VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

GENEROVÁNÍ HOR A OBLAK POMOCÍ FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE PETR TŮMA
AUTHOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

GENEROVÁNÍ HOR A OBLAK POMOCÍ FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE

CLOUDS AND HILLS GENERATION USING FRACTAL GEOMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE PETR TŮMA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE ING. JIŘÍ VENERA
SUPERVISOR

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií Akademický rok 2007/2008

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Tůma Petr**
Obor: Informační technologie
Téma: **Generování hor a oblak pomocí fraktální geometrie**
Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Prostudujte problematiku spojenou s generováním třírozměrných útvarů pomocí fraktální geometrie.
2. Implementujte Vámi vybrané algoritmy a demonstrujte jejich funkčnost na vhodných datech.
3. Vytvořte aplikaci, která bude generovat tyto objekty a ukládat do vhodného formátu.
4. Zhodnoťte Vámi dosažené výsledky a navrhněte možné rozšíření implementovaných algoritmů.

Literatura:

- Po domluvě na vyžádání u školitele.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Bod 1., započetí řešení bodu 2..

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Venera Jiří, Ing.**, UPGM FIT VUT
Datum zadání: 1. listopadu 2007
Datum odevzdání: 14. května 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
612 66 Brno, Božetěchova 2

L.S.

doc. Dr. Ing. Pavel Zemčík
vedoucí ústavu

KOPIE - originál je archivovaný v knihovně fakulty FIT VUT Brno

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami

1. Pan

Jméno a příjmení: **Petr Tůma**
Id studenta: 78696
Bytem: Na Kopci 4197/16, 586 01 Jihlava
Narozen: 25. 09. 1985, Jihlava
(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta informačních technologií
se sídlem Božetěchova 2/1, 612 66 Brno, IČO 00216305
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....
(dále jen "nabyvatel")

Článek 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   bakalářská práce

Název VŠKP: Generování hor a oblak pomocí fraktální geometrie
Vedoucí/školitel VŠKP: Venera Jiří, Ing.
Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií
Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

tištěné formě počet exemplářů: 1
elektronické formě počet exemplářů: 2 (1 ve skladu dokumentů, 1 na CD)

KOPIE - originál je archivovaný v knihovně fakulty FIT VUT Brno

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti:
   - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....	.....
Nabyvatel	Autor

KOPIE - originál je archivovaný v knihovně fakulty FIT VUT Brno

Abstrakt

Práce se zabývá generováním krajinných útvarů pomocí fraktální geometrie. Je zde vysvětlen pojem fraktál a termíny s ním spojené. Další kapitoly popisují základní teoretické úvahy a implementace jednotlivých algoritmů. Hlavním tématem je generování modelů oblak a pohoří podle hodnot vstupních parametrů, jejich prezentace a uložení na datové médium. Projekt také zahrnuje vlastní rozšíření při generování pohoří. Na závěr jsou shrnuty tendence dalšího vývoje a vlastní poznatky.

Klíčová slova

Fraktál, Hausdorffova dimenze, Hurstův exponent, L-systémy, systémy iterovaných funkcí IFS, iterace, stochastické fraktály, fraktální geometrie, procedurální modelování, Midpoint Displacement, generování plazmy, spektrální syntéza, animace plazmy, výšková mapa, matice, Fourierova inverzní transformace

Abstract

This work is concerned with generation of landscape objects using fractal geometry. In this work is explained what the fractal is and terms associated with them. The other parts describe basic theoretical ideas and implementation of these algorithms. Capital theme is generation of models clouds and hills in values input parameters, their presentation and date media saved there. The project includes my algorithm extension for hills generation of course. At the conclusion of this work, there are summarized tendencies of next development and my results.

Keywords

Fractal, Hausdorff dimension, Hurst exponent, L-systems, Iterated Function Systems IFS, iteration, stochastic fractals, fractal geometry, procedural modeling, Midpoint Displacement, plasma generation, spectral synthesis, plasma animation, height map, height field, matrix, Fourier inverse transformation

Citace

Tůma Petr: Generování hor a oblak pomocí fraktální geometrie, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2008

Generování hor a oblak pomocí fraktální geometrie

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Venery, jsem výhradním autorem veškerých zdrojových textů a knihoven, které jsem v práci použil bez spoluautorství třetí osoby, není-li uvedeno jinak.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

……
Jméno Příjmení
Datum

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Venerovi za motivaci a technickou podporu při řešení všech potíží s vypracováním této práce.

© Petr Tůma, 2008.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah 1
Úvod 3
1 Fraktály 4
1.1 Fraktál jako geometrický útvar 4
1.2 Dimenze 4
1.2.1 Topologická dimenze 4
1.2.2 Hausdorffova dimenze 5
1.3 Definice fraktálu 6
1.4 Stručné rozdělení 6
1.4.1 L-systémy 6
1.4.2 Systémy iterovaných funkcí (IFS) 6
1.4.3 Stochastické fraktály 6
2 Popis implementovaných algoritmů 7
2.1 Midpoint Displacement 7
2.1.1 Výpočet algoritmu 7
2.1.2 Vlastnosti 8
2.2 Generování plasmy 9
2.2.1 Výpočet algoritmu 9
2.2.2 Vlastnosti 10
3 Generování krajinných útvarů 11
3.1 Generování pohoří metodou Midpoint 11
3.1.1 Parametry 11
3.2 Generování plasmy metodou IDFFT 13
3.2.1 Parametry 13
4 Generování oblak 15
4.1 Rozšíření generátoru plasmy 15
4.1.1 Animace plasmy 15
5 Prezentace výsledných dat 16
5.1 Výšková mapa 16
5.2 3D Engine 16
5.2.1 Minimální konfigurace 17
5.2.2 Třída Fractal 17
5.3 Struktura modelu 17
5.3.1 Formát uložení modelu 18

6 Rozšíření 19
6.1 Případná rozšíření 19
6.2 Praktické použití 19
6.2.1 Online hry 20
7 Závěr 21
Literatura 22
Seznam příloh 23

Úvod

Generování modelů oblak a krajiny je v počítačové grafice velmi rozšířenou disciplínou. Její použití je možné pozorovat zejména v počítačových hrách, filmovém průmyslu, meteorologických, geologických systémech, vojenských nebo vesmírných simulátorech.

Existuje mnoho způsobů jak získat model krajiny – výškovým mapováním krajiny, měřením geodety, procedurálním generováním dle parametrů, atd. Každý z těchto způsobů má své výhody i nevýhody. Některé jsou velmi přesné avšak nákladné, některé jsou levnější avšak pro rozsáhlá území téměř nepoužitelná kvůli jejich velké nepřesnosti. Mapování oblak je složitější a obecně výpočetně náročnější proces, proto je model velmi často vygenerován procedurálně. Tohoto způsobu generování využívá i tento projekt.

Tato práce obsahuje popis použitých algoritmů pro generování povrchu terénu a jejich případných modifikací, jedním z těchto algoritmů lze také generovat a animovat oblaka. Součástí projektu je i demonstrační aplikace mezi jejíž základní funkce patří prezentování výsledných dat algoritmů, jejich ukládání a načítání z datového média, vkládání základních krajinných objektů jako jsou stromy a keře a export výškových map nebo textur.

1 Fraktály

V této kapitole si nejprve vysvětlíme pojmy: geometricky hladké útvary, nekonečně členité útvary. Popíšeme jak si Fraktál představit jako geometrický útvar. Popis dimenzí, které jsou pro dané útvary typické, nám pomohou pochopit jejich vzájemný vztah. Pomocí Hausdorffovy dimenze geometricky definujeme pojem Fraktál a jeho obecné vlastnosti. Na závěr kapitoly si jednotlivé fraktály stručně rozdělíme do skupin.

1.1 Fraktál jako geometrický útvar

Fraktál si lze nejintuitivněji představit jako nepravidelný povrch nějakého tělesa v reálném světě. Přestože se nám některé objekty v našem okolí jeví jako geometricky hladké, např. kulatý míč, při bližším přiblížení mikroskopem odhalíme jisté nerovnosti povrhu (prasklinky, deformace materiálu). Takovýto povrch nazveme geometricky nekonečně členitým útvarem – Fraktál. Základní vlastností geometricky nekonečně členitého útvaru je závislost jeho délky na měřítku zobrazení či kroku výpočtu. Tato délka se v měřítku blížícím se nule či kroku blížícím se k nekonečnu limitně blíží k nekonečnu (délka hranic, pobřeží ostrova, řeky, …). V případě výpočtu v jiném rozměru se limitně blíží k nekonečnu odpovídající veličina (obsah, objem).

Opakem jsou geometricky hladké útvary, což jsou tělesa která se dají matematicky vyjádřit konečným počtem parametrů pro ně charakteristických (koule, krychle, Beziérovy křivky, …). Tato tělesa nemění délku v závislosti na měřítku zobrazení ani iteraci výpočtu, či odpovídající veličinu závislou na rozměru výpočtu.

1.2 Dimenze

1.2.1 Topologická dimenze

Geometricky hladké útvary se vyznačují tzv. topologickou dimenzí, tj. dimenzí celočíselnou. Zjednodušeně lze vyjádřit, že hodnota topologické dimenze určuje počet nezávislých proměnných (parametrů) k jednoznačnému definování bodu v rovnicích popisujících daný objekt. Oproti geometricky nekonečně členitým útvarům, jsou vlastnosti geometricky hladkého útvaru nezávislé na měřítku zobrazení.

1.2.2 Hausdorffova dimenze

Hausdorffova dimenze, též nazývaná fraktální dimenzí pro její úzké spojení s fraktály, udává s jakou rychlostí konverguje délka (či její odpovídající veličina při větším počtu rozměrů) nekonečně členitých útvarů k nekonečnu. Hodnota této dimenze je větší než topologická dimenze útvaru z kterého je fraktál sestaven a zároveň je menší než topologická dimenze útvaru v které je fraktál prezentován. V praxi to znamená, že pokud se fraktální a topologická dimenze liší jen málo, je fraktál málo členitý a více se podobá útvaru ze kterého je tvořen.

1.2.2.1 Výpočet dimenze

Výpočet je závislý na počtu útvarů *N* ze kterých se fraktál skládá a na měřítku *s* útvarů nově vznikajících. Pro vysvětlení zde uvedu dva příklady výpočtu fraktálu tvořených z úseček a čtverců.

Obecně platí:

$Ns^D = 1$, kde *s* je měřítko nově vzniklého útvaru a *N* je počet dílů děleného tělesa

Z toho plyne, že Hausdorffova dimenze *D* je rovna:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}}$$

Pro fraktál tvořený úsečkami platí:

$s = \frac{1}{N}$, neboť při n-násobném rozdělení je měřítko n-násobně větší

Pro fraktál tvořený čtverci platí:

$s = \frac{1}{\sqrt{N}}$, neboť při dvojnásobném zvětšení se plocha jednotkového čtverce čtyřnásobí

1.2.2.2 Hurstův exponent

Hurtův exponent *H* je exponent vyjadřující ve fraktální geometrii členitost útvaru, pro něž platí:

$D = T - H$, kde *T* je dimenze topologická, *D* je dimenze Hausdorffova

Jeho hodnota je v intervalu <0; 1>, čím je větší tím je objekt méně členitější. Hurtův exponent se uplatňuje i při výpočtu vzestupu burzovních lístků, v chemii se používá při stanovení těkavosti, atd.

1.3 Definice fraktálu

Obecnou definici fraktálu je velice těžké nalézt, neboť existuje mnoho druhů fraktálů pro které existují různé a daleko přesnější definice. V současné době obecně platná definice fraktálu neexistuje, avšak nejblíže se k definici přiblížil citát:

> *"fraktál je množina či geometrický útvar, jejíž Hausdorffova dimenze je (ostře) větší než dimenze topologická".*
>
> *Benoit B. Mandelbrot*

1.4 Stručné rozdělení

Fraktály se dělí do několika skupin L-systémy, IFS(systémy iterovaných funkcí), Stochastické, Flame, atd. V tomto stručném rozdělení shrnu jen ty které nejzákladnější pro generování geometrických útvarů.

1.4.1 L-systémy

Jsou fraktály definované přepisovanými gramatikami, též se označují jako *Lindenmayerovy systémy*. Principem těchto systémů je přepisování řetězců podle pravidel definované gramatiky, jednotlivým znakům se přiřazuje vlastní geometrický význam. Těmito fraktály se v grafice generují dvourozměrné i trojrozměrné textury, simulují se jimi růsty stromů, keřů a travin.

1.4.2 Systémy iterovaných funkcí (IFS)

Tvorba obrazců metodou IFS patří ke generativním metodám, generativní metody se používají nejen ke generování grafiky, ale i při její kompresi.

1.4.3 Stochastické fraktály

V tomto projektu jsou použity algoritmy popisující stochastické fraktály, které nejlépe popisují přírodní útvary. Do svého výpočtu zahrnují jistou nepravidelnost, kterou lze zohlednit generátory náhodných čísel, např.: generátory bílého šumu, generátorem s Gaussovým rozložením, atd. Algoritmy generování jednotlivých modelů jsou uvedeny v kapitole 2 Popis implementovaných algoritmů.

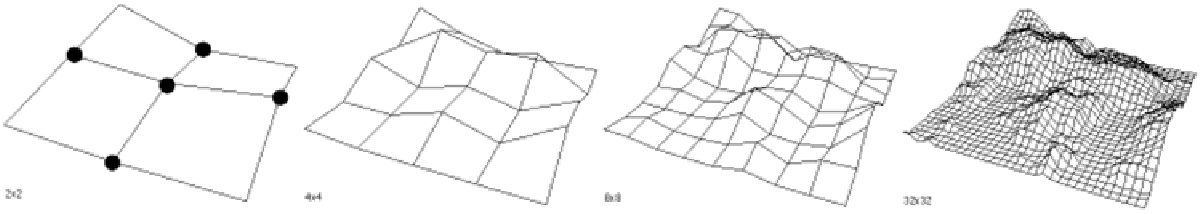
2 Popis implementovaných algoritmů

Úvodem této kapitoly jsou vysvětleny použité algoritmy, jejich užití v řešených úlohách modelování krajinných útvarů. Jsou zde popsány vstupní parametry a jejich vliv na generovaný objekt. Také nejsou opomenuty vlastní modifikace těchto algoritmů. Veškeré uvedené algoritmy generují stochastické fraktály.

2.1 Midpoint Displacement

Jádro algoritmu je založené na principu přesouvání prostředního bodu úsečky. V tomto případě jde o přesouvání prostředních bodů čtverce. Těmito body jsou myšleny prostřední body úseček tvořené kombinací čtyř bodů, jenž tvoří vrcholy (viz. Obrázek 1). Konkrétně se jedná o čtyři body ve středech stran a těžiště, neboť těžiště je tvořené průsečíky obou diagonál.

Po posunutí všech pěti bodů se současný čtverec rozdělí na čtyři stejně velké čtverce a úroveň zanoření *i* se inkrementuje o jedna. S takto rozdělenými částmi se provede totožná operace jako se čtvercem „rodičovským“. Z toho lze usoudit, že algoritmus je rekurentní.



Obrázek 1: Rekurentní rozdělování na podčtverce

2.1.1 Výpočet algoritmu

Je vhodné nejprve spočítat funkční hodnotu těžiště $z = f(x_{1/2}, y_{1/2})$, neboť pro funkční hodnoty středů stran $z = f(x, y)$ platí rovnice (1), podle které se právě k těžišti přičítá náhodné číslo s Gaussovým normalizovaným rozložením o maximální výchylce, omezené Hurstovým exponentem při i-té iteraci. Pro výpočet funkční hodnotu těžiště platí vztah uvedený v rovnici (2), tento vztah vyjadřuje aritmetický průměr funkčních hodnot vrcholů děleného čtverce.

$$f(x,y) = f(x_{1/2}, y_{1/2}) + Gauss(0,1)\frac{Depth}{2^{2H(i+1)}}, \tag{1}$$

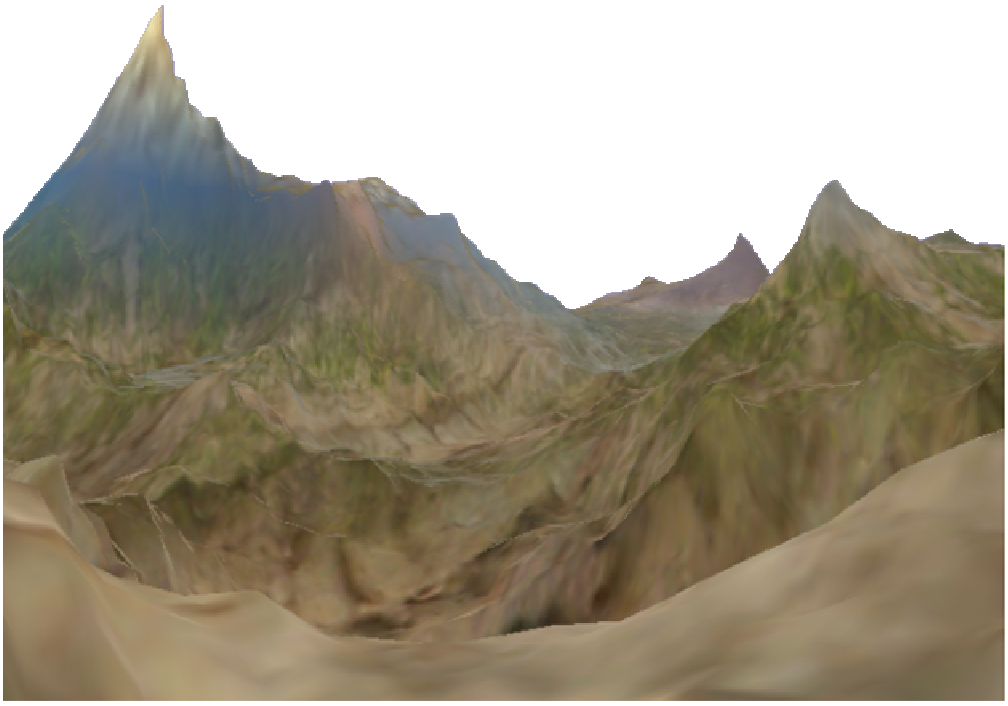
$$f(x_{1/2}, y_{1/2}) = \frac{f(x_0, y_0) + f(x_1, y_0) + f(x_0, y_1) + f(x_1, y_1)}{4}, \tag{2}$$

kde *H* je Hurstův exponent, *Gauss(0,1)* je náhodné normalizované číslo s přibližným Gaussovým rozložením, *Depth* je maximální odchylka bodu, *i* je úroveň zanoření čtverce. Hodnoty funkcí $f(x_n, y_n)$ jsou souřadnice vrcholů v ose *z* rekurentně děleného čtverce.

2.1.2 Vlastnosti

Volbou maximální odchylky prostředního bodu *Depth* lze měnit celkový ráz krajiny, a to od kamenitých pláží až po velehory. Častěji je užit pro modelování velmi členitých exteriérů např.: velehory, hory, kamenité pláně, atd. Odchylku lze během výpočtu měnit nelineárně, což zajišťuje Hurstův exponent *H*. Tento způsob nelineární změny odchylky dodává silnější optický dojem realističnosti.

Midpoint Displacement je také jeden z algoritmů, kterým lze generovat plasmu. Avšak toto použití není příliš vhodné, neboť tato metoda má i své nedostatky, jednou z nich je patrnost přechodů mezi jednotlivými čtverci. Přechody mezi jednotlivými čtverci mohou být velmi nepříjemné zejména při transformování výškové mapy do textury, která použita k potažení modelu oblak. Tento optický ruch je způsoben nedostatkem informací o hranách ostatních čtverců stejné iterace při rekurentním zpracování algoritmu. Proto je tato implementace řešena iterativním opisem tohoto algoritmu.



Obrázek 2: Vyrenderovaný náhled algoritmu Midpoint aplikací

2.2 Generování plasmy

Existuje více způsobů jak generovat plasmu, jednou z nich je i metoda Midpoint. Jelikož plasma bývá velmi často animována (oblaka, olejové skvrny), tuto metodu nepoužijeme. Jednou z možností, která se nabízí je možnost použít metodu spektrální syntézy, která je založena na rekonstrukci amplitud spektra harmonických signálů o různé frekvenci s fázovým posunem. Tuto metodu lze realizovat více způsoby např. Kosinovou transformací. V našem případě je algoritmus realizován inverzní diskrétní fourierově transformaci (IDFT), případně její zrychlené verzi (IFFT). Metoda spektrální syntézy je vhodná i proto, že je možné ji rozšiřovat i do více rozměrů.

2.2.1 Výpočet algoritmu

První fází tohoto algoritmu je vypočtení koeficientů harmonických signálů $A_{k,l}$ a $B_{k,l}$ podle rovnic pro dvourozměrnou Fourierovu transformaci (3.a) a (3.b). Ve fázi druhé se provádí zpětná rekonstrukce harmonických signálů na základě těchto koeficientů podle rovnice (4). Výsledek zpětné rekonstrukce je zaznamenán do výškové mapy (viz. kapitola 4 Prezentace výsledných dat).

2.2.1.1 Výpočet koeficientů fourierovy řady

Koeficienty harmonických signálů dvourozměrné fourierovy řady se vypočítají podle rovnic:

$$A_{k,l} = \alpha \cos(\varphi_\alpha) \cdot \beta \cos(\varphi_\beta), \tag{3.a}$$

$$B_{k,l} = \alpha \sin(\varphi_\alpha) \cdot \beta \sin(\varphi_\beta), \tag{3.b}$$

kde parametry φ_α a φ_β jsou náhodně zvolené fázové posuny jednotlivých harmonických signálů, α a β jsou amplitudy harmonických signálů ovlivněny náhodným normalizovaným číslem s Gaussovým rozložením. Tyto parametry jsou vypočítány podle rovnic:

$$\alpha = Gauss(0{,}1) \cdot (k+1)^{-(H+0{,}5)}, \quad \beta = Gauss(0{,}1) \cdot (l+1)^{-(H+0{,}5)},$$

$$\varphi_\alpha = Random(0{,}1) \cdot 2\pi, \qquad \varphi_\beta = Random(0{,}1) \cdot 2\pi,$$

kde *Gauss(0,1)* je náhodné normalizované číslo s přibližným Gaussovým rozložením, *H* je Hurstův exponent v uzavřeném intervalu <0; 1> ovlivňující sílu vlivu harmonických signálů na výslednou amplitudu, *Random(0,1)* je náhodné číslo s rovnoměrným rozložením. *k*, *l* jsou indexy počítané matice koeficientů. Matice koeficientů je čtvercová o hodnosti *N*, což je zároveň počet harmonických signálů.

2.2.1.2 Rekonstrukce plasmy

Plasma se rekonstruuje ze získaných koeficientů vypočítaných v předchozím odstavci aplikováním diskrétní inverzní fourierově transformaci podle rovnice:

$$X(x,y) = \sum_{k=0}^{N-1}\sum_{l=0}^{N-1}(A_{k,l}\cos(kx+ly) + B_{k,l}\sin(kx+ly)), \qquad (4)$$

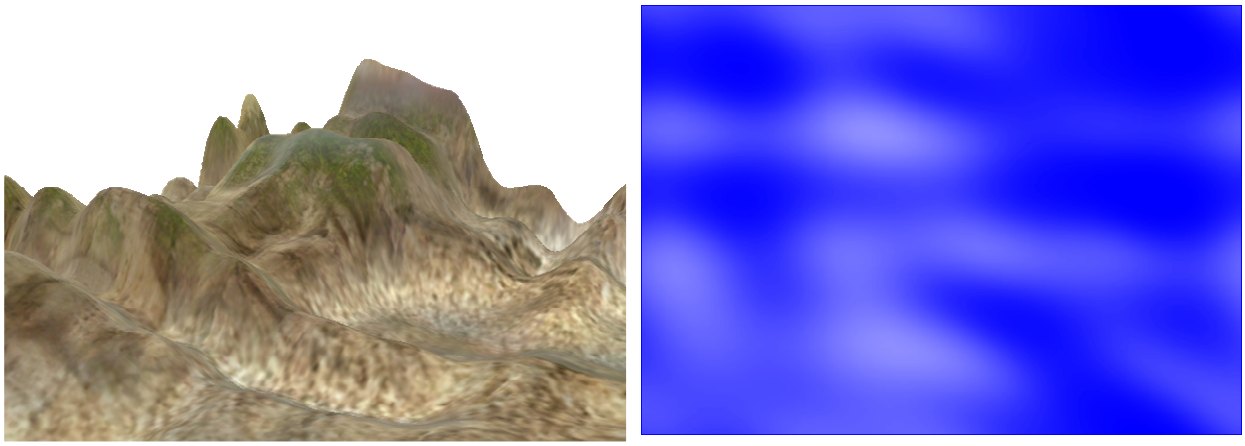
kde N je počet harmonických signálů, ze kterých se výsledná mapa rekonstruuje, k, l jsou indexy počítané matice koeficientů, x, y jsou souřadnice bodu ve výškové mapě do které se amplituda tohoto výsledného signálu zaznamená jako barevná hodnota bodu v odstínech šedi.

2.2.2 Vlastnosti

Velkou výhodou toho algoritmu je možnost jednoduše rozšiřovat dimenzi výpočtu, například jeho rozšíření do trojrozměrného výpočtu. Díky tomuto rozšíření lze generovat trojrozměrná oblaka, která vypadají daleko realističtěji než textury vygenerované jeho dvourozměrnou verzí. Dokonce i animace, což je také jednou z předních vlastností pro který se tento algoritmus používá, vypadá trojrozměrná modifikace toho algoritmu o mnoho realističtěji, než animace textury. Animace se realizuje změnou fázového posunu pří zpětné rekonstrukci plasmy.

Jednou z nevýhod této metody je velká výpočetní náročnost, tudíž je nutné zvážit animaci v reálném čase a vhodně zvolit vstupní parametry, což je Hurtův exponent H a počet harmonických signálů N. Například snažíme-li se vygenerovat například oblaka, bude Hurstův exponent korespondovat s oblačností a počet harmonických signálů ovlivňuje jejich tvar (bouřkové mraky, beránci).

Je-li to nutné, např. pro zobrazení plasmy v textuře, je vhodné výškovou mapu normalizovat v barevném rozsahu palety textury.



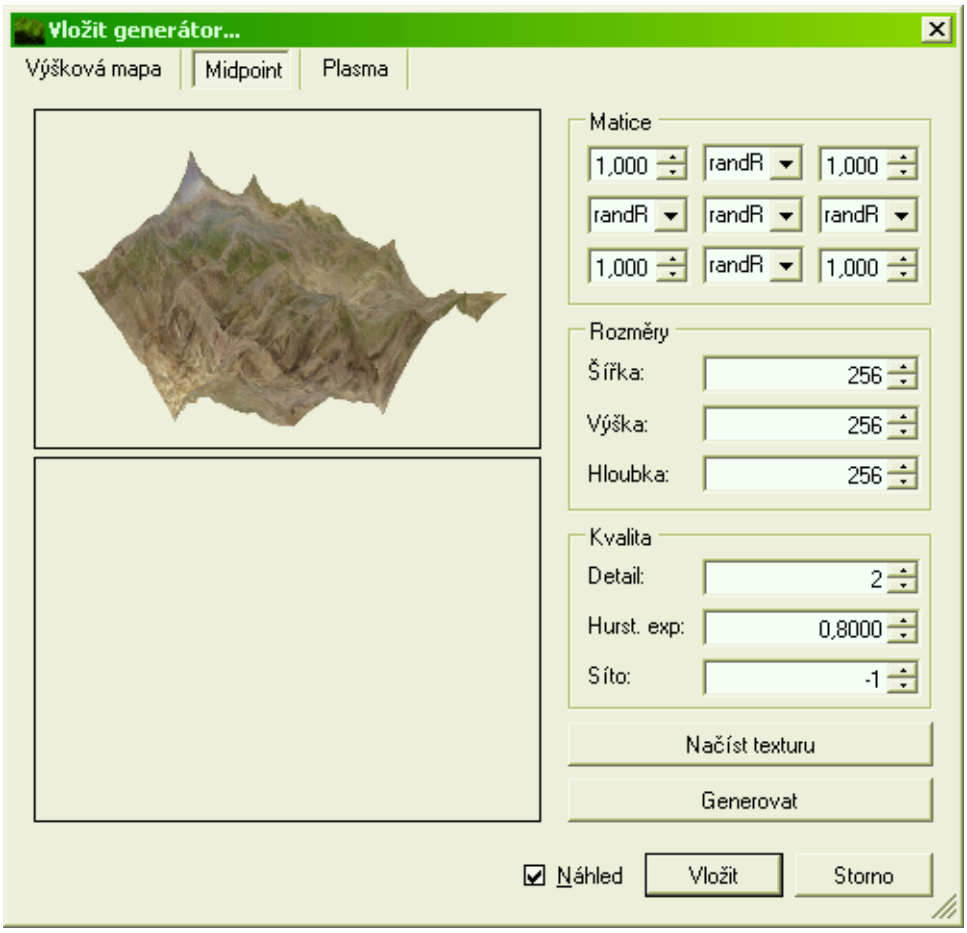
Obrázek 3: Pohoří a textura oblak generované spektrální syntézou

3 Generování krajinných útvarů

V této kapitole jsou uvedeny metody kterými jsou procedurálně vygenerované modely pohoří podle zmiňovaných algoritmů v kapitole 2 Popis implementovaných algoritmů. Nastavení vstupních parametrů jednotlivých metod a jejich modifikace. Kompletní návod a nastavení generování krajinných útvarů se dočtete v manuálu, který je součástí přílohy na CD.

3.1 Generování pohoří metodou Midpoint

Nejprve si uvedeme vygenerování modelu pohoří algoritmem Midpoint Displacement a to přímo v demonstrační aplikaci vložením generátoru pohoří a popíšeme si jeho parametry, kterými lze ovlivnit výsledný model.



Obrázek 4: Generátor pohoří algoritmem Midpoint

3.1.1 Parametry

Parametry jsou rozděleny podle použití do jednotlivých skupin do rámců s nadpisy Matice, Rozměry, Kvalita, z nichž nejzajímavější je skupina Matice, která je zároveň modifikací tohoto algoritmu.

3.1.1.1 Matice

Touto maticí lze dosáhnout větší kontroly generování fraktálního útvaru, je možné do značné míry ovlivnit sklon svahu, lomy terénu, prohloubení nebo naopak špičatost či náklon vrcholku.

Prvky matice v jejích vrcholech, tj. prvky m_{11}, m_{13}, m_{31}, m_{33}, vyjadřují váhu příslušných vrcholů čtverce při výpočtu těžiště v uzavřeném intervalu <0; 1>. Prvky matice m_{12}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{32}, vyjadřují typ použitého náhodného generátoru čísel ovlivňující přírůstek odpovídajícímu bodu děleného čtverce, viz Obrázek 1.

K dispozici jsou tři druhy generátoru:

- **randR** – generuje náhodné reálné číslo v uzavřeném intervalu <-1; 1>
- **randN** – generuje náhodné normalizované reálné číslo v uzavřeném intervalu <0; 1>
- **randG** – generuje náhodné normalizované číslo s přibližným Gaussovým rozložením

3.1.1.2 Rozměry

Rozměry jsou standardní maximální možné rozměry trojrozměrného objektu – *šířka, výška, hloubka*. Parametry jsou celá kladná čísla v uzavřeném intervalu <1; 65535>. Doporučuje se však ponechávat rozměry, které tvoří krychli. Tedy všechny tři parametry nastavit na stejné hodnoty, případně s rozdílnou hloubkou.

3.1.1.3 Kvalita

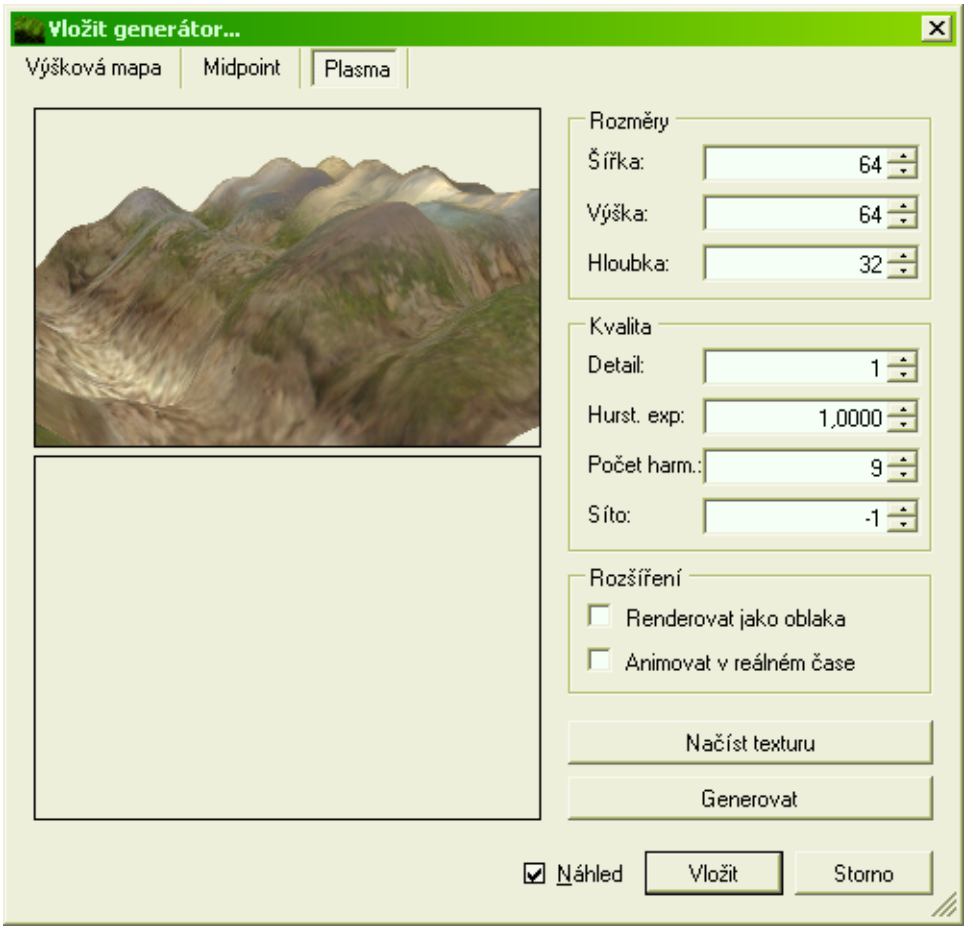
V tomto rámci lze nastavil parametry, které ovlivňují kvalitu výsledného modelu a rychlost jeho výpočtu, a to parametry: detail, Hurstův exponent, síto.

Parametry:

- **Detail** představuje hustotu trojúhelníkové sítě modelu, tento parametr nabývá hodnot z uzavřeného intervalu <1; 32>.
- **Hurtův exponent** udává členitost povrchu objektu, udává zda bude obsahovat více hladkých ploch patrných v nížinách, či zda se bude podobat více kamenité pahorkatině. Parametr nabývá hodnot v intervalu <0; 1>.
- **Síto** je inicializační konstanta generátoru náhodných čísel, slouží k ukotvení stávajícího tvaru fraktálu, pokud chceme měnit parametry matice nebo kvality. Toto ukotvení ovšem neplní svou funkci v případě změny rozměru. Parametr nabývá hodnot v intervalu <-1; 65535>, kdy hodnota -1 je zvláštním případem. Při nastavení konstanty na tuto hodnotu se generátor při každém generování inicializuje náhodným číslem.

3.2 Generování plasmy metodou IDFFT

Dalším implementovaným algoritmem je generování pohoří pomocí plasmy metodou IDFFT. Tento algoritmus si opět uvedeme přímo v demonstrační aplikaci spolu s popisem parametrů ovlivňující výsledný model. Tato metoda je výpočetně náročnější, proto je model defaultně nastaven na menší rozměry.



Obrázek 5: Generátor pohoří pomocí plasmy

3.2.1 Parametry

Tento generátor vlastní tři skupiny parametrů seskupených do tří rámců s názvy: Rozměry, Kvalita, Rozšíření.

3.2.1.1 Rozměry

Rozměry jsou standardní maximální možné rozměry trojrozměrného objektu – *šířka, výška, hloubka*. Parametry jsou celá kladná čísla v uzavřeném intervalu <1; 65535>. Doporučuje se však ponechávat rozměry, které tvoří krychli. Tedy všechny tři parametry nastavit na stejné hodnoty, případně s rozdílnou hloubkou.

3.2.1.2 Kvalita

V tomto rámci lze nastavil parametry, které ovlivňují kvalitu výsledného modelu a rychlost jeho výpočtu, a to parametry: detail, Hurstův exponent, síto.

Parametry:

- **Detail** představuje hustotu trojúhelníkové sítě modelu, tento parametr nabývá hodnot z uzavřeného intervalu <1; 32>.
- Hurtův exponent udává členitost povrchu objektu, udává zda bude obsahovat více hladkých ploch patrných v nížinách, či zda se bude podobat více kamenité pahorkatině. Parametr nabývá hodnot v intervalu <0; 1>.
- **Počet harmonických signálů** udává počet harmonických vůči sobě náhodně fázově posunutých křivek s náhodně generovanou velikostí amplitudy úměrnou Hurstově exponentu. Tento počet ovlivňuje členitost/hrbolatost generovaného povrchu. Parametru nabývá hodnot v uzavřeném intervalu <1; 32>.
- **Síto** je inicializační konstanta generátoru náhodných čísel, slouží k ukotvení stávajícího tvaru fraktálu, pokud chceme měnit parametry matice nebo kvality. Toto ukotvení ovšem neplní svou funkci v případě změny rozměru. Parametr nabývá hodnot v intervalu <-1; 65535>, kdy hodnota -1 je zvláštním případem. Při nastavení konstanty na tuto hodnotu se generátor při každém generování inicializuje náhodným číslem.

3.2.1.3 Rozšíření

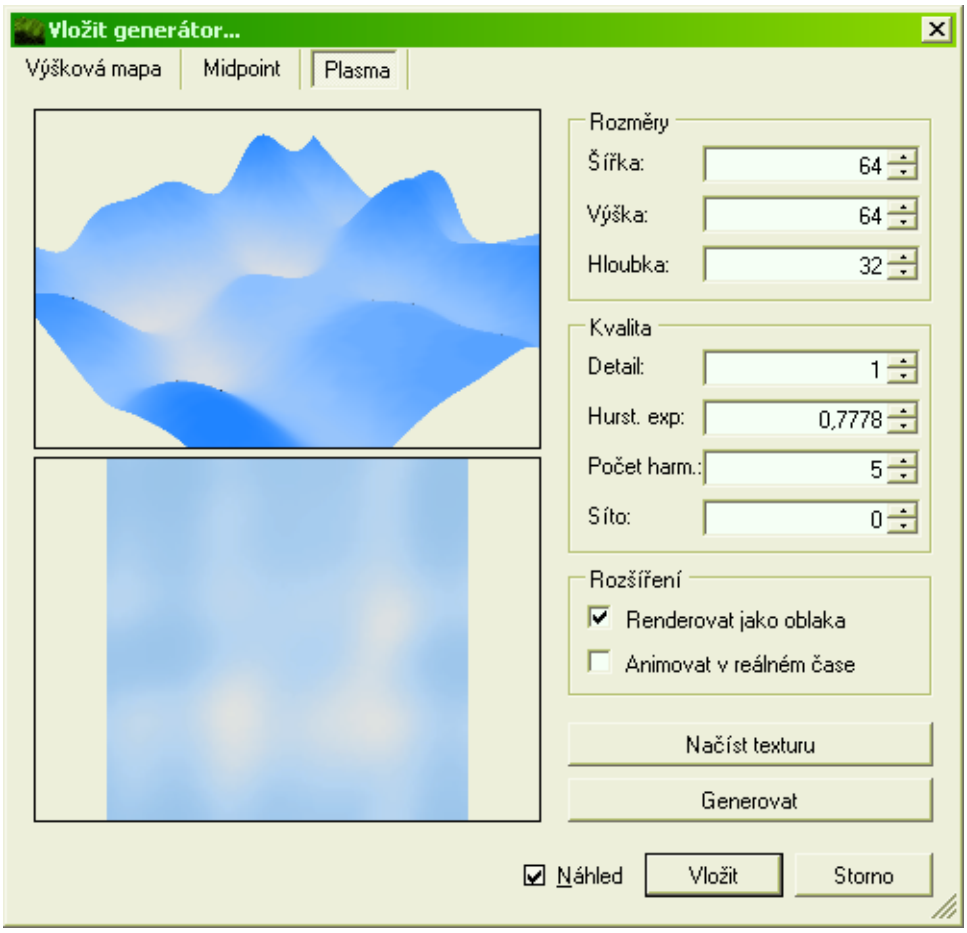
Rozšířením toho algoritmu je vykreslení a animace oblak jako dvourozměrného modelu a textury, které je blíže popsáno v následující kapitole 4 Generování oblak.

4 Generování oblak

Generování oblak je založeno na metodě generování plasmy pomocí IDFFT, které je blíže popsáno v předešlé kapitole 2 Popis implementovaných algoritmů. V této kapitole se seznámíme s rozšířením generátoru plasmy implementovaném v demonstrační aplikaci (viz. Obrázek 5) a uvedeme případná rozšíření pro realističtější optický dojem. Kompletní postup generování oblak je popsán v dodaném manuálu na CD.

4.1 Rozšíření generátoru plasmy

Pomocí toho rozšíření je možně generovat textury oblak a aplikovat je na síťový model. V rámci skupiny Rozšíření stačí zaškrtnout pole s nápisem „Renderovat jako oblaka“.



Obrázek 6: Generátor oblak pomocí plasmy

4.1.1 Animace plasmy

Náhled animace je možné zapnout zaškrtnutím pole s nápisem „Animovat v reálném čase“, toto pole slouží pouze jako náhled a to se simulovaným větrem s rychlostí $\omega = (4, 0, 13)$ rad/s.

5 Prezentace výsledných dat

V této předposlední kapitole je objasněno jakým způsobem jsou výsledná data prezentována uživateli, kterých prostředků je k dosažení cíle použito, jaké minimální konfigurace je zapotřebí, tendence dalšího vývoje a formát uložení výsledného modelu.

5.1 Výšková mapa

Výškovou mapou rozumíme matici a o rozměrech 2^n. Toto matici reprezentuje bitmapa, jejíž barevná paleta je v odstínech šedi v rozsahu 0 – 255. Barvou pixelu vyjádříme výšku bodu – polohu ve směru osy z. Z výškové mapy je možné generovat i texturu, např. při generování oblak a jejich textury. Výškovou mapu lze z aplikace vyexportovat jako samostatnou bitmapu nebo ji spolu s texturou a ostatními daty definující model uložit do výstupního souboru ve formátu XML.

5.2 3D Engine

Tento projekt je postaven na projektu s pracovním názvem „Engine“. Tento projekt užívá knihoven Microsoft DirectX © Copyright Microsoft Corporation 2008, Všechna práva vyhrazena. Tyto runtimové knihovny jsou dodávány spolu s tímto projektem na CD médiu v souladu s licenční smlouvou pro redistribuci těchto knihoven.

V tomto projektu je využito pokročilých metod nasvětlování, volumetrického texturování, efekty mlhy a alpha-blendingu poskytovaných těmito knihovnami. Projekt je implementován v programovacím jazyce C# verze 2.0 společnosti Microsoft (Microsoft Visual Studio Proffesional 2005). Engine je v bakalářské práci užitý jako sdílená knihovna (DLL), neboť není součástí jejího zadání. Dodaná knihovna je psána pro 32-bitové platformy, pro platformy 64-bitové není testována. Současná verze je ve fázi vývoje, a proto ji nedoporučuji prozatím užívat v jiných aplikací bez podrobné znalosti vnitřního kódu a jeho funkce.

Prohlašuji, že projekt Engine je výhradně mým autorským dílem a není jiného autora, který by se na tomto projektu podílel.

5.2.1 Minimální konfigurace

Jelikož je projekt ve fázi vývoje, minimální konfigurace není přesně známa, proto za minimální konfiguraci považujte konfiguraci doporučenou.

Doporučená konfigurace

- Procesor ~ 1GHz, 1GB RAM, Microsoft Windows XP SP2, x86
- Grafická karta kompatibilní s DirectX 9.0c, podporující renderování do okna i mimo celoobrazovkový režim, nastavení zobrazení barevné hloubky minimálně 16bitů, podporující hardwarové nasvětlování, podporu stencil-bufferů, phongovo stínování a anisotropické filtrování textur minimálně čtvrté úrovně.
- DirectX 9.0c Development Runtime (November 2007)

Varování

Projekt Engine není kompatibilní s operačními systémy Microsoft Windows Vista!

5.2.2 Třída Fractal

Součástí projektu je i třída Fractal, popsaná v souboru Fractal.cs v níž jsou implementovány popisované algoritmy Midpoint Displacement a generování plasmy metodou IDFFT. Soubor s touto třídou je připojen k technické zprávě na dodaném CD, neboť jak již bylo zmíněno projekt Engine není předmětem zadání a bylo by nesmyslné zahrnout tuto třídu do jiného projektu.

5.3 Struktura modelu

Z výškové mapy vytvoříme model v podobě pravidelné trojúhelníkové sítě, který budeme prezentovat uživateli jako výsledná data k nahlédnutí. K tomuto výslednému modelu je nutné připojit texturu a offset modelu v ose-y, pokud je model posunutý do záporných hodnot – výšková mapa tento fakt nezohledňuje kvůli své barevné hloubce udávané v kladných hodnotách. Pro kvalitní rekonstrukci je potřeba uložit informace i o hloubce a kvalitě modelu.

Pomocí hloubky je možné výškovou mapu normalizovat vůči maximální hodnotě indexu odstínu šedi (255) na přibližný tvar původního modelu. Při hloubce větší než je maximální hodnota indexu odstínu šedi mohou vznikat chyby v důsledku zaokrouhlování mezi jednotlivými úrovněmi – kvantizační skok.

Kvalita modelu vypovídá o hustotě trojúhelníkové sítě. Výšková mapa je ukládána celá, tento parametr nemá vliv na její velikost nebo poměr komprese. Tento fakt zajišťuje možnost po znovunačtení měnit dynamicky kvalitu modelu, bez nutnosti znova generovat fraktál, kterým je tvořen.

5.3.1 Formát uložení modelu

Data ukládaného souboru jsou ve formátu XML. Do ukládaného souboru se včetně informací uvedených v této kapitole uloží i informace o pozici, typu a velikosti základních krajinných objektů. Uvedená struktura výstupního souboru je v této formě pro přehlednost. Vlastnosti základních datových typů je vhodné uložit jako atributy jednotlivých větví. Smysl ve tvaru v jakém jsou mají větve *HeightMap* a *Texture*.

Uloženy soubor má následující konstrukci:

```
<Model>
  <Offset>float</Offset>
  <Detail>unsigned int</Detail>
  <Depth>unsigned int</Depth>
  <HeightMap>Base64String</HeightMap>
  <Texture>Base64String</Texture>
  <Objects>
    <Object>
      <Position>
        <X>float</X>
        <Y>float</Y>
        <Z>float</Z>
      </Position>
      <Scale>
        <X>float</X>
        <Y>float</Y>
        <Z>float</Z>
      </Scale>
      <Type>Shurb | Tree</Type>
    </Object>
    ...
  </Objects>
</Model>
```

Mezi páry tagů jsou uvedeny hodnoty naznačených datových typů. Hodnota struktury Object. Type je výčtový datový typ nabývající hodnot Shurb – keř nebo Tree – strom. Datový typ Base64String je řetězec kódovaný ve formátu Base64, tento formát je použit pro uložení binárních dat výškové mapy a textury.

6 Rozšíření

V této kapitole jsou uvedena případná rozšíření, která udávají tendence dalšího vývoje v bližším časovém horizontu. Jsou zde uvedena i praktická použití v jiných projektech, ve kterých tento projekt najde uplatnění.

6.1 Případná rozšíření

Jedním z hlavních rozšíření jak již bylo naznačeno v kapitole 2 Popis implementovaných algoritmů, by bylo rozšíření algoritmu generování plasmy spektrální syntézou do třetího rozměru. Takto vygenerovaný trojrozměrný fraktál, by se dal lehko převézt do trojúhelníkové sítě modelu, který by dosáhl daleko silnějšího optického dojmu reálnosti. Animace toho modelu by také nebyla o mnoho složitější než animace dvourozměrné plasmy, ve fázi rekonstrukce by se posouvali fázové posuny všech harmonických signálů ve všech třech směrech. Tento postup by ovšem byl výpočetně náročnější než již dost náročný současný dvourozměrný výpočet.

Další rozšíření se týkají aplikace samotné, ta by mohla být rozšířena o generátory hydrometeorologického systému: mlhy, deště, vodní plochy, vodní toky. O generátory flóry, například vygenerování lesa a jiných porostů. V konečném stádiu by mohli být implementovány i simulátory: simulace růstu rostlin, nebo celých ekosystémů, meteorologické modely, šíření zamoření ovzduším, vodními toky a podzemními toky, radioaktivní spad, rozpad zemské kůry při zemětřesení, detekce případných epicenter. Takto rozsáhlý projekt by bylo jistě nutné částečně napojit na některý ze systémů GIS. Anebo by mohl čistě sloužit k zábavě jako generátor opticky příznivých útvarů pro počítačové hry nebo film.

6.2 Praktické použití

Praktické použití je velmi široké, spousta praktických užití byla nastíněna v předchozí podkapitole 6.1 Případná rozšíření. Fraktály jsou již téměř šedesát let rozvíjenou matematickou disciplínou a uplatnění si našly ve spoustě vědních oborů, jako jsou fyzika, chemie, geometrie a v neposlední řadě v multimediálním průmyslu.

V počítačovém a celkově v elektrotechnickém průmyslu fraktály našli velmi široké uplatnění, například v telekomunikacích se používají pro redukci šumu. Velké uplatnění bylo ovšem nalezeno i při práci s multimédii a to při kompresi bitmap a videa, ale také při redukci šumu ve zvukových záznamech a jejich kompresi.

V současné době při velkém rozmachu počítačových online her je relevantní uplatnění právě při jejich vývoji.

6.2.1 Online hry

Obrovskou výhodou fraktálních útvarů je malé množství vstupních parametrů oproti velikosti jejich možnému výslednému modelu. Velikost uložených parametrů je v řádech několika bajtů, kdežto uložený výsledný model je v řádech několika megabajtů. Tohoto obrovského poměru lze využít například v online hrách při synchronizaci deformace terénu. Například v bojových hrách kdy dochází k velmi časté deformaci v krátkém časovém intervalu je přenášení velkých bloků dat popisujících deformované zóny nepřijatelné – synchronizace deformací by zabírala velmi mnoho času a při vyšším počtu uživatelů by hra byla naprosto nehratelná. Jednou z optimalizací této metody je přizpůsobit velikost přenášených dat výkonu každého ze strojů cílových uživatelů a tím tento objem zmenšit. Tato optimalizace vede k pravděpodobnému zahlcení hracího serveru a jeho zkolabování z důvodů vyčerpání času maximální možné odpovědi (timeouty), atd.

Fraktály nabízí řešení: místo toho aby se přenášely velké objemy dat, přenese se pouze popis fraktálu deformované zóny, jejíž deformace vznikla odečtením fraktálního tělesa od terénu. Oproti předcházejícímu postupu, bude sítí přeneseno jenom několik bajtů zabírající popis a cílový stroj rozhodne podle své konfigurace o kvalitě vygenerované deformace.

Tento způsob je velmi efektivní hlavně pro jednotnou krátkou informaci kterou server odešle klientům a nemusí se zatěžovat ořezáváním přebytečných informací. Celková latence komunikace bude o to příznivější a pravděpodobnost vzniku timeoutů je mnohem menší.

7 Závěr

V aplikaci bylo z hlediska vizuálního i výkonového dosaženo kvalitních výsledků. Výškové mapy jsou generovány velmi různorodě a realisticky. Jednotlivé algoritmy jsou optimalizovány pro rychlost, díky čemuž je možné plasmu, vygenerovanou spektrální syntézou s rozumnými parametry, animovat i v reálném čase na stroji průměrného výkonu.

S výslednými daty vlastních modifikací algoritmu, což představuje u algoritmu Midpoint Displacement použití matice ovlivňující váhu vrcholů při výpočtu a typy použitých generátorů pro jednotlivé středy stran a samotné těžiště, bylo dosažené též velmi uspokojivých výsledků.

Tento projekt není v konečné fázi a bude dál rozvíjen podle některých z námětů uvedených v předchozí kapitole 6 Rozšíření.

Literatura

[1] Tišnovský, P.: seriál Fraktály v počítačové grafice, 12. 9. 2006, URL: http://www.root.cz/clanky/metoda-presouvani-prostredniho-bodu-a-obrazky-plasmy (březen 2008).

[2] Novák, P.: Procedurální model krajiny – diplomová práce, 26. 5. 2005, Praha, URL: https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/novakp_2005dipl.pdf, (březen 2008).

[3] Wikipedia Foundation Inc., Wikipedia, URL: www.wikipedia.org (duben 2008)

Seznam příloh

Příloha A. CD obsahující projekt v digitální podobě se všemi zdrojovými texty a dokumentacemi