

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Semestrální práce z předmětu KMA/MM

Částicové systémy (particle systems)

Obsah

Obsah	1
Předmluva	2
Úvod	2
Trocha historie	2
Základní popis	3
Využití	3
Částice	5
Vlastnosti (atributy)	5
Generování	6
Síly působící na částici	6
Interakce s jiným objektem	8
Pohyb	10
Částicový systém	10
Základní cyklus	10
Ekosystém	11
Děšť (sněžení)	11
Systém vázaných částic	12
Modelování povrchů pomocí orientovaných částicových systémů	12
Exploze	13
Problémy realizace	14
Rychlost	14
Stabilita	15
Komerční program – 3DS Max	15
Závěr	16
Literatura a zdroje	17

Předmluva

Tento text byl vytvořen jako semestrální práce z předmětu KMA/MM. Zabývá se problematikou částicových systémů (particle systems) – popisem, využitím a metodami používanými k jejich vytvoření. Svým obsahem nezapadá zcela do problematiky předmětu, tedy vytváření matematických modelů různých situací. Ukazuje spíše, kde a jak se v počítačové grafice využívají již hotové matematické modely.

Je třeba si uvědomit, že jednou z metod jak kontrolovat vypočítané matematické modely, je jejich vizualizace a právě k tomu lze použít částicové systémy. V praxi také vysoký management firmy jistě více ocení vizuální ukázkou modelu, nežli sáhodlouhé tabulky čísel.

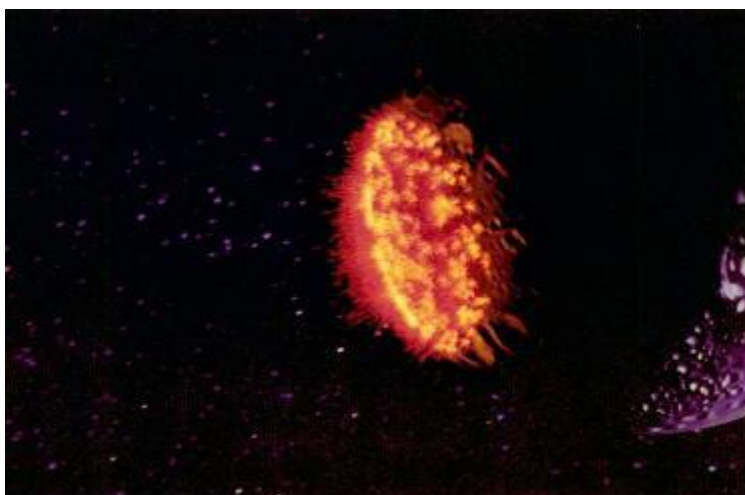
Veškeré zdroje (literatur, články a internetové stránky), které jsem použil ke studiu problematiky a vytvoření tohoto textu, jsou uvedeny na konci. Obrázky jsou převzaty z uvedených zdrojů, komerčních programů (jméno je vždy uvedeno u obrázku) nebo z vlastního programu.

Úvod

Úvod obsahuje částečně seznámení s problematikou částicových systémů, základní charakteristiku a oblasti využití a ukázky z každé oblasti.

Trocha historie

Problematiku a pojem částicových systémů (dále jen ČS) definoval William T. Reeves v článku [1] „Particle Systems – Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects“ v roce 1983. Reeves v té době pracoval u Lucasfilm Ltd a pracoval na filmu Star Trek II: The Wrath of Khan. Zde použil ČS v demo sekvenci, kdy bomba Genesis zasáhne planetu a oheň se z místa střetu rozšíří po celé planetě.



obr. 1 – šíření ohňové stěny po povrchu planety (převzato z [2])

Podobné modelovací techniky se objevily již na konci 60 let a byly použity v prvních videohrách, kdy se malá raketka po zásahu rozpadla na několik bodů. Později se s jejich pomocí modeloval kouř nebo vesmírné galaxie.

Základní popis

ČS slouží k popisu objektů, jejichž tvar je příliš členitý nebo se mění takovým způsobem, že jej není možné definovat jako povrch. Mezi takové objekty patří např. oheň, dým, tráva, déšť, padající sníh, hejna ptáků a další.

Mezi ČS a modelováním povrchů jsou tyto tři základní rozdíly:

- objekt není reprezentován množinou primitiv, které definují jeho hranice, ale shluky jednoduchých částic, které definují jeho objem,
- ČS není definován jako statický objekt, ale v čase mění svou formu – nové částice se „rodí“ a staré „umírají“,
- objekt určený ČS není deterministický, protože jeho vlastnosti nejsou nebo nemusí být díky často používané náhodnosti určeny přesně.

Zatím uvažujme částici jako bod v trojrozměrném prostoru. Z výše uvedených vlastností a uvažované reprezentaci plynou následující výhody:

- díky jednoduchosti můžeme zpracovat za stejný výpočetní čas mnohem více objektů než při standardních postupech (modelování založené na površích), tím můžeme získat komplexnější obraz, neznamena to však, že by výpočet takové scény nebyl hardwareově náročný,
- tvorba scény je procedurální a je ovlivněna náhodnými čísly, to znamená, že i složitou scénu lze vytvořit v relativně krátkém čase a velikost detailu lze měnit v závislosti na požadovaných podmínkách zobrazení.,
- model se může měnit v čase (a to dosti razantně), což by s použitím klasických modelovacích technik bylo velmi náročné nebo nemožné,
- ČS jsou založené na fyzikálních modelech (viz dále), a proto vypadají velmi realisticky.

Využití

ČS začínají být populární a jejich využití zasahuje do stále více kategorií. Od modelování fotorealistických statických scén, přes filmové efekty a efekty v počítačových hrách, až po simulace fyzikálních jevů. Oblasti jejich využití popisuje následující přehled. Konkrétní postupy budou uvedeny dále.

Ekosystémy a rostliny

Jednoduchou cestou lze získat velice realistický (uvažujme statický) obraz např. lesa či louky.

Dynamické simulace

Slouží k vytvoření scén, v nichž se pohybuje velké množství objektů, jejichž pohyb se řídí jasně stanovenými pravidly. Taková scéna může být tvořena např. rozsypanými míčky v místnosti. Mezi dynamické simulace lze také zařadit dopravní simulace (např. průjezdnost městem nebo složitou křižovatkou) a tomu podobné problémy.

Vizuální efekty

Využívají se ve filmech a počítačových hrách. Jedná se o různé výbuchy, elektrické výboje, ohňostroje apod.

Fyzikální simulace

Jedná se o metodu tzv. trasování částí (particle tracing). Používá se v případech, kdy je třeba zobrazit složité vektorové pole, výpočet není třeba provádět zcela přesně a je třeba, aby byl proveden rychle. Příkladem využití může být např. zobrazení průběhu cyklu ve válci spalovacího motoru.

Přírodní děje

Do této kategorie spadají již dříve zmiňované systémy: padání sněhu, déšť, hejna různých zvířat (ptáci, ryby, ...) apod.

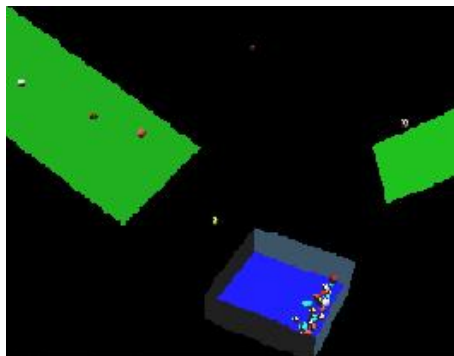
Systémy vázaných částic

Používají se pro simulace tkanin nebo papíru. Např. studio Pixar je používá k modelování oblečení animovaných postavíček.

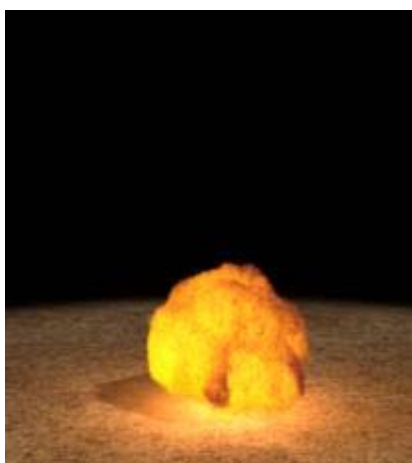
Ukázky systémů



obr. 2 – ekosystém louky (převzato z [3])



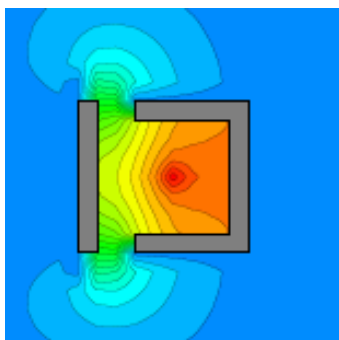
obr. 3 – dynam. systém (vlastní program)



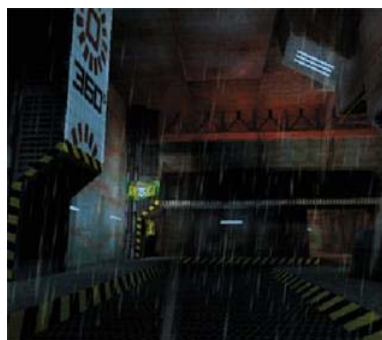
obr. 4 – vizuál. efekt výbuch (převzato z [4])



obr. 5 – elektrický výboj (převzato z [6])



obr. 6 – fyzikální simulace (převzato z [4])



obr. 7 – přírodní děje (převzato z [6])

Částice

Tato kapitola obsahuje soupis vlastností používaných v systémech částic a popis práce s částicí.

Vlastnosti (atributy)

Vlastnosti částice lze rozdělit na fyzikální, tedy ovlivňující pohyb, život a chování částice a na grafické ovlivňující její zobrazení.

Fyzikální

Možné fyzikální vlastnosti:

- **pozice** určuje pozici částice v prostoru (ploše),
- **rychlost** vektor vyjadřující směr a rychlost částice, popřípadě normalizovaný vektor a velikost rychlosti,
- **síla** výslednice sil působících na částici,
- **zrychlení** směr a velikost zrychlení,
- **stáří** číslo určující aktuální stáří, může ovlivňovat další vlastnosti nebo určovat okamžik zániku,
- **velikost** slouží např. pro výpočet kolizí apod.,
- **hmotnost** podobně jako velikost, využívá se hmotnost pro výpočet dalších veličin,
- **odrazivost** koeficient odrazivosti – určuje jak moc je materiál částice pružný,
- **odpor** koeficient odporu vůči prostředí – např. koef. aerodynamiky, ovlivňuje snižování rychlosti pohybu,
- **úmrtí** hodnota času, popř. jiné veličiny (velikost, hmotnost, pozice), která je prahovou hodnotou pro úmrtí částice,
- **vazby** seznam částic + síly působící mezi danou částicí a dalšími částicemi,
- **staré hodnoty** hodnoty veličin z předchozího kroku, obvykle se využívá předešlá pozice nebo rychlost.

Samozřejmě ne všechny uvedené vlastnosti musí částice v daném systému obsahovat. Záleží na tom, jaký systém chceme vytvořit a jaké vlastnosti k tomu budeme potřebovat.

Grafické

Výběr použitých vlastností záleží na způsobu implementace systému. K obvyklým patří:

- **barva** může být konstantní nebo závislá na libovolné veličině,
- **textura**
- **průhlednost** využívá se hlavně při reprezentaci částice spritem (viz dále),
- **natočení** směrový vektor nebo číslo určující úhel natočení částice ke směru pohybu, užitečné pokud tvar částice je např. kapka.

Generování

Generování částic může být prováděno po celou dobu simulace nebo může být na začátku vygenerována množina částic. Generátor vytváří objekty částic a nastavuje jejich vlastnosti na počáteční hodnoty. Může být statický nebo se může pohybovat. Nové částice mohou být generovány umírající částicí (např. ohňostroj) nebo po interakci částice s jiným objektem či částicí – částice se po nárazu rozpadne na větší počet menších (např. simulace štěpení atomů). Při vytvoření (narození) částice se většinou její měnící se hodnoty (rychlost, velikost, čas úmrtí apod.) naplní hodnotou vypočtenou podle vztahu:

$$\text{hodnota} = \text{základ} + \text{random}(-1, 1) \cdot \text{velikost_rozsahu}$$

kde *základ* vyjadřuje střední hodnotu veličiny, *random*(-1, 1) je funkce, která vrací náhodnou hodnotu z intervalu $\langle -1; 1 \rangle$ a *velikost_rozsahu* je polovina požadovaného rozptylu.

Právě zde použitou náhodností můžeme vytvořit realisticky vypadající systém, neboť i příroda se částečně chová náhodně. Ale „všeho moc škodí“.

Důležitým faktorem je také počet generovaných částic na 1 snímek vykreslení nebo požadovaný časový úsek. Podle [1] lze počet generovaných částic určit jedním ze dvou způsobů:

- 1) Řídí se podobným vztahem jako výpočet počáteční hodnoty vlastností:

$$\text{počet_částic} = \text{základ} + \text{random}(-1, 1) \cdot \text{velikost_rozsahu}$$

- 2) Závisí na rozměru plochy, pak se řídí následujícím vztahem:

$$\text{hodnota} = (\text{základ} + \text{random}(-1, 1) \cdot \text{velikost_rozsahu}) \cdot \text{plocha}$$

Závislost na rozměru plochy má svůj důvod. Je např. zbytečné generovat 1000 částic pro objekt, který ve scéně zabírá 10 obrazových bodů.

Je samozřejmě možné použít libovolnou modifikaci či kombinaci uvedených způsobů.

Síly působící na částici

Na silách působících na částici je závislé její chování a pohyb. Na částice působí různé síly, označme je f_i . Patří mezi ně např. gravitační síla, síly prostředí (vítr apod.) nebo síly interakce mezi částicemi. Ty se většinou vyjadřují jako síly vyvolané pružinou. Výslednou sílu F určíme známým vztahem:

$$F = \sum_{i=0}^n f_i,$$

kde n je počet sil.

Z této výslednice můžeme obecnými vztahy pro dynamiku hmotného bodu určit zrychlení v daném čase:

$$a(t) = \frac{F(t)}{m},$$

kde m (hmotnost) může být také proměnná závislá na čase.

Často používané síly

- **globální gravitační síla**

Působí na celý systém a není závislá na vzájemné poloze částic či na absolutní pozici částice. Vychází ze vztahu:

$$F = m \cdot g,$$

m je hmotnost a g je vektor směřující kolmo dolů. Jeho obvyklá hodnota je $[0; -9,8; 0]$.

- **síla odporu prostředí**

Pokud se jedná o homogenní prostředí není její velikost závislá na vzájemné poloze částic či absolutní pozici:

$$F = -k \cdot v,$$

k je koeficient odporu prostředí, v je rychlost částice. Pokud by prostředí nebylo homogenní, koeficient odporu by byl vyjádřen funkcí.

- **pružná síla**

Tato síla je lokální a působí mezi dvěma částicemi A a B , které jsou spojeny elastickou vazbou. Vlastnosti částic budou označeny indexy a a b . Vztah je dán Hookovým zákonem:

$$F_a = - \left[k_s \cdot (|\Delta x| - d) + k_d \cdot \frac{\Delta v \cdot \Delta x}{|\Delta x|} \right] \cdot \frac{\Delta x}{|\Delta x|},$$

$$F_b = -F_a,$$

$$\Delta x = x_a - x_b,$$

$$\Delta v = v_a - v_b,$$

k_s je koeficient pružnosti, k_d koeficient tlumení, d délka pružiny v klidovém stavu, Δx je vzdálenost částic a Δv je rozdíl jejich rychlostí.

- **vzájemná gravitace**

Jedná se opět o lokální, působí mezi dvěma částicemi a řídí se gravitačním zákonem:

$$F_{ab} = - \frac{G \cdot m_a \cdot m_b}{|\Delta x|^2} \cdot \frac{\Delta x}{|\Delta x|},$$

$$F_{ba} = -F_{ab},$$

$$\Delta x = x_a - x_b,$$

m_a a m_b jsou hmotnosti částic a G je gravitační konstanta, jejíž hodnota je $6,672 \cdot 10^{-11} [N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}]$.

- **Coulombova síla**

má obdobné vlastnosti a zápis jako vzájemná gravitace a je dána Coulombovým zákonem pro přitahování a odtahování elektricky nabitých částic:

$$F_{ab} = -\frac{k \cdot q_a \cdot q_b}{|\Delta x|^2} \cdot \frac{\Delta x}{|\Delta x|},$$

$$F_{ba} = -F_{ab},$$

$$\Delta x = x_a - x_b,$$

q_a a q_b jsou náboje částic a k je konstanta, jejíž hodnota je dána vztahem

$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon}$, kde ε je permitivita prostředí. Pro vakuum je hodnota k rovna $8,895 \cdot 10^9 [N \cdot m^2 \cdot C^{-2}]$.

Interakce s jiným objektem

Částice může při svém pohybu narazit na překážku nebo na jinou částici. Je tedy třeba zjistit zda k tomu došlo a případně přepočítat směr a velikost rychlosti (odražení) nebo provést jiné úkony. Částice může např. zaniknout nebo se rozpadnout na menší apod.

Detekce kolize

Za kolizi budeme považovat situaci, kdy se dva povrchy. Ve většině systémů si vystačíme s následujícími kolizemi (částici uvažujeme jako kouli):

Pozn.: v následujícím textu je použito toto značení pro operace s vektory:

- skalární součin (dot product),
- × vektorový součin (cross product),
- * násobení vektorů po složkách.

- **koule – koule**

Vzdálenost středů částic (koulí) musí být menší nebo roven součtu jejich poloměrů. Musí tedy platit:

$$r_a + r_b \geq |x_a - x_b|,$$

kde koule jsou definovány polohou x a poloměrem r .

Pozn.: při implementaci neodmocňujeme velikost, ale umocníme druhou stranu nerovnosti – mocnina je výpočetně rychlejší než odmocnina.

- **rovina – koule**

Využijeme znaménkového testu. Znaménko nám určí zda se střed koule nachází před nebo za rovinou. Velikost výsledku pak určuje vzdálenost středu koule od roviny. K testu použijeme následující výpočet:

$$d = (a - x) \cdot n,$$

kde a je bod, kterým rovina prochází, x je pozice středu koule, n je normála roviny. Pokud je $|d| \leq r$ nastala kolize a v případě že d je:

- < 0 střed se nachází před rovinou (ve směru normály),
- > 0 střed se nachází za rovinou,
- = 0 střed leží na rovině.

- **omezená rovinná plocha (polygon) – koule**

Provedeme test zda koule leží v rovině která je určena danou plochou (viz výše). Poté provedeme znaménkový test vůči každé hraně polygonu:

$$d = (v - x) \cdot (s \times n),$$

kde v je bod (vrchol), kterým testovaná hrana prochází, x je pozice středu koule, s je směrový vektor hrany a n je normála roviny, na které polygon leží. Pokud bude mít d stejné znaménko pro každou hranu polygonu nebo bude $|d| \leq r$ pro jednu jeho hranu a pro zbývající bude mít stejné znaménko, nastává kolize.

- **válec – koule**

Spočítáme vzdálenost koule od osy válce a ta musí být menší než součet poloměru válce a poloměru koule (částice). Tedy musí platit:

$$r_{koule} + r_{válec} \geq \frac{|(x - a) \times s|}{|s|},$$

kde x je poloha středu koule, a je střed podstavky válce a s je směrový vektor ke druhé podstavě. Pokud tato rovnost platí, nastala kolize s válcem „nekonečné“ výšky. Je třeba ještě otestovat, zda se střed koule nachází mezi podstavami válce. To se opět provede pomocí znaménkových testů.

- **ostatní tělesa**

Detekce kolizí s některými dalšími tělesy získáme kombinací předchozích. Např. kolizi s krychlí či kvádrem získáme otestování každé stěny pomocí testu rovina – koule.

Reakce na kolizi

Pokud detekujeme kolizi je vhodné na ni zareagovat:

- **koule a plochy**

Výpočet nové rychlosti (velikosti a směru) koule se řídí zákonem dopadu a odrazu:

$$v_n = (n \cdot v) * n,$$

$$v_{new} = (v - 2 \cdot v_n) \cdot k_k \cdot k_p,$$

kde v je rychlost při kolizi, n je normála plochy, v_n je normálová rychlost, k_k je odrazivost koule, k_p je odrazivost plochy a v_{new} je rychlost po odrazu.

- **dvě koule**

V tomto případě využijeme hybnosti, kterou vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$p_A = v_A \cdot m_A + 1,$$

kde p_A je hybnost koule A , v_A je rychlost částice a m_A je její hmotnost. Stejně získáme hybnost p_B pro kouli B .

Dále spočítáme koeficient hybnosti koulí:

$$k_{hA} = \frac{p_B}{p_A + p_B},$$

$$k_{hB} = \frac{p_A}{p_A + p_B}.$$

Po té se vytvoří imaginární rovina, která prochází místem kolize částic a jejíž normála je dána vektorem vzdálenosti středů částic. Pro každou částici se provede výpočet podle zákona dopadu a odrazu (viz výše). Výsledná rychlost je pak přenásobena koeficientem odrazivosti materiálů koulí a příslušným koeficientem hybnosti.

Tento postup má výhodu v tom, že pokud jedna částice stojí a druhá do ní narazí, předá ji svou energii a zůstane v limitním případě nehybně stát. Stejně jako je tomu v reálném světě.

Mezi další reakce patří např. rozpad částice, změna barvy, změna fyzikálních vlastností apod.

Pohyb

Pro pohyb bodu opět využijeme vztahů pro dynamiku hmotného bodu. Jelikož, ale při počítačovém modelování používáme diskrétní čas, je nutné diferenciální rovnice převést na diferenční. Pokud budeme uvažovat dostatečně malé Δt , můžeme použít následující vztahy:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t) \cdot \Delta t,$$

čímž vypočteme rychlost v čase $t + \Delta t$. Z ní pak lze určit polohu bodu v daném čase:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t) \cdot \Delta t.$$

Podmínka dostatečně malého Δt je pro obvyklé animace splněna, neboť pro plynulou animaci je třeba minimálně 25 snímků/s čemuž odpovídá $\Delta t = 0,04$ s a to lze obecně označit za dostatečně malé.

Výše zmíněná metoda je Eulerova integrační metoda. Je jednoduchá (rychlá), ale nestabilní právě pro nedostatečně malé Δt . V takovém případě je ji třeba nahradit nějakou přesnější metodou, např. metoda Runge-Kutta 2. nebo 4. řádu.

Částicový systém

Nyní je načase říci něco o tom jakým způsobem ČS pracuje. Pak bude následovat několik konkrétních případů.

Základní cyklus

Životní cyklus systému je složen z několika kroků:

- 1) generování systém vytvoří nové částice,

- | | |
|---------------|---|
| 2) zánik | částice, které jsou mrtvé – překročily délku svého života nebo jiné předem dané meze, jsou vyřazeny z systému, |
| 3) síly | přepočtou se všechny vztahy ovlivňující danou částici a vypočte se výsledná síla F , |
| 4) vlastnosti | zjistí se nová rychlost, poloha a další potřebné fyzikální vlastnosti, popř. se změní grafické vlastnosti (průhlednost, barva apod.), případně se provede detekce kolizí, výpočet odrazů apod., |
| 5) vykreslení | scéna se zobrazí. |

Ekosystém

Začneme ČS, který se trochu vymyká klasickým systémům. Jedná se o vytvoření rostlinného ekosystému.

Plocha na níž má být systém modelován se rozdělí např. na čtvercovou pravidelnou síť. Do náhodné pozice každého čtverce se umístí jedna částice. Ta představuje rostlinu. Může být reprezentována dalším ČS nebo již hotovým modelem vytvořeným v nějakém modelovacím programu. Jako vlastnosti částice použijeme sílu přežití, rychlost růstu, rychlost rozmnožování, seznam druhů rostli (modelů) se kterými může žít v symbióze atd.

Každá částice se rozrůstá až do doby kdy překročí hranice svého území. Pokud může žít se sousední rostlinou v symbióze nic a neděje a její život pokračuje dále. Jinak přežije rostlina s vyšší silou přežití. Takto simulace stále pokračuje. Je možné samozřejmě stanovit další pravidla – dostatek vláhy v daném čtverci pro růst určitých typů rostlin, maximální stáří rostlin, možný výskyt chorob,

Takovýto systém může být využit k vytvoření statické scény nebo k simulaci rozvoje rostlinstva na určitém místě. Nemusí se jednat jen o rostliny. Je možné takto simulovat život zvířat, bakterií nebo nemocí.

Více v [1] a [3].

Děšť (sněžení)

Jedná se o jednu z jednodušších variant ČS. Částice se pohybují svisle a jsou generovány po celé ploše scény.

Částice náhodně rozmístíme po ploše a přiřadíme jim výšku mimo zobrazovanou scénu. Hodnota výšky by měla být částečně náhodná, aby částice nepadaly v jedné rovině. Částicím také přiřadíme počáteční rychlost směřující svisle dolů. Velikost síly může být pro všechny částice stejná. Generování částic bude probíhat ve vlnách. Frekvence těchto vln a hustota částic v ploše bude určovat celkovou hustotu deště.

Síly, které budou ovlivňovat pohyb částice budou pouze dvě. Gravitační síla, tu je dobré použít standardní – svislý směr a velikost 9,8 a vítr. Vítr může mít libovolný směr a rychlost a může se měnit v čase.

Částice zaniká dopadem na plochu scény. Může jednoduše zmizet nebo se může, pro věrohodnější efekt rozpadnout na pár menších částic, které od ní doskočí do několika směrů.

System vázaných částic

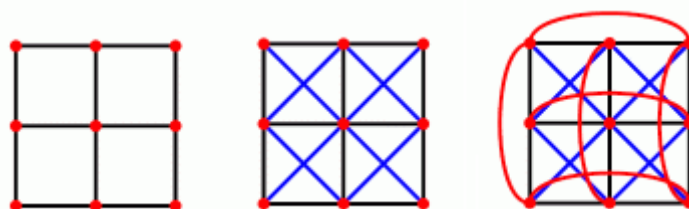
Další problematikou, kde se částicové systémy používají, je simulace pružných materiálů, jako je např. látka či papír. Využívají se k tomu tzv. systémy vázaných částic. Tato technika se s oblibou používá pro modelování oblečení (studio Pixar).

System vázaných částic je ČS, ve kterém jsou jednotlivé částice propojeny vazbami se svými přímými sousedy nebo vzdálenějšími částicemi.

Postup vytvoření pružného materiálu je následující. Plocha materiálu se rozdělí do pravidelné mřížky. Do vrcholů mřížky se umístí částice. Ty se pak spojí pružnými vazbami. Provedení vazeb je patrné z obrázku 8. Modré vazby zabraňují, aby se materiál po působení vnějších sil neproměnil v provaz. Červené vazby zabraňují ostrému zlomu materiálu v místě, kde jsou částice spojované.

Omezení vazbami lze doplnit i dalšími omezeními, např. maximální nebo minimální velikostí úhlu mezi hranami apod. Pokud bychom potřebovali některý bod pevně zafixovat, můžeme mu přiřadit „nekonečně“ velkou, resp. dostatečně velkou hmotnost. Ostatní částice s ní pak nepohnou.

Více v [8].



obr. 8 – ukázka vazeb mezi částicemi (převzato z [8])

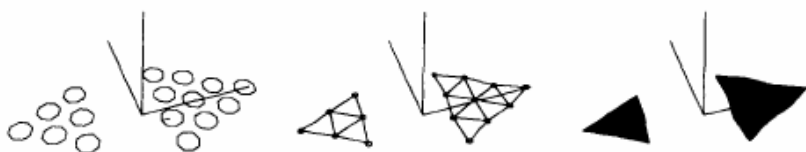
Modelování povrchů pomocí orientovaných částicových systémů

Jedna z možností jak využít ČS je také modelování povrchů. K tomu je zapotřebí nám známou částici drobně upravit. Abychom je mohli použít k modelování povrchu je třeba ji orientovat, tím že jí přidáme další 3 stupně volnosti. Částice v takovém systému může být reprezentována např. diskem, drátěným modelem trojúhelníkové sítě nebo stínovaným trojúhelníkem. Ukázka je na obrázku 9.

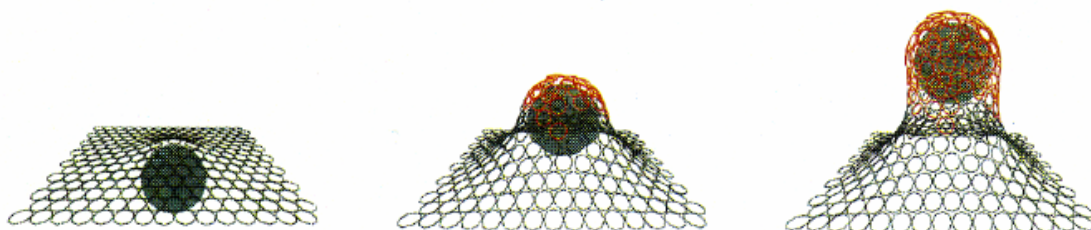
Tato metoda se používá k modelování deformovaných povrchů. Např. si vezmeme trampolínu na kterou dopadne akrobat. Trampolína je v klidovém stavu rovná. Jakmile však na ni akrobat dopadne prohne se. Částice pod jeho nohama se posunou směrem dolů a v trampolíně vznikne trhлина. Ta se zacelí nově vygenerovanými částicemi. Pokud chceme, aby posun částic pod nohama měl vliv na okolní částice, spojíme částice pružnými vazbami. Podobný postup je na obrázku 10. Nové částice zacelující povrch jsou obarveny červeně.

Tuto metodu lze použít také ke slučování povrchů, rozdělování povrchů nebo jejich dotváření – povrch obsahuje pár řídicích částic a díry mezi nimi se zacelí novými.

Detailněji je tato problematika popsána v [9].



obr. 9 – používaná primitiva (převzato z [9])



obr. 10 – ukázka vytvoření nových orientovaných částic (převzato z [9])

Exploze

Exploze je klasický vizuální efekt používaný ve filmech či počítačových hrách. Nebude zde ale popsáno jeho vytváření, ale půjde zde o vytvoření představy o velikosti výpočetní náročnosti dobře vypadajícího ČS.

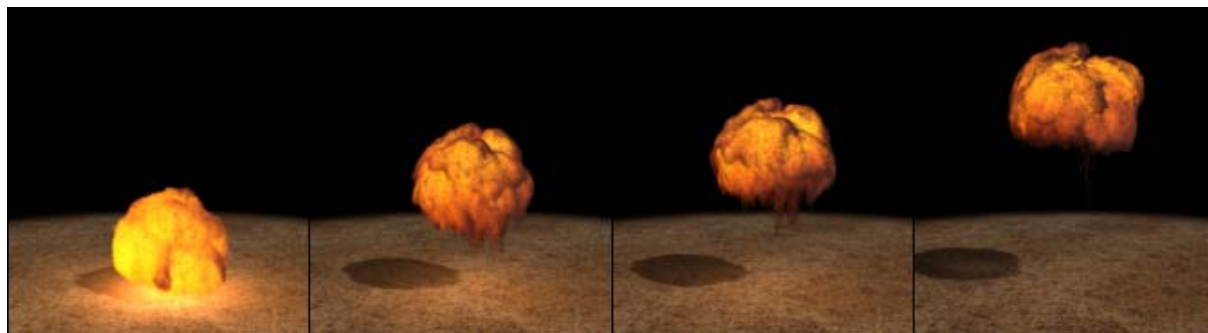
Popisovaný model je založen na rovnicích tekutin a plynů. Počítá s teplotou plynu, rozpínatostí v závislosti na teplotě apod.

Nyní budou uvedeny časy zpracování některých scén:

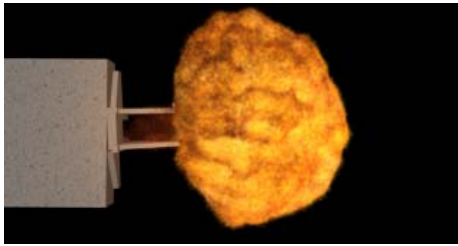
název	číslo obrázku	počet částic	čas simulace 1 framu (sek.)
samostatný výbuch	11	1.000.000	6,9
výbuch dolu	12, 13	1.500.000	5,6
hořák	14	1.800.000	7,8
několikanásobný výbuch	15	cca. 4.000.000	6,7

Simulace byla provedena na počítači s procesorem Intel P4 3,06 GHz.

Konkrétní systém i s dalšími výpočetními časy je popsán v [4].



obr. 11 – samostatný výbuch na neomezené ploše (převzato z [4])



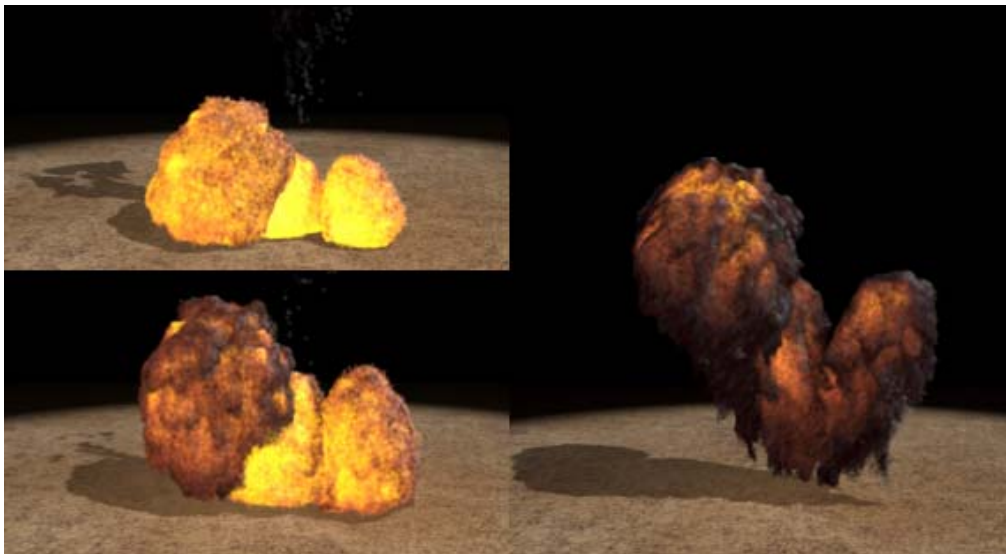
obr. 12 – výbuch dolu, pohled shora
dolů (převzato z [4])



obr. 13 – výbuch dolu, porovnání modelu se
skutečností (převzato z [4])



obr. 14 – hořák (převzato z [4])



obr. 15 – několikanásobný výbuch (převzato z [4])

Problémy realizace

Rychlost

Čas výpočtu neroste pouze s počtem částic, ale také způsobem jejich chování. Když použijeme ten nejjednodušší způsob chování získáme složitost $O(n)$. K tomu přidáme např. možnost kolize částic mezi sebou rázem máme složitost $O(n^2)$. Pokud ještě přidáme k ploch, od kterých chceme aby se částice odráželi získáme složitost $O(k \cdot n^2)$. Takto můžeme pokračovat stále dál.

Stabilita

Problémy se stabilitou jsou způsobeny diskretizací času. Obecně platí pro jakoukoli úlohu simulovanou na počítači. U ČS nastávají při výpočtech kolize. Znaménkový test není možné položit rovný 0 pro detekci kolize. Je třeba volit nějaké ε , protože částice právě díky diskrétnímu času nikdy nebude přesně na hranici objektu.

Volba ε je velmi složitá. Pokud ho zvolíme příliš velké, částice se budou např. odrážet nebo rozpadat ještě před dopadem na danou plochu. Pokud ho naopak zvolíme příliš malé, může se nám stát, že částice „proletí“ skrz plochu a ke kolizi tak vůbec nedojde.

Jedním z řešení je volit ε v závislosti na Δt . Tak bychom měli jistotu, že i na pomalejších počítačích se náš systém bude chovat korektně. To však může způsobit, že se pomalu pohybující částice odrazí ve velké vzdálenosti od odrážející plochy. Nabízí se tedy řešení, počítat ε v závislosti na dráze, kterou částice urazí za čas Δt při rychlosti v . Tím získáme stabilní algoritmus nezávislý na velikosti Δt a na rychlosti, kterou se částice pohybuje. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost pamatovat si velikost dráhy uražené v předcházejícím kroku a výpočetní čas potřebný k přepočtu velikosti ε .

Komerční program – 3DS Max

Jeden z nejrozšířenějších modelovacích programů na světě. Obsahuje nástroje pro modelování jednoduchých částicových systémů.



obr. 18 – zápalka (převzato z [10])

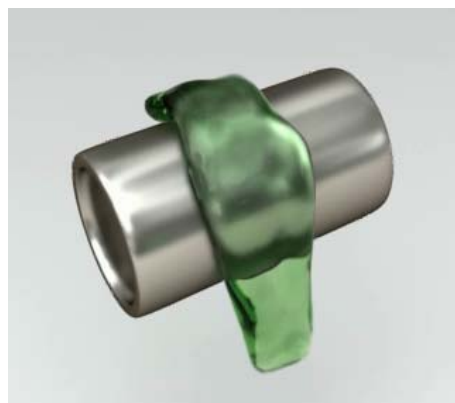


obr. 19 – kouřící komín (převzato z [10])

Lze ho také doplnit různými pluginy. Velmi pěkných efektů lze dosáhnout pomocí pluginu RealFlow od firmy Next Limit Technologies [11], který modeluje dynamiku tekutin. Jeho cena je 1200 dolarů. Obrázky byly pořízeny z ukázkových animací, které jsou na domácích stránkách výrobce.

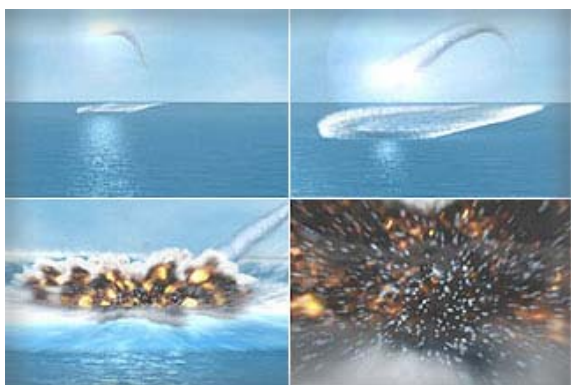


obr. 20 – průjezd automobilu kaluží



obr. 21 - želatina

Druhým pluginem, který jsem vybral, je Particle Flow Tools od firmy Orbaz Technologies [12].



obr. 22 – dopad meteoritu do oceánu



obr. 23 – proud vody

Závěr

Téma mé práce bylo hodně ovlivněno faktem, že studuji počítačovou grafiku. Snažil jsem se přiblížit ostatním studentům (převážně matematikům) postupy vizualizace jimi spočítaných matematických modelů a ukázat jim využití těchto modelů pro vytvoření realistických scén v počítačové grafice. Mou snahou bylo také alespoň z malé části odbourat bariéru mezi matematikou a programátory.

Literatura a zdroje

- [1] J. Žára, B. Beneš, J. Sochor, P. Felkel: Moderní počítačová grafika, 2. vydání, Computer Press, 2005, ISBN 80-251-0454-0
- [2] W. T. Reeves: Particle Systems – Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, Computer Graphics, 1983
- [3] W. T. Reeves: Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems, Siggraph, 1985
- [4] B. E. Feldman, J. F. O'Brien, O. Arikan: Animating Suspended Particle Explosions, University of California, Berkley, 2003
- [5] A. Kolb, L. Latta, C. Rezk-Salama: Hardware-based Simulation and Collision Detection for Large Particle Systems, Graphics Hardware, 2004
- [6] J. van der Burg: Building an Advanced Particle System, Gamasutra.com, 2000, http://www.gamasutra.com/features/20000623/vanderburg_01.htm
- [7] L. Zradička: Průvodce aplikacemi počítačové grafiky, kap. 6. Particle Systems, CVUT, 2002, <http://netra.felk.cvut.cz/~apg/apg-tutorials02/ch06.html>
- [8] P. Tišňovský: Modelování a vizualizace elastických těles pomocí systému vázaných částic, Elektrorevue.cz, 2003, <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03006/index.htm>
- [9] R. Szeliski, D. Tonnesen: Surface Modeling with Oriented Particle Systems, Computer Graphics, 1992
- [10] Grafika On-Line , <http://www.grafika.cz>
- [11] Next Limit Technologies , <http://www.nextlimit.com>
- [12] Orbaz Technologies , <http://www.orbaz.com>