

Zadání bakalářské práce

Název: Simulování vodního povrchu
Student: Hong Son Ngo
Vedoucí: Ing. Petr Pauš, Ph.D.
Studijní program: Informatika
Obor / specializace: Webové a softwarové inženýrství, zaměření Počítačová grafika
Katedra: Katedra softwarového inženýrství
Platnost zadání: do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Voda a vodní hladina se vyskytuje ve spoustě grafických aplikací a hrách a jejich realistická real-time simulace je žádoucí. Cílem této práce je vytvořit simulátor vodního povrchu a jeho případných světelných efektů na tělese pod vodou.

1. Analyzujte možnosti real-time simulace vodní hladiny.
2. Analyzujte vhodné nástroje pro její simulaci (např. OpenGL, Unity, atd.).
3. Na základě analýzy vyberte vhodný nástroj pro simulaci a navrhněte prototyp simulace.
4. Ve zvoleném nástroji implementujte.
5. Vytvořte testovací scénu, která simulaci demonstruje.



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Simulování vodního porvrchu

Hong Son Ngo

Katedra softwarového inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Petr Pauš, Ph.D.

12. března 2022

Poděkování

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

Prohlášení

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

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

V Praze dne 12. března 2022

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2022 Hong Son Ngo. Všechna práva vyhrazena.

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

Odkaz na tuto práci

Ngo, Hong Son. *Simulování vodního povrchu*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2022.

Abstrakt

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

Klíčová slova Nahraďte seznamem klíčových slov v češtině oddělených čárkou.

Abstract

Sem doplňte ekvivalent abstraktu Vaší práce v angličtině.

Keywords Nahraďte seznamem klíčových slov v angličtině oddělených čárkou.

Obsah

Úvod	1
1 Cíl práce	3
2 Základ teorie mechaniky tekutin	5
2.1 Navierovy–Stokesovy rovnice	5
2.1.1 Vysvětlení	5
2.2 Využití	6
2.3 Popisy tekutiny	7
2.3.1 Lagrangeův popis	7
2.3.2 Euleurův popis	7
3 Vlastnosti vodního povrchu	9
3.1 Dynamické vlastnosti	9
3.1.1 Procedulární metody	10
3.1.1.1 Vlnění za pomocí sinusoid	11
3.1.1.2 Vlnění za pomocí Gerstnerovy vlny	12
3.2 Světelné vlastnosti	13
4 Realizace	15
Závěr	17
A Seznam použitých zkratek	19
B Obsah přiloženého CD	21

Seznam obrázků

3.1	Ukázka off-line simulace Eulerovy tekutiny [Guendelman05]	10
3.2	Simulace vlnění pomocí jedné sinusoidy	11
3.3	Simulace vlnění pomocí sčítání sinusoid	11
3.4	Porovnání mezi vlnami funkcí 3.1 a 3.3	12
3.5	Gerstnerova vlna s fázovou rychlostí c , vlnovou délkou λ a rozdílem hřebenu a údolí H	12
3.6	Porovnání hodnot s ve dvourozměrném prostoru	13

Úvod

Kvalita herních titulů za poslední let ohromně vzrostla. Jejich úspěch lze připsat nejen zajímavému příběhovému obsahu, ale také i jejich vizuálnímu zpracování. Právě v grafickém provedení můžeme vidět největší pokrok. Díky hardwarovým zlepšením ve výpočetních technologiích zejména v grafických kartách se obraz grafických aplikací čím dál více blíží fotorealistickým výsledkům a s příchodem zařízení pro virtuální a rozšířenou realitu je o realistický obraz ještě větší zájem.

Co rozlišuje scény napříč historií her, jsou speciální efekty. Na základě kvality jejich provedení je hráč hlouběji vnořen do virtuálního světa a následně i do jeho příběhu. Jedním z takových efektů jsou např. přírodní fenoména jako pohyb plamene, vlnění hladiny vody, proudění větru...

Fyzikálně korektní chování přírodních jevů však zůstává do dnešního dne mezi komplexnějšími problémy. Mezi těmi výpočtně nejobtížnějšími je považováno proudění tekutin, do kterých patří jak plynné, tak i kapalné skupenství. Pro vizualizaci se většina metod zabývá zejména kapalinami kvůli její povaze (jsou lidským okem vidět), ale v některých případech lze postupy pro simulování proudění kapalin využít i pro zobrazení plynů jako např. kouře nebo plamene.

Kvůli vysoce dynamickému chování tekutin se však v současnosti nejrealističtějších výsledků dosáhne hlavně off-line metodami. Real-time aplikace využívají stejných principů, ale s podstatnými kompromisy jak paměťovými, tak i výpočetními. Vzhledem k tomu, že některé aplikace nevyužijí přesné a hlavně výpočetně drahé simulace, tak napodobují jen výsledné efekty, které se nijak neopírají o fyzikální pravidla. Ačkoli off-line metody zobrazují věruhodně chování kapalin, resp. plynů, nejsou nijak zastoupeny v hrách, neboť je interakce s uživatelem a dynamické prostředí scén nedovolí využít.

Obsah této bakalářské práce se zabývá real-time simulací vodního povrchu a jeho případnými světelnými efekty jak na hladině, tak i na tělesa pod ní, jejíž aplikace by bylo možné využít k fotorealistickému zobrazení virtuálních scén v hrách.

KAPITOLA **1**

Cíl práce

Cílem teoretické části této bakalářské práce je prozkoumat možnosti real-time simulace vodního povrchu a připadných vlastností, které interakují se světelnými paprskami osvětlující vodní plochu. Na základě analýzy současných metod prozkoumat vhodné nástroje pro její zobrazení v grafických aplikacích jako jsou počítačové hry.

Následně v praktické části je cílem vybrat vhodné simulační metody pro real-time grafické aplikace, navhrnout prototyp simulátoru a ve zvoleném nástroji ho implementovat a nakonec vytvořit testovací scénu, která simulaci demonstруje.

Základ teorie mechaniky tekutin

V této kapitole je shrnutí teorie mechaniky tekutin, která je nezbytnou součástí pro simulování fyzikálně korektního chování vody. Teorie je zde vyložena takovým způsobem, aby byl čtenář s ní seznámen a co nejrychleji pochopil principy chování tekutin, neobsahuje žádné rigorózní vysvětlení problematiky.

2.1 Navierovy–Stokesovy rovnice

Proud tekutin se v reálném světě řídí podle Navierovými–Stokesovými rovnicemi, soustavou nelinearních diferenciálních rovnic.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \vec{g} + \nu \nabla \cdot \nabla \vec{u} \quad (2.2)$$

Kde vektor $\vec{u} = (u, v, w)$ označuje rychlosť tekutiny, ρ označuje hustotu tekutiny, p tlak, kterým působí tekutina na své okolí, $\vec{g} = (x, y, z)$ je gravitační zrychlení, ν je značení kynematické viskozity tekutiny. Symboly ∇ , $\nabla \cdot$, $\nabla \cdot \nabla$ označují diferenciální operátory nabla, divergence a Laplacův operátor.

2.1.1 Vysvětlení

Před vysvětlení jednotlivých rovnic je dobré zmínit, že většina teorie mechaniky tekutin je založena na odvětví matematiky vektorové analýzy a pracují s vektorovými poli, resp. skalárními poli. Navierovy–Stokesovy rovnice např. pracují s vektorovým poli, resp. se skalárními poli, kde jednotlivým bodům prostoru přiřazují vektor určující rychlosť proudu tekutiny, resp. hodnotu tlaku.

Na první pohled vypadají rovnice těžce uchopitelné, ale myšlenka za nimi je velmi jednoduchá. První rovnice 2.1 popisuje zákon o zachování hmotnosti, tím je myšleno, že není možné, aby hmota tekutiny na některém místě vznikla nebo zanikla.

Druhá rovnice 2.2 popisuje zákon o zachování hybnosti a je ve své podstatě Newtonův druhý zákon.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.3)$$

Zrychlení \vec{a} lze přepsat je derivací rychlosti podle času.

$$\vec{F} = m \frac{D\vec{u}}{Dt} \quad (2.4)$$

Pro odvození celé rovnice je třeba rozvést sílu \vec{F} , které na tekutinu působí. Jedna z nich je samozřejmě gravitace, jejíž hodnota je vyčíslena jako $m\vec{g}$.

Další síly vytváří tekutina sama na sobě. První z nich je síla způsobena rozdílem tlaků v tekutině. Tekutina se v oblastech s vyšším tlakem přesouvá do oblastí s nižším tlakem. Její hodnotu můžeme zapsat jako $-V\nabla p$ ¹.

Další síla působící na tekutinu je ovliněna její viskozitou. Viskozita působí při každém pohybu částic tekutiny [lecture notes] a snaží se vyrovnat rychlosť částic rychlostí svých sousedních částic. Její hodnotu můžeme vyjádřit jako $V\mu\nabla \cdot \nabla\vec{u}$ ², kde μ označuje koeficient dynamické viskozity.

$$m\vec{g} - V\nabla p + V\mu\nabla \cdot \nabla\vec{u} = m \frac{D\vec{u}}{Dt} \quad (2.5)$$

Rovnice 2.3, 2.4 a 2.5 předpokládají, že tekutinu lze rozložit na konečně mnoho malých částí, tímto způsobem je do výpočtu představena výpočetní chybu. Řešením toho problému je celou rovnici 2.5 je vydělit V , aby zachytily pohyb nekonečně mnoha malých částic tekutin. Dobré je připomenout, že hustota ρ lze vyjádřit jako $\frac{m}{V}$

$$\rho\vec{g} - \nabla p + \mu\nabla \cdot \nabla\vec{u} = \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} \quad (2.6)$$

Následně po vydělení hustoty ρ , vyjádření derivace $\frac{D\vec{u}}{Dt}$ řetízkovým pravidlem a prohození sčítanců získáme druhou Navierovu–Stokesovu rovnici. Kynematická vyskozita ν je rovna $\frac{\mu}{\rho}$.

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial\vec{t}} + \vec{u} \cdot \nabla\vec{u} + \frac{1}{\rho}\nabla p = \vec{g} + \nu\nabla \cdot \nabla\vec{u} \quad (2.7)$$

2.2 Využití

Výhodou Navierovy–Stokesovy rovnice je, že lze aplikovat na téma jakékoliv tekutiny, a tím padem je možné využitím pro modelování počasí, podnebí pro předpověď počasí, proudění v oceánech, výpočtu aerodynamických vlastností

¹Operace ∇p vyjadřuje vektorové pole, ve kterém vektory směřují, z jednotlivých bodů na své blízké okolí, aby jeho hodnota ve skalárním poli nejrychleji vzrostla.

²Operace $\nabla \cdot \nabla\vec{u}$ vyjadřuje míru deviace rychlosti částice okolo svého okolí.

vozidel. Přestože využití rovnic je nespočetné, mají zásadní problém, neboť do dnes nevíme, zdali mají pro náhodný vstup nějaké řešení. Pro zjednodušení výpočtu existují několik approximací, které je umožňují využít se zanedbaelnými chybami v modelovacích systémech.

2.3 Popisy tekutiny

V teorii mechaniky tekutin existují dva různé pohledu popisů. Na základě těchto popisů jsou následně založeny algoritmy pro simulaci kapalin, resp. plynů, které jich využívají pro diskretizaci Navierových–Stokesových rovnic.

2.3.1 Lagrangeův popis

Lagrangeův popis je jeden z popisů kontinua, který si většina nejspíše vybaví. Na tekutinu nahlíží jako na systém částic. Na jednotlivé body tekutiny nahlíží jako částice. Částice mohou být na základě potřeby různě velké, např. jako molekule nebo části tekutiny o nějakém objemu. Každé části Lagrangeův popis přiradí jeho pozici \vec{x} a rychlosť \vec{u} a sleduje ho, jak se hodnoty v čase mění.

2.3.2 Eulerův popis

Eulerův popis kontinua je na první pohled neintuitivní. Eulerův postup diskretizuje prostor tekutiny na pevně dané oblasti, ve kterých měří vlastnosti tekutiny jako např. tlak, rychlosť proudu, teplotu, jak se v čase mění. Přestože tento postup vypadá omezující a složitý kvůli sledování veličin tekutin jen v pevných bodech, je v metodách pro simulovalní tekutin preferovaným popisem kontinua.

KAPITOLA 3

Vlastnosti vodního povrchu

Tato kapitola obsahuje popis vizuální vlastnosti vodní hladiny, které v reálném lze zpozorovat a k jejím hlavním rysům jsou vypsané algoritmy, které je simulují. Z pohledu počítačové grafiky lze vlastnosti vody lze rozdělit do dvou kategorií:

- dynamické vlastnosti** popisující pohyb vodní hladiny,
- světelné vlastnosti** popisující interakce povrch vody se světelnými prsky.

3.1 Dynamické vlastnosti

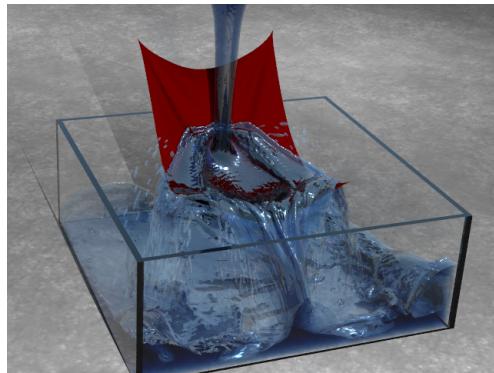
Dynamické vlastnosti zachycují, jak se vodní hladina pohybuje a jak reaguje na dynamické prostředí.

V současnosti nejrealističtější výsledků je dosaženo simulací Eulerovy vody (nahlíží na vodu Eulerovým popisem), jejíž prostor je rozdělen do alespoň 512^3 buněk. Takto řídké rozdělení obsahuje přes 100 milion neznámých pro vyřešení a s užitím globálních zobrazovacích metod jako ray-tracing pro realistickou vizualci odrazů, refrakcí a kaustik je výpočetně nemožné simulaci provést v reálném čase [MuellerGDC08].

Proto real-time simulace vody vhodná pro aplikace jako hry musí nutně splňovat tyto podmínky [MuellerGDC08]:

- být výpočetně rychlá – zlomek 15 ms, který je třeba pro vykreslení jednoho snímku,
- být paměťově nenáročná,
- být stabilní – korektně reagovat i na nefyzikálně pohybující se objekty.

3. VLASTNOSTI VODNÍHO POVRCHU



Obrázek 3.1: Ukázka off-line simulace Eulerovy tekutiny [Guendelman05]

Jeden přístup, jak se co nejvíce přiblížit off-line simulaci a stále dodržet podmínky pro rea-time simulaci ve hrách, je zachovat stejný algoritmus jako při off-line simulaci, ale zmenšit rozlišení prostoru simulace. Tento postup ale spíše ubírá na realitě vodního povrchu, neboť se voda nefyzikálně shlukuje a detaily z obrazu jsou vynechány.

Další z možností, jak splnit výše zmíněné podmínky, je omezit míru interakce s vnějším prostředím, která tvoří největší výpočetní překážku. Na základě významnosti vodních útvarů ve scéně může simulace reagovat na všechny rigidní tělesa nebo u případů, ve kterých voda slouží jako pozadí, opominout jakoukoliv interakci.

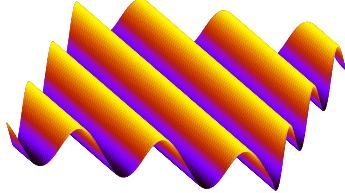
Podle tohodle principu můžeme dělit metody simulace vodní plochy na [MuellerGDC08]:

- procedulární
- částicové
- hybridní

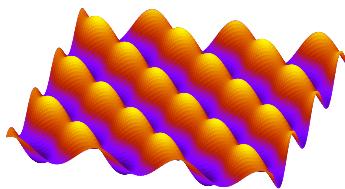
3.1.1 Procedulární metody

Procedulární metody simulují konečné efekty jako vlnění vodního povrchu, které nejsou vyvolány fyzikální činitily. Největší výhodou této metody je výpočetní rychlosť a versatilita, na druhou stranu ale vodní útvary nereagují na dynamické prostředí.

Na základě ticheto vlastností se procedulární metody používají pro vizualici rozsáhlé vodní plochy, které ve scéně hraje malou roli, např. jako oceán v pozadí scény.



Obrázek 3.2: Simulace vlnění pomocí jedné sinusoidy



Obrázek 3.3: Simulace vlnění pomocí sčítání sinusoid

3.1.1.1 Vlnění za pomocí sinusoid

Mezi prvními, kdo zkoumal procedulární metody pro zobrazení vodního povrchu byl Nelson L Max ve své práci „Vectorized Procedural Models for Natural Terrain: Wave and Islands in the Sunset“, ve které modeluje vlnění povrchu pomocí sinusoid. Na základě horizontální pozici a času Max manipuloval výšku vrcholů roviny [Max81]. Výšku jednotlivých vrcholů roviny vyjádřil jako funkci

$$h(x, z, t) = -y_0 + A \sin(k_x x + k_z z - \omega t + \varphi), \quad (3.1)$$

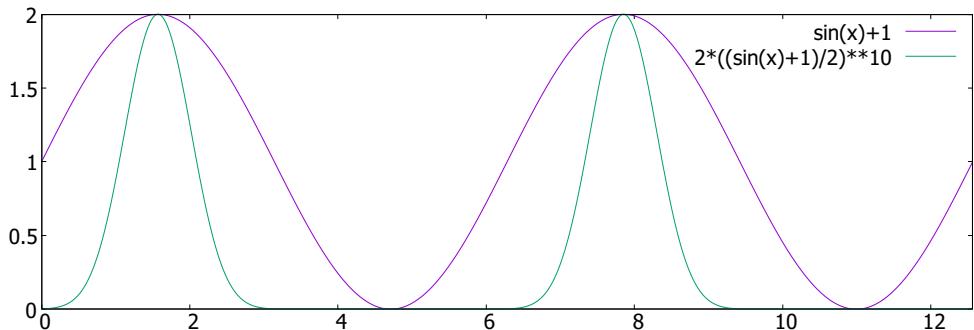
kde (x, z) je horizontální pozice vrcholu roviny (v celé práci se bude považovat, že kladná osa y směřuje nahoru), t je čas, y_0 je výška hladiny vody v klidovém stavu (při nulovém výskytu vln), A reprezentuje amplitudu roviny, $\vec{k} = (k_x, k_z)$ je vlnový vektor reprezentující směr a rychlosť propagace vln, ω je úhlová frekvence a φ je fáze vlny.

Tento model se ale vlní jen v jednom směru a výsledné vlny vypadají nerealisticky hladce. K dosažení větších detailů lze k funkci přičíst další funkce sinus s odlišnými parametry amplitudy, vlnového vektoru nebo úhlové frekvence:

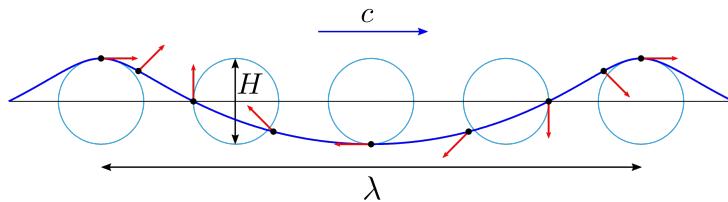
$$h(x, z, t) = -y_0 + \sum_{i=1}^{N_w} A_i \sin(k_{i_x} x + k_{i_z} z - \omega_i t + \varphi_i), \quad (3.2)$$

kde N_w je celkový počet vln.

3. VLASTNOSTI VODNÍHO POVRCHU



Obrázek 3.4: Porovnání mezi vlnami funkcí 3.1 a 3.3



Obrázek 3.5: Gerstnerova vlna s fázovou rychlosí c , vlnovou délkou λ a rozdílem hřebenu a údolí H

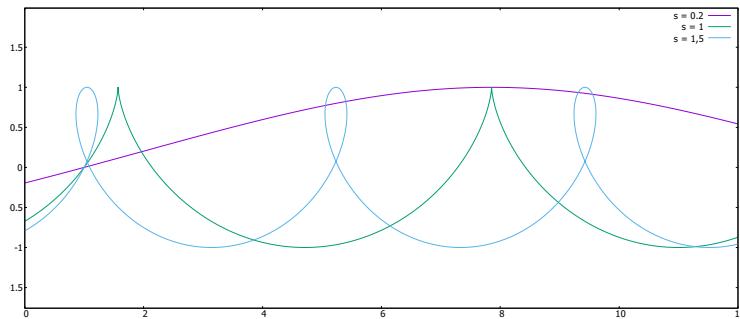
Realistického řešení však za pomocí jen obyčejných sinusoid nelze dosáhnout. Max si všiml, že vlnění oceánu s vyššími amplitudami mají užší hřeben a mělké údolí, zatímco vrchol a údolí sinusoidy je oblý. Mark Finch a Cyan Worlds přišly s řešením toho problém ve svém článku „,“ které stále využívá jednoduché funkce sinus. Kromě obyčejných funkcí sinus přiřídil navíc funkci

$$f_i(x, z, t) = -y_0 + 2 \left(\frac{\sin(k_{i_x}x + k_{i_z}z - \omega_i t + \varphi_i) + 1}{2} \right)^k, \quad (3.3)$$

kde $k \in \mathbb{R}^+$ určuje míru, jak má být hřeben [GPU Gems 1].

3.1.1.2 Vlnění za pomocí Gerstnerovy vlny

Limitující faktor metody založené na transformaci vrcholů pomocí sinusoid je, že manipuluje s jediným parameterem vrcholu, tj. výškou, a pro realističtější výsledky bylo třeba manipulovat vrcholy i v horizontální rovině. Tento problém řeší cyklické křivky, tzv. trochoidy, podle kterých Franz Josef Gerstner, německý fyzik, modeloval vlnění hladiny v hlubokých [Gerstner 1802]. Trochoidou nazýváme trajektorii bodu pevně spojeného s „kotálející se“ kružnicí po nehybné přímce https://www.fa.cvut.cz/studium/predmety/deskriptivni-geometrie-i-ii/dg_eleskripta/kriky/cyklick_kriky_1.pdf.


 Obrázek 3.6: Porovnání hodnot s ve dvourozměrném prostoru

Dnes v teorii dynamiky tekutin vlnění založené na trochoidních křivkách nazýváme Gerstnerovy vlny. Mezi prvními, kdo se Gerstnerovými vlnami zabýval byli Alain Fournier a William T. Reeves, kteří transformovali vrcholy roviny podle tichoto parametrických rovnic [Fournier86]:

$$x = x_0 + r \cos(k_x x + k_z z - \omega t) \quad (3.4)$$

$$y = r \sin(k_x x + k_z z - \omega t) \quad (3.5)$$

$$z = z_0 + r \cos(k_x x + k_z z - \omega t), \quad (3.6)$$

kde vektor (x_0, z_0) reprezentuje klidovou pozici vrcholu roviny, r je délka opisujícího bodu od středu kružnice trochoidní křivky, vektor $\vec{k} = (k_x, k_y)$ určuje rychlosť a směr propagace vlnění, ω označuje úhlovou frekvenci a t je čas.

Hodnota $s = r|\vec{k}_x|$ určuje, jak strmá bude vlna. Pro hodnotu $s = 0.2$ má vlna tvar jako sinusoida, pro $s = 1$ má tvar cykloidy a pro $s > 1$ dochází samoprotínání trochoidy, a proto by se hodnotám vyšší než jedna mělo vyhýbat pro vizualizaci vodního povrchu. V obrázku 3.6 je porovnání hodnot s pro vlnění ve dvourozměrném prostoru.

3.2 Světelné vlastnosti

KAPITOLA **4**

Realizace

Závěr

Jedním z cílů práce bylo provést analýzu současných možností pro simulaci vodního povrchu. Rozbor obsahuje několik metod založených na různých přístupů k simulaci kapalin. Na základě typu scén her a míry interakce vodní plochy s prostředím jsou jednotlivé metody různě vhodné.

Dalším cílem bylo vytvořit testovací scénu s vybraným algoritmem pro simulace vodní plochy z analýzy. Testovací scéna je naimplementována zapomocí frameworku OpenGL, ale principy simulace jsou lehce přenositelné na různé nástroje. Vodní plocha reaguje jak na prostředí testovací scény, tak i na manipulace hladiny uživatelem.

Seznam použitých zkrátek

GUI Graphical user interface

XML Extensible markup language

Obsah přiloženého CD

```
readme.txt ..... stručný popis obsahu CD
├── exe ..... adresář se spustitelnou formou implementace
├── src
│   ├── impl ..... zdrojové kódy implementace
│   └── thesis ..... zdrojová forma práce ve formátu LATEX
└── text
    ├── thesis.pdf ..... text práce ve formátu PDF
    └── thesis.ps ..... text práce ve formátu PS
```