

Částicový systém pro simulaci kapalin ve 3D

řešitelé: **PavelDvořák**, xdvora0e
MatúšFedorko, xferor01
PetrBlatný, xblatn03

Zadání

Výsledkem projektu je simulátor kapaliny. Tato simulace probíhá pomocí simulování chování jednotlivých částic tvořící kapalinu.

Program umožňuje simulovat několik případů proudění kapaliny.

Použití technologie

C/C++Projekt je řešen v programovacím jazyku C++

OpenCL Pro výpočet na grafické kartě bylo zvoleno OpenCL.

OpenGL Na zobrazení 3D obsahu je použita knihovna OpenGL.

Projekt dále využívá knihovny SDL, Glew, Glm, SDL Image a SDL TTF.

Projekt byl řešen v prostředí MS Visual Studio

Použití zdroje

Model systému vychází z open source simulátoru kapalin dle Hoetzlein R. C.: *Fluids v. 2*, dostupné z

<http://www.rchoetzlein.com/eng/graphics/fluids.htm>

Částicový systém pro simulaci kapalin využívá rovnice a metodu SmoothedParticleHydrodynamics.

Popsanou v diplomové práci Zsolt Horváth: *Částicové simulace v reálném čase, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2012*

Kernel pro výpočet dynamiky částic kapaliny vychází z JoeyFladderak: *SPH Fluid Simulation*, dostupné z

<http://joeyfladderak.com/portfolio-items/sph-fluid-simulation/#prettyPhoto>

Simulace kapalin využívají k popisu rovnice Navier-Stokes. Rovnice popisují nestlačitelné newtonovské kapaliny.

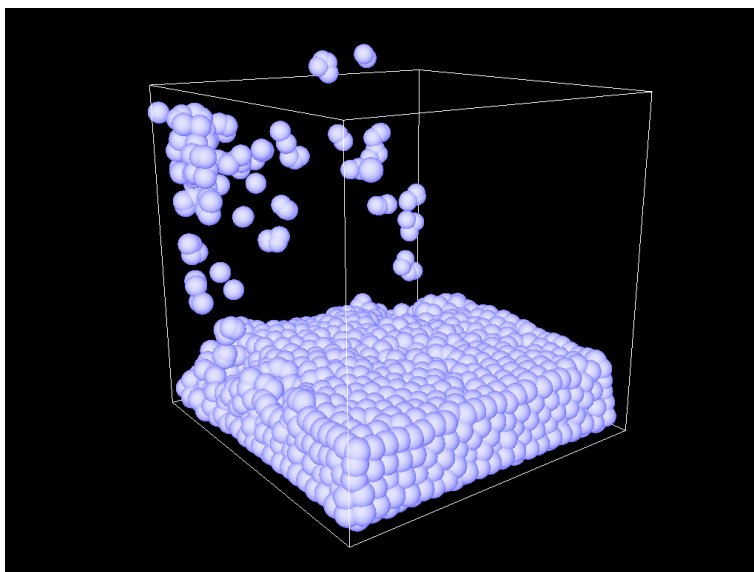
Jejich řešení poskytujeLangrangeova metoda. Ta dělí kapalinu na částice a počítá s rovnicemi kapalin z částicové fyziky. Zjednodušeně sleduje individuální částice pohybující se v prostoru a čase. Tyto částice je možné definovat pomocí několika parametrů.

Dynamiku částic je možné simulovat postupným výpočtem hustoty částice, tlaku působící na částici. Dále jsou počítány síly, které na částici působí (gravitace, síly odrazu od stěn nádoby) a viskozita. Z těchto parametrů je možné určit vektor pohybu částice a tím i pozici částice v dalším časovém okamžiku.

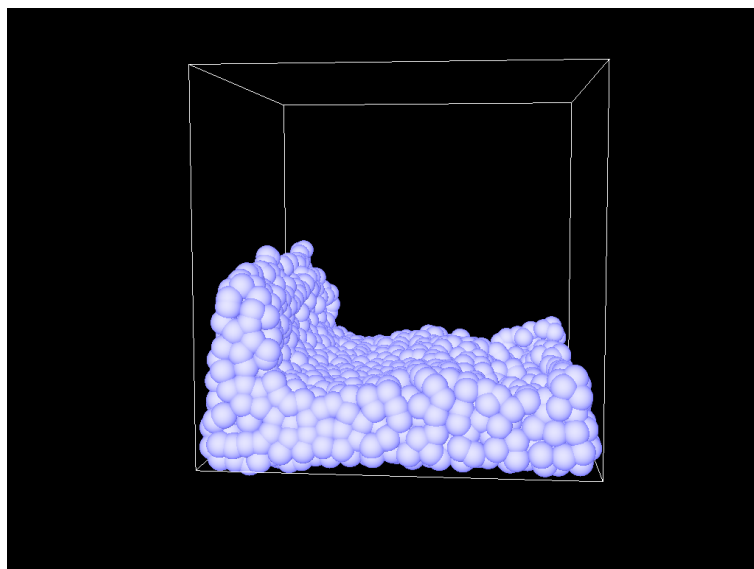
Nejdůležitější dosažené výsledky

Výsledný program umožňuje efektivně simulovat chování kapaliny. Implementovány byly efekty proudění kapaliny do nádoby, vlna přelévající kapalinu ze strany na stranu a fontánka. Proudění kapaliny pracuje na principu odebírání částic ze dna nádoby a jejich plynutí z horního rohu.

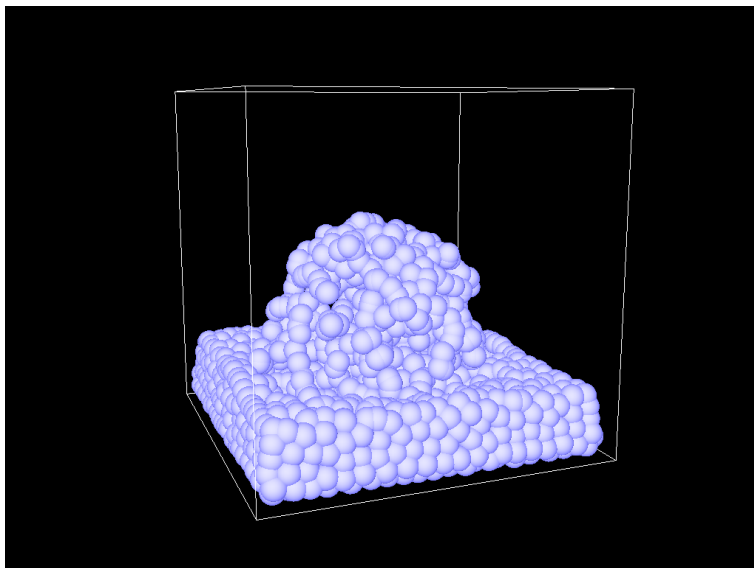
Vlna v kapalině je vytvořena přidáním síly působící na částice v určitém směru. Po ukončení působící síly



dochází postupnému zmenšování vlnícího efektu až do rovnovážného stavu.



Na podobném principu funguje i efekt fontánky. Zde je směr vektoru působící síly směřován ze dna nádoby směrem nahoru. Tato síla způsobí vynesení částic do prostoru.



Ovládání vytvořeného programu

Program zobrazí okno, ve kterém probíhá simulace kapaliny. Při držení levého tlačítka myši a jejím pohybováním je možné měnit pohled na scénu.

Pravým tlačítkem a pohybem myši je možné scénu přiblížit nebo oddálit.

Tlačítkem D je možné zapnout proudění částic.

Tlačítkem W je vyvolán horizontální pohyb částic.

Tlačítkem F je spouštěn efekt fontány.

Tlačítko R restartuje simulaci.

Tlačítko B zobrazí nebo skryje ohraničení nádoby.

Tlačítko H zobrazí nebo skryje nápovědu k ovládání programu.

Mezerník pozastaví nebo restartuje vykreslování scény.

Zvláštní použité znalosti

Pro simulace kapalin není možné použití popisu povrchu pomocí polygonální sítě, která se používá pro popis objektů v počítačové grafice. Namísto toho se používají objemové modely. Ty je možné řešit Langrangeovou metodou, která určuje vlastnosti jednotlivých částic. Parametry částic, popisující jejich aktuální stav, jsou: pozice p , hmotnost m , objem V , hustota ρ , rychlost v a zrychlení a .

Rovnice Navier-Stokes jsou diferenciální rovnice, řešené nejčastěji numerickými metodami. Rovnice popisují chování newtonovské kapaliny, jejich důležitou vlastností je, že dynamická viskozita je konstanta úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace.

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dt}$$

Kde τ je dotykové napětí v tekutině, v je rychlost toku, η je dynamická viskozita. Pro tyto kapaliny dostaneme Navier-Stokes rovnice:

$$\rho \left(\frac{\delta v}{\delta t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f$$
$$v \cdot \nabla = 0$$

Kde ρ je hustota kapaliny, v je vektor rychlosti, \cdot je operace skalárního součinu, ∇ označuje gradient, p je tlak, μ je viskozita, f je vektor externích sil. Rovnice vycházejí ze zákona zachování energie pro kapalinu.

Rovnice popisující zachování hmoty je dána vztahem:

$$\frac{dp}{dt} = -\rho \nabla \cdot v$$

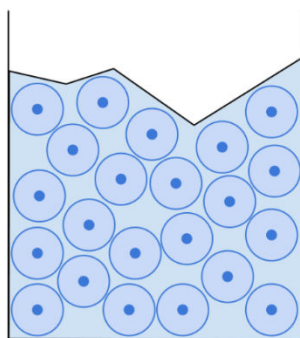
Langrangeova formulace zachování momentu:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau + f$$

Částice mají stejnou hmotnost a je jich stále stejný počet, můžeme tedy ignorovat zákon zachování hmoty. Tím dostaneme výraz:

$$a_i = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau + f = f_i^{pressure} + f_i^{stress} + f_i^{external}$$

Kde a_i je zrychlení částice, $f_i^{pressure}$ je tlaková síla, f_i^{stress} je napětí způsobené viskozitou a $f_i^{external}$ je suma externích sil (gravitace, odraz od stěn nádoby, ...)



Struktura částicové kapaliny dle Langrangeovy formulace

Smoothed particle hydrodynamics je metoda aproximace numerického řešení rovnic dynamiky kapalin.

Objem kapaliny reprezentujeme pomocí částic, pro které je možné vypočítat vlastnosti kapaliny. Výhodou metody je možnost její paralelizace a tím urychlení výpočtu. Síly působící na každou částici jsou dané skalárními hodnotami. Veličiny interpolujeme v místě r na základě váženého součtu příspěvků od všech částic do vzdálenosti h . Aproximací lze získat:

$$A_i = \sum_j A_j V_j W(r_{ij}, h)$$

Kde j je index částice, V_j je objem částice j , $r_{ij} = r_i - r_j$, kde r je pozice částice a A je skalární interpolovaná veličina. Mezi objemem V , hmotností m a hustotou ρ platí vztah:

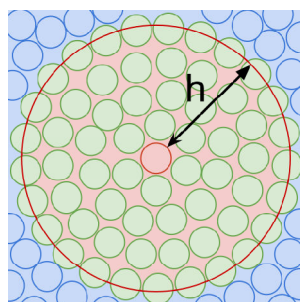
$$V = \frac{m}{\rho}$$

Kombinací rovnic získáme vztah interpolační funkce SPH:

$$A_i = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W(r_{ij}, h)$$

Kde j je index sousední částice, m_j je hmotnost j -té částice, r_j je její pozice, ρ je hustota, A_j je skalární veličina v pozici r_j .

Vykreslovací jádro W , je funkce, která udává pozici r a vyhlazovací vzdálenost h . Tato vzdálenost je potom prahem, který rozhoduje o tom, kolik částic se započítává do interpolace. Tato funkce může být obecně různá a tím ovlivní výpočet kapaliny.



Grafické znázornění jádra W

Základní Langrangeova formulace rovnice Navier-Stokes pro nestlačitelné kapaliny je dána vztahem:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f$$

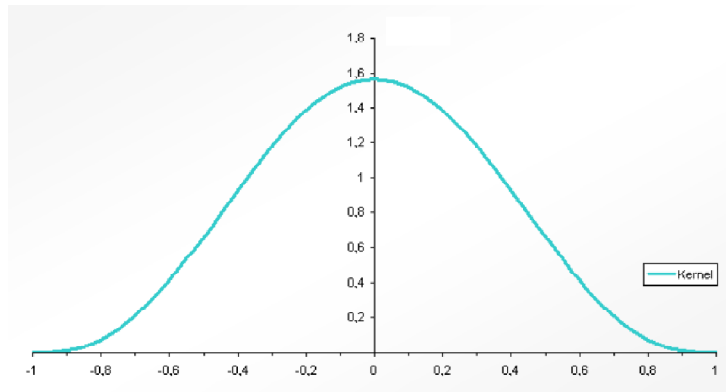
kde pravá strana obsahuje interní a externí síly.

Výpočet hustoty ρ závisí pouze na hmotnosti částice m :

$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_i - r_j, h)$$

K výpočtu používá jádro polynomu 6. stupně:

$$W_{poly6}(r, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - |r|^2)^3 & 0 \leq |r| \leq h \\ 0 & |r| > h \end{cases}$$



Grafické znázornění jádra W_{poly6}

Tlak, určuje sílu, kterou jsou odpuzovány částice jedna od druhé:

$$p = k(\rho - \rho_0)$$

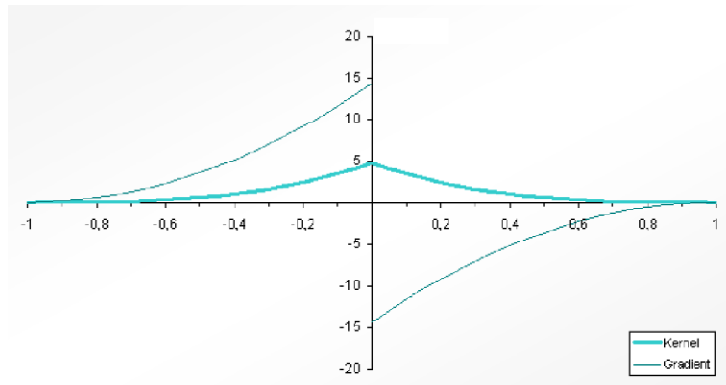
kde ρ je v předchozím kru vypočítaná hustota částice, ρ_0 je klidová hustota kapaliny.

Tlaková síla $f_i^{pressure}$ je potom dána vztahem:

$$f_i^{pressure} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_{j \neq i} \frac{p_i + p_j}{2} \frac{m_j}{p_j} \nabla W(r_i - r_j, h)$$

Využívá gradient jádraspiky (špičatý):

$$\nabla W_{spiky}(r, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h - |r|)^3 & 0 \leq |r| \leq h \\ 0 & |r| > h \end{cases}$$



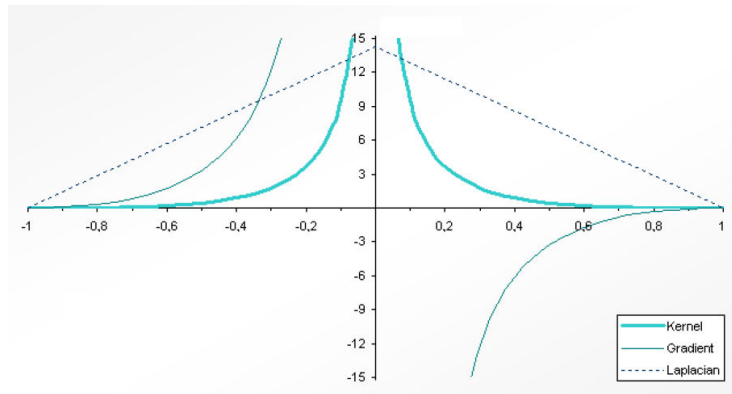
Grafické znázornění spiky jádra W_{spiky}

Viskozita, neboli odolnost proti toku, je v SPH definována vztahem:

$$f_i^{viscosity} = \frac{\mu}{\rho_i} \sum_j (v_j - v_i) m_j \nabla^2 W(r_i - r_j, h)$$

kde μ je koeficient viskozity kapaliny, tento vztah platí, pokud je hustota konstantní a stejná u všech částic. K výpočtu je používán laplacián (∇^2) jádra viskozity, nebo též vyhlazovacího jádra:

$$\nabla^2 W_{viscosity}(r, h) = \frac{45}{\pi h^6} (h - |r|)$$



Grafické znázornění vyhlazovacího jádra $W_{viscosity}$

Rozdělení práce v týmu

Pavel Dvořák – příprava modelu, převod vzorců do kódu pro výpočet na CPU

MatůšFedorko – převod na výpočet pomocí OpenCL

Petr Blatný - dokumentace

Co bylo nejpracnější

Částicový systém vychází z velkého množství fyzikálních výpočtů zmíněných v předchozí kapitole. Jejich pochopení a následná implementace byli na projektu asi nejsložitější. Problémem bylo i zprovoznění knihovny OpenCL a ostatních knihoven na různých strojích.

Zkušenosti získané řešením projektu

Naučili jsme se práci s knihovnou OpenCL na složitějším problému. Dále jsme se naučili další pokročilé techniky OpenGL. Obohacením pro nás bylo i nastudování funkce částicového systému.

Autoevaluace

Technický návrh: 70% (analýza, dekompozice problému, volba vhodných prostředků, ...)

Rychle jsme si ujasnili, jaké prostředky budeme používat a jakým způsobem budeme spolupracovat v týmu. Například knihovnu OpenCL jsme vybrali z důvodu použití na grafické kartě AMD.

Programování: 90% (kvalita a čitelnost kódu, spolehlivost běhu, obecnost řešení, znovupoužitelnost, ...)

Programy využívá moderní vlastnosti jazyka C++.

Vzhled vytvořeného řešení: 80% (uvěřitelnost zobrazení, estetická kvalita, vzhled GUI, ...)

Vzhled výsledného řešení je na poměrně vysoké úrovni.

Využití zdrojů: 50% (využití existujícího kódu a dat, využití literatury, ...)

Čerpali jsme z diplomových prací a technických zpráv a existujících implementací.

Hospodaření s časem: 90% (rovnoměrné dotažení částí projektu, míra spěchu, chybějící části řešení, ...)

Projekt jsme začali řešit zavčas a pravidelně jsme jej konzultovali.

Spolupráce v týmu: 90% (komunikace, dodržování dohod, vzájemné spolehnutí, rovnoměrnost, ...)

Komunikace v týmu probíhala převážně přes program Skype a proběhlo i několik osobních setkání.

Celkový dojem: 80% (pracnost, získané dovednosti, užitečnost, volba zadání, cokoliv, ...)

Práce na projektu nás bavila a máme množství nápadů na další dodatečná rozšíření.

Doporučení pro budoucí zadávání projektů

Zadání a forma projektu nám vyhovovalo.