



## 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 tělesa 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 navrhnete prototyp simulace.
4. Ve zvoleném nástroji implementujte.
5. Vytvořte testovací scénu, která simulaci demonstruje.





**FAKULTA  
INFORMAČNÍCH  
TECHNologiÍ  
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

## **Simulování vodního povrchu**

*Hong Son Ngo*

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

9. 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 principu při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 9. 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** Nahradte seznamem klíčových slov v češtině oddělených čárkou.

---

## Abstract

Sem doplňte ekvivalent abstraktu Vaší práce v angličtině.

**Keywords** Nahradte seznamem klíčových slov v angličtině oddělených čárkou.



---

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Cíl práce</b>	<b>3</b>
<b>2 Základ teorie mechaniky tekutin</b>	<b>5</b>
2.1 Navierovy–Stokesovy rovnice . . . . .	5
<b>3 Vlastnosti vodního povrchu</b>	<b>7</b>
3.1 Dynamické vlastnosti . . . . .	7
3.1.1 Pohyb vodního povrchu . . . . .	7
3.2 Světelné vlastnosti . . . . .	7
<b>4 Realizace</b>	<b>9</b>
<b>Závěr</b>	<b>11</b>
<b>A Seznam použitých zkratek</b>	<b>13</b>
<b>B Obsah přiloženého CD</b>	<b>15</b>



---

## Seznam obrázků



---

# Úvod

Kvalita herních titulů za poslední let ohromně vzrostla. Jejich úspěch lze připisat 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 jevy pohybu plamene, vlnění hladiny vody, proudění větru...

Fyzikálně korektní chování přírodních jevů však zůstává do dnešního dne mezi komplexnějšími problémy. Mezi těmi výpočetně nejobtížnějšími je považováno proudění tekutin, do kterých patří jak plynné, tak i kapalná 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 věrohodně chování kapalin, resp. plynů, nejsou nijak zastoupeny v hrách, neboť interakce s uživatelem a dynamické prostředí scén je nedovolí využít.

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

## Úvod

---

scén v hrách.



---

## Cíl práce

Cílem teoretické části této bakalářské práce je prozkoumat možnosti real-time simulace vodního povrchu a případných vlastností, které interagují se světelnými paprskami osvětelující 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 metody pro real-time grafické aplikace, navrhnout prototyp simulátoru a ve zvoleném nástroji ho implementovat a nakonec vytvořit testovací scénu, která simulaci demonstruje.



# 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 seznámem 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 (NSE), soustavou nelineárních diferenciálních rovnic. [fluid sim lecturer notes]

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

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

Kde vektor  $\vec{u} = (u, v, w)$  označuje rychlost tekutiny,  $\rho$  označuje hustotu tekutiny,  $p$  tlak, kterým působí tekutina na své okolí,  $\vec{g} = (x, y, z)$  je gravitační zrychlení,  $\nu$  je značení kynematické viskozity tekutiny. Symboly  $\nabla$ ,  $\nabla \cdot$ ,  $\nabla \cdot \nabla$  označují diferenciální operátory nabra, divergence a Laplaceův 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 rychlost proudu tekutiny, resp. hodnotu tlaku, v daném místě.

Na první pohled vypadají rovnice těžce uchopitelné, ale myšlenka za nimi je velmi jednoduchá. První rovnice ?? popisuje zákon o zachování hmotnosti,

## 2. ZÁKLAD TEORIE MECHANIKY TEKUTIN

---

tím je myšleno, že není možné, aby hmota tekutiny na některém místě vznikla nebo zanikla.

Druhá rovnice ?? 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  $-V\nabla p$ <sup>1</sup>.

Další síla působící na tekutinu je ovlivněna její viskozitou. Viskozita působí při každém pohybu částic tekutiny [lecture notes] a snaží se vyrovnat rychlost částic rychlostí svých sousedních částic. Její hodnotu můžeme vyjádřit jako  $V\mu\nabla \cdot \nabla\vec{u}$ <sup>2</sup>, kde  $\mu$  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 ??, ?? a ?? předpokládají, že tekutinu lze rozložit na konečně mnoho malých částí, tímto způsobem je do výpočtu představena výpočetní chyba. Řešením toho problému je celou rovnici ?? je vydělit  $V$ , aby zachytila pohyb nekonečně mnoho malých částic tekutin.

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

Následně po vydělení hustoty  $\rho$  a prohození sčítanců získáme druhou Navierovu–Stokesovu rovnici.

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} + \frac{1}{\rho}\nabla p = \vec{g} + \nu\nabla \cdot \nabla\vec{u}^3 \quad (2.7)$$

---

<sup>1</sup>Operace  $\nabla p$  vyjadřuje vektorové pole, ve kterém vektory směřují, z jednotlivých bodů na své blízké okolí, aby jeho hodnota ve skalárním poli nejrychleji vzrostla.

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

<sup>3</sup>kinematická viskozita lze vyjádřit jako  $\mu\rho$

## **Vlastnosti vodního povrchu**

### **3.1 Dynamické vlastnosti**

#### **3.1.1 Pohyb vodního povrchu**

### **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 přístupech 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 pomocí 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 zkratek

**GUI** Graphical user interface

**XML** Extensible markup language



## Obsah přiloženého CD

	readme.txt .....	stručný popis obsahu CD
	exe.....	adresář se spustitelnou formou implementace
	src	
	impl.....	zdrojové kódy implementace
	thesis.....	zdrojová forma práce ve formátu $\text{\LaTeX}$
	text .....	text práce
	thesis.pdf.....	text práce ve formátu PDF
	thesis.ps.....	text práce ve formátu PS