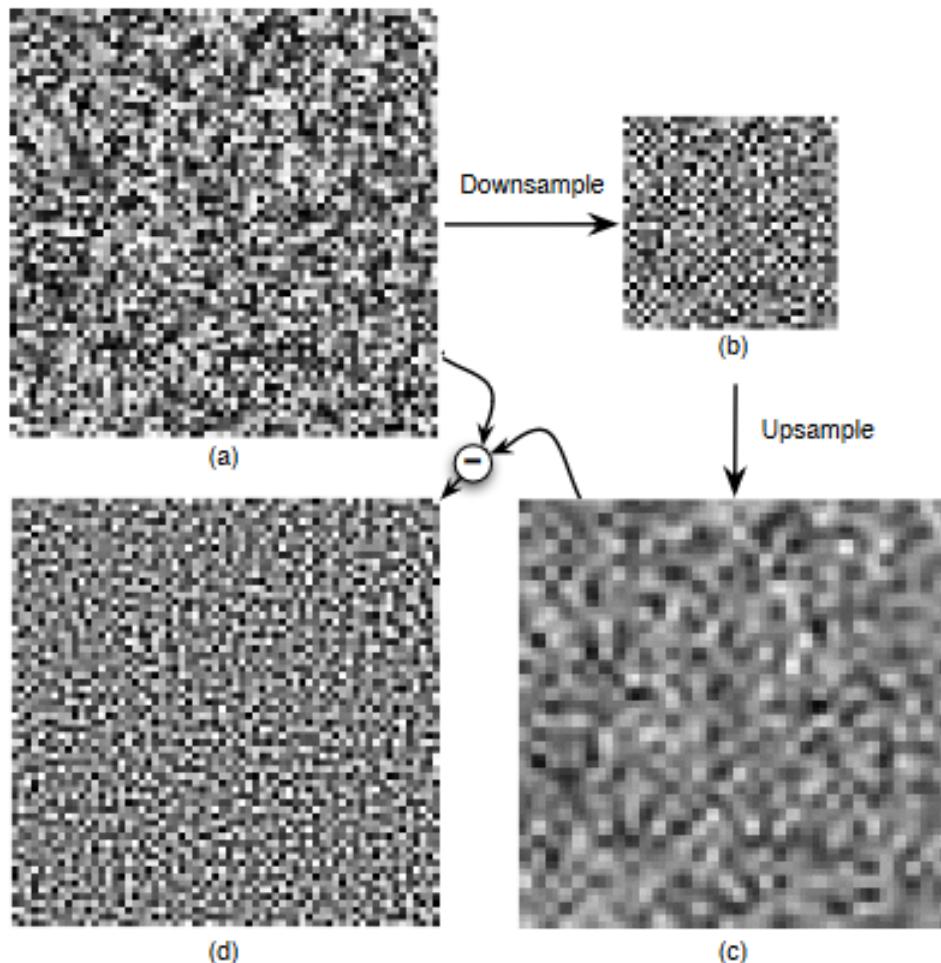
*Explicitní šumy* generují šum explicitním způsobem předzpracováním a ukládají ho. Do slovně vzato, explicitní šumy nejsou procedurální šumové funkce, ale i tak jsou velmi podstatné. Dva reprezentativní příklady jsou, **vlnkový šum** a **anisotropní šum** [19].

### Vlnkový šum

Poprvé představen autory Cook a DeRose roku 2005 [5]. Perlinův šum ve větších vzdálenostech mívá problém s aliasingem a ztrátou detailů, z důvodu slabého pásmového omezení, kvůli tomu byla představena nová šumová funkce, která je téměř perfektně pásmově omezená.

Podstata algoritmu spočívá v následujících čtyřech krocích, které jsou vyobrazeny na obrázku 3.5:

1. Vytvoření obrazu  $R$  vyplněného náhodným šumem.
2. Snížení vzorkovací frekvence  $R$  za účelem vytvoření obrazu o poloviční velikosti  $R^{\downarrow}$ .
3. Zvětšení  $R^{\downarrow}$  na plnou velikost  $R^{\downarrow\uparrow}$ .
4. Odečtení  $R^{\downarrow\uparrow}$  od originálního obrazu  $R$  aby byl vytvořen výsledný obraz  $N$ .



Obrázek 3.5: Proces generování šumu.(a) Obrázek  $R$  náhodného šumu, (b) o polovinu menší obrázek  $R \downarrow$ , (c) poloviční rozlišení obrázku  $R \downarrow\uparrow$ , (d) obraz pásmového šumu  $N = R - R \downarrow\uparrow$ . Obrázek převzat z [5]

Koeficienty šumu v dlaždici  $N$  jsou tedy vytvořeny z  $R$  a odstraněním části, která je reprezentovatelná na poloviční velikosti. Zbývá část, která není reprezentovatelná na poloviční velikosti, tj. pásmově omezená část. Filtry použité v krocích vzorkování dolů a nahoru jsou získány pomocí vlnkové analýzy. Rozšíření na více dimenzí je přímé.

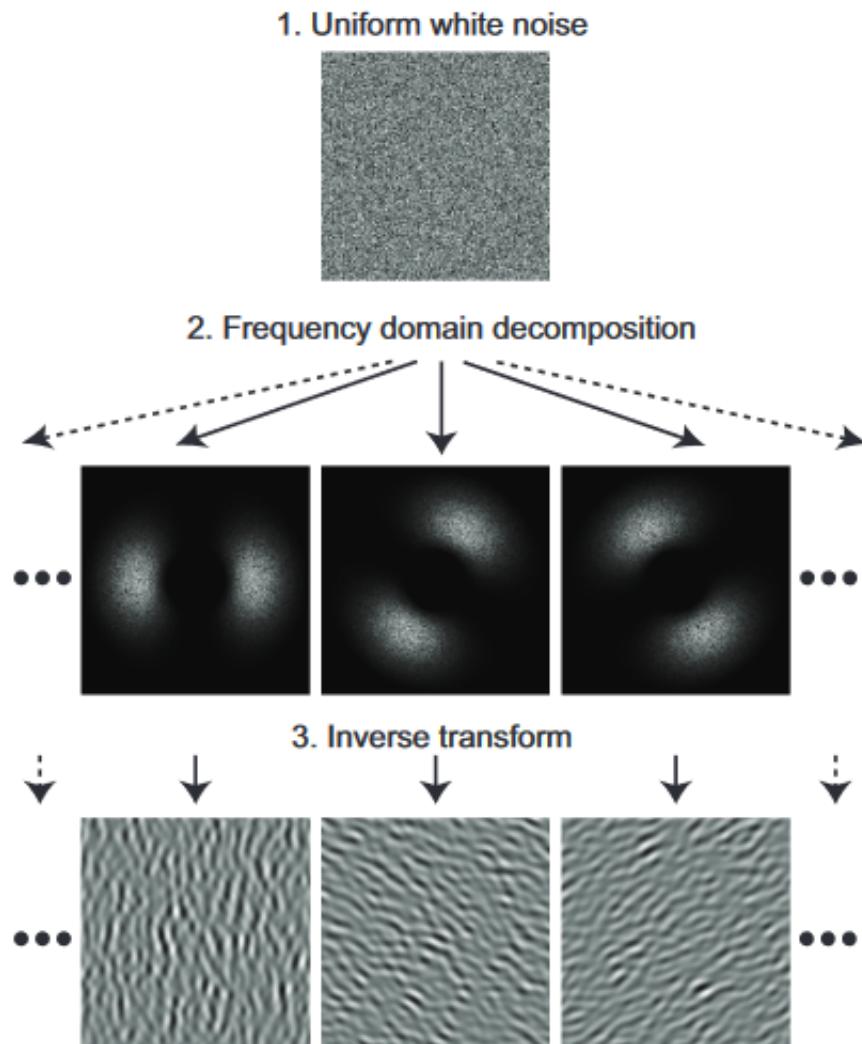
### Anisotropní šum

Roku 2008, představil Goldberg a spol. *anisotropní šum* [10]. Goldberg vyzpovídal že existující šumové funkce podporují pouze isotropní filtrování, na což se také vztahuje aliasing

a ztráta detailů, a představil novou funkci, která podporuje anisotropní filtrování na vysoké úrovni.

Hlavní myšlenkou bylo vygenerovat šumové textury tak, že frekvenční obor je rozdělen do orientovaných pod-pásů. Anizotropní šumové pásma mají nejen určitý rozsah škály, ve kterém jsou účinné, ale také mají preferovanou směrovou orientaci. Konstrukce takového šumu je založena na ovladatelných filtroch, které rozdělují frekvenční obor. Poskytuje řadu vlastností, které jsou zásadní pro generování šumu:

1. Každý filtr definuje pod-pásмо které je úzce lokalizované velikostí a orientací.
2. Filtry implementují invertibilní transformaci. To znamená, že lze přesně obnovit signál z jeho dekompozice do pod-pásem.
3. Filtry disponují možností točení orientace. Hlavním účelem je, že lineární interpolace filtrů může generovat filtr s přesně stejným profilem, ale s prostřední orientací.



Obrázek 3.6: Ilustrace spektrálního generování šumu. Dekompozice frekvenční domény má tři orientace. Jsou vidět tři orientované pod-pásma se stejnou velikostí a odpovídajícími obrazy prostorových domén, které se následně ukládají jako textury. Obrázek převzat z [10].

Každý orientovaný pod-pásmový obraz je zabalen do jednoho kanálu 32bitového RGBA obrazu, což vede ke čtyřem orientacím na každou texturu. Obvykle použití čtyř nebo osmi pásů, tj. jedné nebo dvou textur, představuje dobrý kompromis mezi úložným prostorem, rychlosí vykreslování a kvalitou obrazu. Pod-pásma šumu jsou vypočítána dopředu pouze na jedné škále najednou. Všechny ostatní škály jsou generovány za běhu, jednoduše pomocí stupňování předem vypočítaných textur. [19]

### Stochastické poddelení

Fournier a spol. [7], který představil metodu středního posunu, uvedl také stochastický algoritmus dělení, pro generování přírodních nepravidelných fraktálních objektů a jevů, jako je terén. Lewis [21, 22] předvedl zobecněné stochastické poddelení, a generalizoval Fournierovu práci na libovolné autokorelační funkce.

## Fourierova spektrální syntéza

Fourierova spektrální syntéza generuje šum s konkrétním výkonovým spektrem filtrováním bílého šumu ve frekvenční oblasti. Fourierova spektrální syntéza byla uvedena v počítacové grafice autorem Anjyo [2] Saupe a Voss [3], kteří ji využili, aby vygenerovali náhodné fraktály a simulovaly přírodní jevy. Fourierova spektrální syntéza může být užitečná i při generování referenčních řešení pro šumové funkce, u kterých je známé očekávané výkonové spektrum.

### 3.3.4 Řídké konvoluční šumy

Řídké konvoluční šumy generují šum jako sumu náhodně pozicovaných a vážených kernelů. Třemi reprezentativními příklady jsou šum řídké konvoluce, **bodový šum** a **Gaborův šum**.

#### Definice

V sérii prací mezi lety 1984 a 1989 Lewis představil *řídký konvoluční šum* [24, 21, 23].

Konstrukce řídkého konvolučního šumu je jednoduchá: libovolné jádro  $k$  je konvoluováno se šumem Poissonova procesu  $\gamma$ .

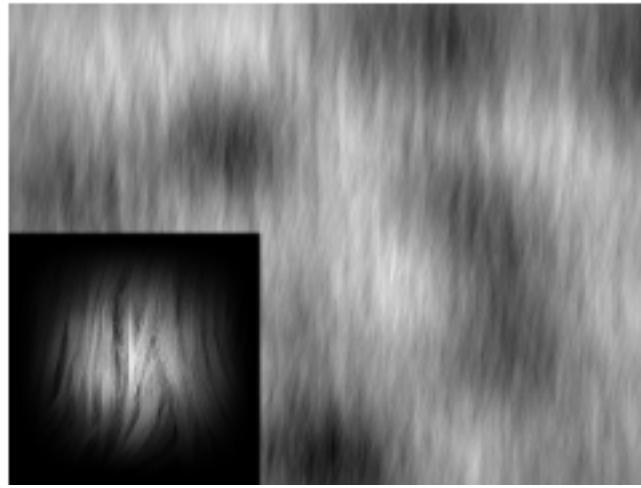
$$N(x, y) = \int \gamma(u, v)k(x - u, y - v)dudv$$

Poissonův proces sestává z impulsů nekorelovaných intenzit  $a_k$  situovaných na náhodných nezávisle na sobě zvolených pozicích  $(x_k, y_k)$ .

$$\gamma(x, y) = \sum_k a_k \delta(x - x_k, y - y_k)$$

Poissonův proces je řídký, což znamená že nedefinuje každý pixel nebo bod v prostoru, od toho je odvozený název *řídká konvoluce*. Tento způsob použití řídkého impulsního šumu umožňuje alespoň nějakou výpočetní efektivitu, vzhledem k tomu že konvoluce efektivně rozprostírá jádro se škálou amplitudy pouze na určitých místech  $(x_k, y_k)$ .

Abychom vyhodnotili šum v konkrétním bodě, je nutné použít pouze jádra, která se s tímto bodem překrývají. Toto je urychleno zavedením virtuální mřížky, kde velikost buňky mřížky odpovídá poloměru jádra. Vyhodnocením pak zahrnuje pouze jádra, která jsou umístěna v buňce obsahující daný bod a těch v sousedních buňkách. Souřadnice buňky jsou také použity k zasazení generátoru náhodných čísel pro generování Poissonových impulzů umístěných v této buňce. Více podrobností a vylepšených schémat pro tento krok jsou uvedeny u Worleyho [45] a Lagae a spol. [20]. I když Lewis [23] popisuje několik optimalizací, jako je ukládání konstruovaných Poissonových impulzů za předpokladu koherentního přístupu, je řídká konvoluční metoda trochu pomalejší než jedna oktava Perlinova šumu.



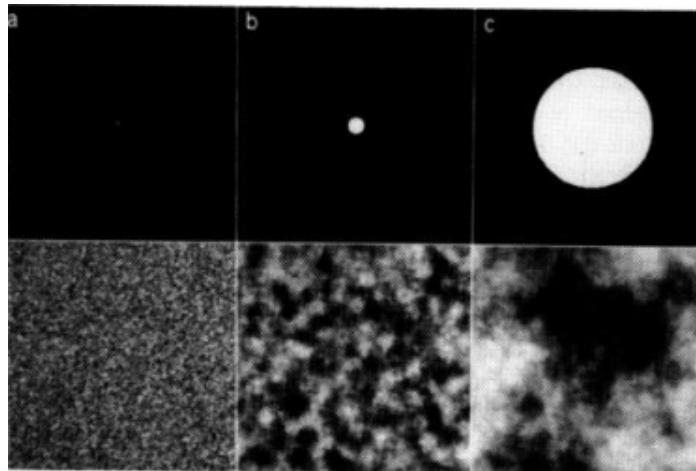
Obrázek 3.7: *Rídký konvoluční šum.* Vlevo dole: Vzorek obrázku vlasů. Vpravo: přibližná textura vlasů vytvořená pomocí 2D řídké konvoluce. Obrázek převzat z [19].

Jelikož výkonové spektrum výstupu konvoluce je součinem vstupů a výkonové spektrum Poissonova impulsu je konstantní, je jednoduše škálovanou verzí tohoto jádra.

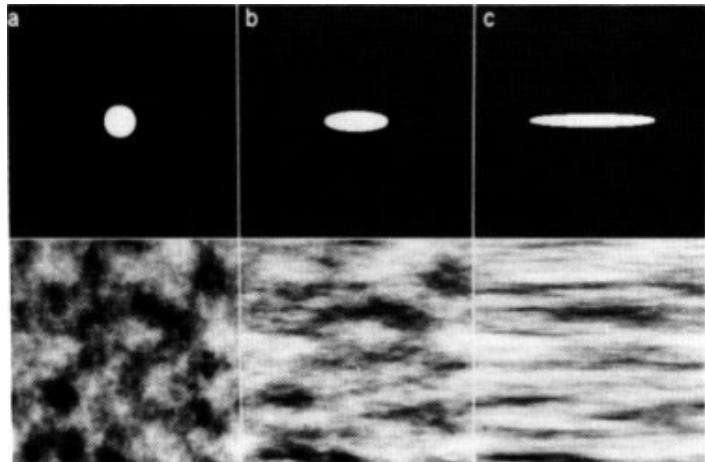
### Bodový šum

Jedná se o metodu generování stochastických textur pro vizualizaci skalárních a vektorových polí nad plochami. Na bodový šum lze nahlížet jako na explicitní formu řídkého konvolučního šumu, vypočítaného konverzí bodů, nebo Fourierovou spektrální syntézou (popsána v sekci 3.3.3).

Van Wijk [44] diskutuje vztah mezi bodem a texturou v detailech. Poukázal na několik důležitých koncepcí, které později uvedl v kontextu šumu. Například, mapování textur na parametrických plochách, syntézu textur nad zakřivenými plochami jako alternativu pevnému šumu, a lokální kontrolu variací bodu. Dále lze pracovat s tvary, ostrostí hran, nebo různými vzory.



Obrázek 3.8: Vztah mezi texturou a bodem. Na třech dvojicích obrázků jsou vidět tři různé velikosti bodu a tři různé šumy které se k těmto bodům vztahují. Obrázek převzat z [44].



Obrázek 3.9: Na třech dvojicích obrázků je vidět jak se textury mění, když se velikost obrázku mění ne-proporcionalně. Obrázek převzat z [44].

### Gaborův šum

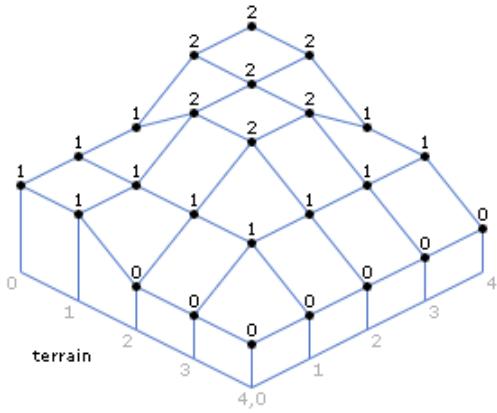
## 3.4 Výškové mapy

Výškové mapy představují dvoudimensionální mřížky obsahující výškové hodnoty, jež jsou častým prvkem v modelování terénu. Tyto mapy se běžně využívají jako klíčový prvek pro reprezentaci základu terénu v herním průmyslu. Pro tvorbu výškových map existuje mnoho algoritmů. Na obrázku 3.10 je jednoduchá ukázka jak jednotlivé body na mapě mají hodnoty, podle kterých se dále určí jejich elevace. [16]

Jedny z nejstarších algoritmů jsou metody založené na pododdelení. Segmenty v rámci vygenerované hrubé výškové mapy jsou iterativně rozdělovány, kde každá iterace navíc používá kontrolovanou náhodnost k přidávání detailů. Miller [28] popisuje některé varianty všeobecně známé metody středového posunu, ve které se výška nového bodu nastavuje na průměr hodnot jeho rohů v trojúhelníkovém nebo diamantovém tvaru, k němuž je přidán náhodný offset. Každou iterací se rozsah náhodných hodnot offsetu snižuje, podle parametru, který kontroluje hrubost výsledné výškové mapy.

Generování výškových map se v dnešní době provádí převážně pomocí fraktálních generátorů šumu, jako je **Perlinův šum**, který provádí generování šumu vzorkováním a interpolací bodů na mřížce náhodných vektorů.

Výškové mapy se mohou dále transformovat na základě běžných filtrací obrazu, například vyhlazování (smoothing), nebo simulací fyzikálních jevů, např. eroze. [41]



Obrázek 3.10: Ukázka hodnot a jejich výšek výškových map

Jednou z hlavních nevýhod výškových map je, že nepodporují tvorbu skalních převisů a jeskyní. Gamito a Musgrave [9] navrhovali systém deformace terénu, který má za výsledek pravidelné, uměle vytvořené skalní převisy. O něco novější metoda [35] přináší propracovanější struktury s rozdílnými vrstvami materiálů, které podporují kameny, klenby, převisy a jeskyně. Příklady takto vygenerovaných struktur jsou vidět na obrázcích. 3.11



(a) Vygenerované převisy

(b) Vygenerované kamenné klenby

Obrázek 3.11: Na obrázcích jsou vidět klenby a převisy vygenerované pomocí algoritmu vytvořeného Peytaviem, obrázky jsou převzaty z [35]

## Kapitola 4

# Procedurální generování krajiny

Procedurální generování krajiny se řadí ke složitějším tématům PG. Je tomu tak hlavně kvůli tomu, že se k tomuto typu generování většinou používají výškové mapy (height maps), podle kterých se ohodnocují jednotlivé pixely, jak je popsáno v sekci 3.4. Jakmile jsou všechny pixely ohodnoceny, jsou tři různé způsoby jak postupovat:

- ruční vykreslování textur,
- aplikování textur na ručně vytvořené regiony podle výšky,
- vygenerování textur po analyzování výšek na vygenerované výškové mapě.

První metoda je výhodná v tom, že textury ručně vykreslené lze udělat na míru a žádný algoritmus je nemůže replikovat. Bohužel jsou časově náročné a jejich kvalita přímo závisí na schopnostech výtvarníka.

Druhá metoda je podobná, nakreslí se barvy na určitá místa, kam si designer myslí že by se mohly hodit hory, řeky, nebo země. Jedná se o docela obvyklou metodu, která přináší velice kvalitní výsledky, ale stále se jedná o manuální techniku.

Třetí metoda používá data height mapy a vypočítává jakou texturu použít na které místo. Nízké hodnoty (tmavší místa) se používají například jako oceány, střední hodnoty se vyhodnocují jako země/tráva a na vysoké hodnoty (světlá místa) se nanášejí textury hor nebo kamení. Při generování ve 3D hrách lze ještě započítávat takzvané sklony (slopes), díky kterým je možné oddělovat vyšší plochy od nižších pomocí dalších textur například kamene. Tato metoda je více rozvedena v sekci 3.4.

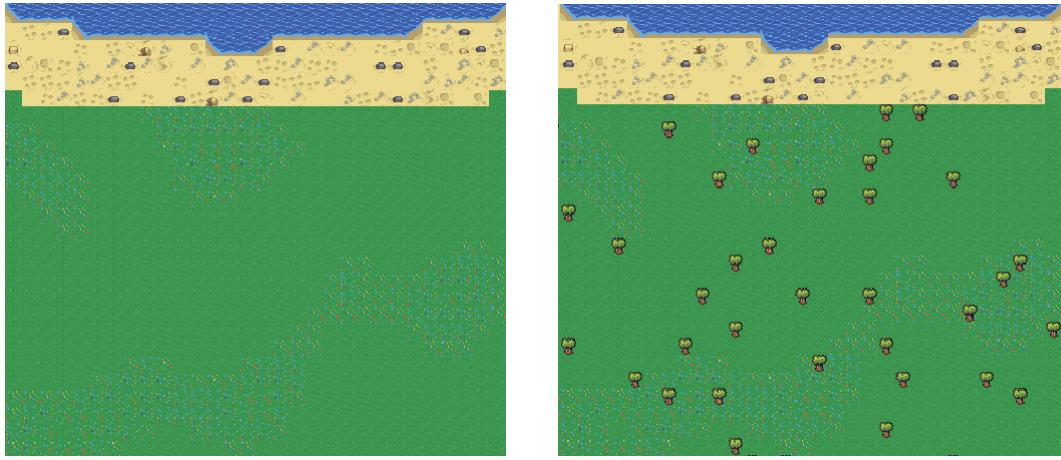
Vzhledem k tomu že první dva postupy vyžadují mechanické vykreslování buď barvy, nebo textur on designéra, nedá se o nich mluvit jako o čistě procedurálních metodách. Naopak postup třetí tomuto popisu zcela odpovídá, neboť kompletně závisí na height mapě a není nutná žádná akce návrháře [8].

### Generování oblastí lze rozdělit následovně:

**Vytváření půdorysu** Zahrnuje vytvoření země, moří, řek, hor, atd. Všechny tyto oblasti jsou otevřeného typu. Také můžeme rozumět pod generováním půdorysu i vytváření uzavřeného typu oblastí, například rozložení jednotlivých místností jeskynního komplexu, vytvoření bludiště a jeho cest.

**Přidání vegetace a objektů** Tento bod v podstatě navazuje na předchozí, je potřeba abyhom měli vytvořený půdorys, aby bylo kam přidávat a rozmíšťovat další objekty.

Jedná se o bod do kterého spadá vegetace, budovy, atd. Programu se zadávají různá omezení na množství vegetace, místa kam který objekt lze přidávat a další omezení.



(a) Vygenerovaný půdorys oblasti

(b) Přidané stromy k půdorysu

Obrázek 4.1: Na obrázcích jsou vidět různé postupy generování obsahu z této hry, na obrázku a je vygenerovaný půdorys oblasti i s mořem a pláží, na obrázku b se k tomu přidaly stromy

## 4.1 Metody pro procedurální generování krajiny

Tato část se zabývá průzkumem procedurálních metod, aplikovaných na modelování terénu. Pojednává o důležitých aspektech, jako je realističnost výstupu, náročnost algoritmu a prostředky pomocí kterých je uživatel schopen ovlivnit a kontrolovat proces generování. [41]

# Literatura

- [1] ANDRADE, A. Game engines: a survey. *EAI Endorsed Transactions on Serious Games*. EAI. Listopad 2015, sv. 2, č. 6. DOI: 10.4108/eai.5-11-2015.150615.
- [2] ANJYO, K.-i. A Simple Spectral Approach to Stochastic Modelling for Natural Objects. In: *EG 1988-Technical Papers*. Eurographics Association, 1988. DOI: 10.2312/egtp.19881023. ISSN 1017-4656.
- [3] BARNSLEY, M. F., DEVANEY, R. L., MANDELBROT, B. B., PEITGEN, H.-O., SAUPE, D. et al. Algorithms for random fractals. *The science of fractal images*. Springer. 1988, s. 71–136.
- [4] BENEŠ, B. A stable modeling of large plant ecosystems. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Graphics*. 2002, s. 94–101.
- [5] COOK, R. L. a DEROSE, T. Wavelet noise. *ACM Trans. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 2005, sv. 24, č. 3, s. 803–811. DOI: 10.1145/1073204.1073264. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1073204.1073264>.
- [6] DHARIWAL, P., JUN, H., PAYNE, C., KIM, J. W., RADFORD, A. et al. Jukebox: A Generative Model for Music. *ArXiv*. 2020, abs/2005.00341. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:218470180>.
- [7] FOURNIER, A., FUSSELL, D. a CARPENTER, L. Computer rendering of stochastic models. In: *Seminal Graphics: Pioneering Efforts That Shaped the Field, Volume 1*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1998, s. 189–202. ISBN 158113052X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/280811.280993>.
- [8] FREIKNECHT, J. *Procedural content generation for games*. Mannheim, 2021. Disertační práce. Dostupné z: <https://madoc.bib.uni-mannheim.de/59000/>.
- [9] GAMITO, M. N. Procedural Landscapes with Overhangs. In:. 2001. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18543187>.
- [10] GOLDBERG, A., ZWICKER, M. a DURAND, F. Anisotropic noise. *ACM Trans. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. aug 2008, sv. 27, č. 3, s. 1–8. DOI: 10.1145/1360612.1360653. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1360612.1360653>.
- [11] GONG, Y. A survey on the modeling and applications of cellular automata theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. sep 2017, sv. 242, č. 1, s. 012106. DOI: 10.1088/1757-899X/242/1/012106. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/242/1/012106>.

- [12] GUO, J., JIANG, H., BENES, B., DEUSSEN, O., ZHANG, X. et al. Inverse Procedural Modeling of Branching Structures by Inferring L-Systems. *ACM Trans. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jun 2020, sv. 39, č. 5. DOI: 10.1145/3394105. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3394105>.
- [13] HART, J. C. Perlin noise pixel shaders. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2001, s. 87–94. HWWS ’01. DOI: 10.1145/383507.383531. ISBN 158113407X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/383507.383531>.
- [14] HART, J. C., CARR, N., KAMEYA, M., TIBBITTS, S. A. a COLEMAN, T. J. Antialiased parameterized solid texturing simplified for consumer-level hardware implementation. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*. 1999, s. 45–53.
- [15] HENDRIKX, M., MEIJER, S., VAN DER VELDEN, J. a IOSUP, A. Procedural Content Generation for Games: A Survey. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. feb 2013, sv. 9, č. 1. DOI: 10.1145/2422956.2422957. ISSN 1551-6857. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2422956.2422957>.
- [16] IVSON, P., TOLEDO, R. a GATTASS, M. Solid height-map sets: modeling and visualization. In: červen 2008, s. 359–365. DOI: 10.1145/1364901.1364953.
- [17] JOHNSON, L., YANNAKAKIS, G. a TOGELIUS, J. Cellular automata for real-time generation of. Září 2010. DOI: 10.1145/1814256.1814266.
- [18] KENSLER, A. E. 1 Better Gradient Noise. In: 2008. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15788995>.
- [19] LAGAE, A., LEFEBVRE, S., COOK, R., DEROSSE, T., DRETTAKIS, G. et al. A Survey of Procedural Noise Functions. *Computer Graphics Forum*. 2010, sv. 29, č. 8, s. 2579–2600. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2010.01827.x>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8659.2010.01827.x>.
- [20] LAGAE, A., LEFEBVRE, S., DRETTAKIS, G. a DUTRÉ, P. Procedural noise using sparse Gabor convolution. *ACM Trans. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 2009, sv. 28, č. 3. DOI: 10.1145/1531326.1531360. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1531326.1531360>.
- [21] LEWIS, J. P. Methods for stochastic spectral synthesis. In: *Proceedings on Graphics Interface ’86/Vision Interface ’86*. CAN: Canadian Information Processing Society, 1986, s. 173–179.
- [22] LEWIS, J. P. Generalized stochastic subdivision. *ACM Trans. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 1987, sv. 6, č. 3, s. 167–190. DOI: 10.1145/35068.35069. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/35068.35069>.
- [23] LEWIS, J. P. Algorithms for solid noise synthesis. In: *Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1989, s. 263–270. SIGGRAPH ’89. DOI:

10.1145/74333.74360. ISBN 0897913124. Dostupné z:  
<https://doi.org/10.1145/74333.74360>.

- [24] LEWIS, J.-P. Texture synthesis for digital painting. *SIGGRAPH Comput. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jan 1984, sv. 18, č. 3, s. 245–252. DOI: 10.1145/964965.808605. ISSN 0097-8930. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/964965.808605>.
- [25] LINDENMAYER, A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of theoretical biology*. Elsevier. 1968, sv. 18, č. 3, s. 280–299.
- [26] LINDENMAYER, A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*. 1968, sv. 18, č. 3, s. 280–299. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(68\)90079-9](https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9). ISSN 0022-5193. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022519368900799>.
- [27] LIU, J., SNODGRASS, S., KHALIFA, A., RISI, S., YANNAKAKIS, G. N. et al. Deep learning for procedural content generation. *Neural Computing and Applications*. jan 2021, sv. 33, č. 1, s. 19–37. DOI: 10.1007/s00521-020-05383-8. ISSN 1433-3058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05383-8>.
- [28] MILLER, G. S. P. The Definition and Rendering of Terrain Maps. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. aug 1986, sv. 20, č. 4, s. 39–48. DOI: 10.1145/15886.15890. ISSN 0097-8930. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/15886.15890>.
- [29] MĚCH, R. a PRUSINKIEWICZ, P. Visual models of plants interacting with their environment. In: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1996, s. 397–410. SIGGRAPH '96. DOI: 10.1145/237170.237279. ISBN 0897917464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/237170.237279>.
- [30] NEWLANDS, C. a ZAUNER, K.-P. *Procedural Generation and Rendering of Realistic, Navigable Forest Environments: An Open-Source Tool*. 2022.
- [31] NILSON, B. a SÖDERBERG, M. Game Engine Architecture. *Mälardalen University*. 2007.
- [32] OLANO, M. Modified noise for evaluation on graphics hardware. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005, s. 105–110. HWWS '05. DOI: 10.1145/1071866.1071883. ISBN 1595930868. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1071866.1071883>.
- [33] PERLIN, K. An image synthesizer. *SIGGRAPH Comput. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 1985, sv. 19, č. 3, s. 287–296. DOI: 10.1145/325165.325247. ISSN 0097-8930. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/325165.325247>.
- [34] PERLIN, K. Improving noise. *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2002. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:207550606>.

- [35] PEYTAVIE, A., GALIN, E., GROSJEAN, J. a MÉRILLOU, S. Arches: a Framework for Modeling Complex Terrains. *Computer Graphics Forum*. Duben 2009, sv. 28, s. 457 – 467. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01385.x.
- [36] PRUSINKIEWICZ, P. Graphical applications of L-systems. In: *Proceedings of graphics interface*. 1986, sv. 86, č. 86, s. 247–253.
- [37] PRUSINKIEWICZ, P., HAMMEL, M. S. a MJOLSNESS, E. Animation of plant development. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1993, s. 351–360. SIGGRAPH '93. DOI: 10.1145/166117.166161. ISBN 0897916018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/166117.166161>.
- [38] PRUSINKIEWICZ, P., JAMES, M. a MĚCH, R. Synthetic topiary. In: *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1994, s. 351–358. SIGGRAPH '94. DOI: 10.1145/192161.192254. ISBN 0897916670. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/192161.192254>.
- [39] PRUSINKIEWICZ, P. a LINDENMAYER, A. *The algorithmic beauty of plants*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [40] RODEN, T. a PARBERRY, I. *From Artistry to Automation: A Structured Methodology for Procedural Content Creation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 151–156 s. ISBN 978-3-540-28643-1.
- [41] SMELIK, R., KRAKER, K. J. de, GROENEWEGEN, S., TUTENEL, T. a BIDARRA, R. A Survey of Procedural Methods for Terrain Modelling. In:. červen 2009.
- [42] TECHNOLOGIES, U. *Compare unity plans: Personal, pro, enterprise, industry*. 2024.
- [43] VOHERA, C., CHHEDA, H., CHOUHAN, D., DESAI, A. a JAIN, V. Game engine architecture and comparative study of different game engines. In: IEEE. *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. 2021, s. 1–6.
- [44] WIJK, J. J. van. Spot noise texture synthesis for data visualization. *SIGGRAPH Comput. Graph.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 1991, sv. 25, č. 4, s. 309–318. DOI: 10.1145/127719.122751. ISSN 0097-8930. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/127719.122751>.
- [45] WORLEY, S. A cellular texture basis function. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1996, s. 291–294.