

Časticové systémy

História

- 1962: Videohra *Spacewar!* – explózia vesmírnej lode do množiny pixelov (body)
- 1978: Videohra *Asteroid* – explózia vesmírnej lode do polygónov (plochy)
- 1982: Film *Star Trek II: Khanov hnev* – filmový efekt ohnivej steny po zasiahnutí planéty torpédom Genesis (časticový systém)

Prvý krát použitý názov *časticový systém* – William Reeves: „*Particle Systems – Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects*“

Star Trek II: Khanov hnev



História

- Do roku 1982 boli „časticové systémy“ iba **deterministické** plošné útvary (pixely, polygóny), resp. veľmi jednoduché 3D objekty
- Po roku 1982 sa začali využívať **náhodné** čísla a systémy častíc. Takto mohli simulovať niektoré fyzikálne deje, v ktorých sa „náhodne“ (Brownov pohyb) pohybovali malé čiastočky (molekuly tekutín a plynov, čiastočky prachu, iskry, atď.)

Časticové systémy - definícia

- Je to súbor veľkého počtu častíc s danou životnosťou (vek), ktoré vytvárajú tzv. *fuzzy objekt* (oblaky, vodná hladina, dym, srst', vlasy, pružné telesá, ...) s nepravidelným či neurčitým tvarom či povrchom, ktorý sa môže meniť v čase
- Môžu reprezentovať aj veľkú skupinu dynamicky správajúcich sa objektov ako napr. krdel' vtákov, huf rýb, roj hmyzu, dav ľudí, atď.

Časticové systémy - definícia

- Každá častica má atribúty, ktoré určujú kde a ako sa budú zobrazovať/renderovať (body, čiary, sieť polygónov,...) v scéne
- Častice sa v systéme vytvárajú, pohybujú, interagujú medzi sebou, ovplyvňujú (menia) systém a nakoniec zanikajú
- Ich vznik, pohyb a zánik je často náhodný a ich pohyb sa riadi Newtonovým zákonom (gravitácia) a ďalšími fyzikálnymi zákonmi (zotrvačnosť, zákon akcie a reakcie, elektromagnetizmus, šírenie tepla, trenie, ...)

Druhy časticových systémov

- Oheň, dym, explózia (rýchlosť horenia, teplota, rozptyl...)
- Vlasy a srst', rastliny (hustota, tvar – 3D transformácie)
- Oblaky a hmla (priesvitnosť, náhodnosť, turbulencia)
- Tekutiny (viskozita, priľnavosť, trenie s povrchom nádoby), bublinky a pena
- Tkaniny (tuhosť, ohybnosť, hustota)
- Krdle a húfy (tvar, správanie, kolízie)
 - pevný počet prvkov
 - štandardný spôsob vykresľovania
 - snaha vyhnúť sa kolíziám medzi sebou aj s objektami
 - udržiavanie blízkosti, rovnakej rýchlosti a smeru so susedmi
 - nasledovanie prvého vodcu

Druhy časticových systémov

- Premena jedného druhu častíc na iný
 - ohňostrojoj – iskry na dym
 - dážď – kvapky na mokré fl'aky
- Kombinácia viacerých časticových systémov
 - oheň – plamene, dym, iskry
 - explózia – dym, oheň, lietajúce objekty
 - voda – povrch (hladina), bublinky, pena



Časticové systémy - využitie

- Vizualne efekty pre film a počítačové hry (explózia, ohňostrojoj, elektrický výboj, laserový lúč, hmla, ...)
- Simulácie fyzikálnych javov a chemických reakcií, dynamické simulácie (gravitácia, prúdenie tekutín, šírenie tepla, simulácia pružín, hybnosť, elasticita, ohybnosť, trenie, dynamika tuhých a pružných telies, kolízie, horenie ohňa, explózie, pohyb lavín, záplavy, padanie snehu a dažďa, stopy častíc)
- Modelovanie realistických scén (kamene, rastliny, vodná hladina, oblaky, hmla, ...)
- Pohyb skupiny živých objektov (křdel' vtákov, huf rýb, letiaci roj hmyzu, stádo koní, dav ľudí, ...)
- Systémy viazaných častíc (tkaniny a ich zvlnenie, ohýbanie papiera, modelovanie oblečenia, ...)

Časticové systémy - výhody

- Jednoduchšie ako komplexné útvary zložené z veľkého počtu polygónov
- Jednoduchšie a rýchlejšie na výpočet ich renderovania či kolízií
- Model je procedurálny a využíva náhodnosť
- Vytvorenie objektov tvorených časticovými systémami nevyžaduje manuálne vytváranie zložitých 3D objektov

Časticové systémy – atribúty

- Fyzikálne atribúty
- (Počítačovo-)Grafické
- Geometrické
- Matematické

Časticové systémy – atribúty

- **Fyzikálne atribúty**

- pozícia v priestore (dráha pohybu)
- vektor rýchlosti, zrýchlenia (smer a veľkosť), sily (gravitácia, elektromagnetizmus, ...)
- trenie a odpor medzi časticami a aj okolím
- hmotnosť a hybnosť
- vek, životnosť (atribúty pre zánik, zmenu častice z jednej na druhú)
- odrazivosť povrchu (albedo)
- väzbové sily (príťažlivé a odpudivé)
- atribúty z predchádzajúceho kroku (napr. pozícia)

Časticové systémy – atribúty

- **Grafické atribúty**

- štruktúra povrchu (drsnosť, lesklosť, ...)
- farba
- textúra
- priesvitnosť
- rozmazanie pohybom
- žiara

- **Matematické a geometrické atribúty**

- náhodnosť generovania, pohybu a ďalších atrib.
- rozdelenie (rovnomé, normálne, ...)
- bod (pozícia) vzniku
- tvar (body, čiary, objekty) a veľkosť (3D transfor.)
- normálový vektor v bode vzniku častice

Časticové systémy – atribúty

- Atribúty každej častice môžu byť stále (rastliny, kamene) alebo sa môžu meniť pravidelne podľa nejakej funkcie alebo náhodne (napr. farba iskier v ohni, výbuchu či v ohňostroji sa v čase mení)
- Zmena atribútov je určená parametrickou funkciou (aj stochastickou) s parametrom t – čas, prípadne ďalšími parametrami či atribútmi ako pozícia, smer, rýchlosť, atď.

Generovanie častíc

- Využíva sa tzv. generátor (emitter) – bod, rovina, plocha, geometrický objekt tvorený polygónmi, ...
 - pravidelné (mriežka – grid, lattice),
 - náhodné (random),
 - kvázináhodné (jittered) rozmiestnenie
- Rozmiestnenie vo vrcholoch, hranách, stenách či v objeme telesa
- Statický vs. pohyblivý generátor (oheň vs raketa), stály vs. meniaci sa tvar generátora
- Podmienený vznik nových častíc (po zániku či rozpade predchádzajúcich častíc, ...)
- Počet častíc, rýchlosť generovania a ich atribúty môže byť dopredu daný alebo je náhodný – určený nejakým stochastickým procesom

Generovanie častíc

- Hodnota atribútu:

$hodnota = základ + \text{random}(-1, 1) \cdot rozsah$,
kde *základ* je nejaká daná priemerná hodnota

- Počet častíc:

$počet = základ + \text{random}(-1, 1) \cdot rozsah$

alebo

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

alebo

$počet = (základ + \text{random}(-1, 1) \cdot rozsah) \cdot objem$

- Limitovanie počtu častíc na veľkosť zobrazovacej plochy

Sily pôsobiace na častice

- Jednozložkové (gravitácia, odpor prostredia) – pôsobia na každú časticu konštantnou silou alebo ich pôsobenie je závislé od pozície častice, jej rýchlosti či veku
- Viaczložkové (pružiny) – sila (má viac zložiek) je aplikovaná na určitý (daný) počet častíc, má lokálne obmedzenie
- Sily priestorovej interakcie (častica vs. častica) – sila (príťažlivosť, odpudzovanie) pôsobí medzi dvomi časticami (susedmi) v závislosti od vzdialenosti medzi nimi

Sily pôsobiace na častice

Sčítanie síl: $F = \sum_{i=1}^n f_i$, kde f_i sú čiastkové sily pôsobiace na časticu

Sila spôsobujúca zrýchlenie častice $a(t) = \frac{F(t)}{m}$

- Gravitačná sila $F = m \cdot g$
- Sily prostredia (vplyv vetra, elektrický náboj, ...)
- Sila odporu prostredia $F = -k_r \cdot v$

k_r je odpor prostredia a v je rýchlosť častice

Sily pôsobiace na častice

- Sily interakcie medzi časticami a a b :

- pružná sila s tlmením

$$\mathbf{F}_{ab} = - \left[k_s \cdot (|\Delta \mathbf{x}| - d) + k_d \cdot \frac{\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{x}}{|\Delta \mathbf{x}|} \right] \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}}{|\Delta \mathbf{x}|}$$

$$\mathbf{F}_{ba} = -\mathbf{F}_{ab}$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b, \quad \Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$$

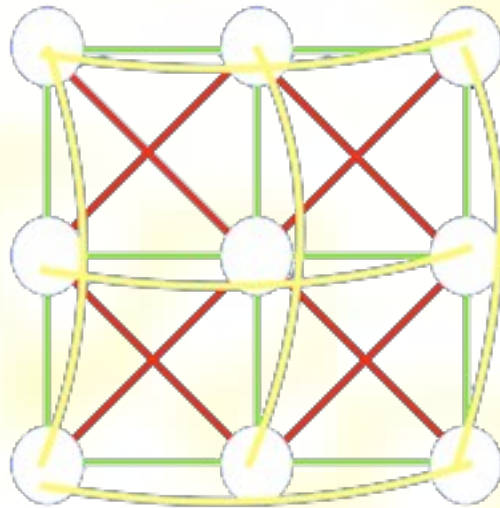
kde k_s je koeficient pružnosti, k_d je koeficient tlmenia, d je dĺžka pružiny, \mathbf{x} je poloha a \mathbf{v} je rýchlosť častice

- väzbová sila, býva vyjadrená ako sila pružiny

- odpudivá sila $\mathbf{F}_{ab} = k_r \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}}{|\Delta \mathbf{x}|^2}$

Sily pôsobiace na častice

- Pri modelovaní tkanín sa využíva sila pružín, štrukturálna (priama) väzbová sila (zelená farba), tangenciálna sila (červená farba) a sila ohybu (žltá farba)



- Modelovanie vlasov (vlákien) využíva pevné segmenty spojené pružinami, ktoré využívajú ohybovú a torznú (skrútenie) silu

Sily pôsobiace na častice

- vzájomná gravitácia dvoch objektov

$$\mathbf{F}_{ab} = -\frac{G \cdot m_a \cdot m_b}{|\Delta \mathbf{x}|^2} \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}}{|\Delta \mathbf{x}|} \quad \mathbf{F}_{ba} = -\mathbf{F}_{ab}$$

kde G je gravitačná konštanta, m_a je hmotnosť častice a a m_b je hmotnosť častice b

- Coulombova sila (príťahovanie dvoch elektricky nabitých častíc)

$$\mathbf{F}_{ab} = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{q_a \cdot q_b}{|\Delta \mathbf{x}|^2} \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}}{|\Delta \mathbf{x}|} \quad \mathbf{F}_{ba} = -\mathbf{F}_{ab}$$

kde ϵ je permeabilita vákua a q_a je náboj častice a a q_b je náboj častice b

Sily pôsobiace na častice

- viskozita – šmykový pohyb (trenie) medzi časticami je obmedzený a vymení sa hybnosť medzi časticami a a b

$$\mathbf{P}_{ab} = \frac{v \cdot k(d_{ab}) \cdot (\mathbf{P}_a - \mathbf{P}_b) \Delta t}{2 \sum_{i=1}^n k(d_i)}$$

$$\mathbf{P}_a = \mathbf{P}_a + \mathbf{P}_{ab}$$

$$\mathbf{P}_b = \mathbf{P}_b - \mathbf{P}_{ab}$$

v je koeficient viskozity

$k()$ je váhová funkcia (Gaussian)

d_{ab} je vzdialenosť medzi časticami a a b

d_i je vzdialenosť od počítanej častice

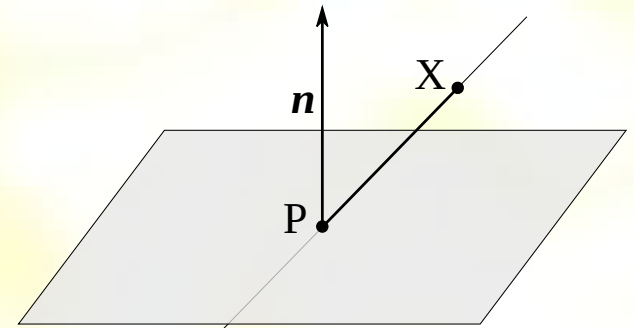
\mathbf{P}_a resp. \mathbf{P}_b je hybnosť častice a resp. b

Interakcie častíc – kolízie

- Častica narazí na prekážku => zmena atribútu častice (napr. vektor rýchlosti), prípadne zánik či rozpad častice alebo vznik novej častice
- Pri detekcii kolízií sa využíva obálka častice (resp. objektu, ktorým je reprezentovaná)
 - guľa
 - kváder
 - valec či kapsula
 - polytop
 - konvexný obal
 - polygonálna sieť objektu

Detekcia a reakcia na kolíziu

- $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{P}) < 0$, bod X leží pod rovinou, vzniká kolízia
 - $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{P}) = 0$, bod X leží v rovine
 - $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{P}) > 0$, nevzniká kolízia
- výpočet miesta kolízie P

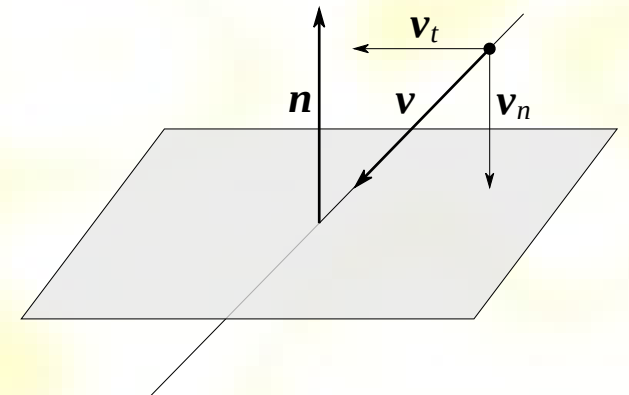


- Guľa vs. rovina – zákon dopadu a odrazu, elastický odraz bez kĺzania. Rozklad vektora pohybu a rýchlosti na normálovú a tangenciálnu zložku

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_n + \mathbf{x}_t \quad \mathbf{x}_n = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_n + \mathbf{v}_t \quad \mathbf{v}_n = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n}$$

$$\mathbf{v}_n' = -k_r \mathbf{v}_n \quad \mathbf{v}_t' = \mathbf{v}_t \quad k_r \in \langle 0, 1 \rangle$$



- Guľa vs. guľa – zmena hybnosti

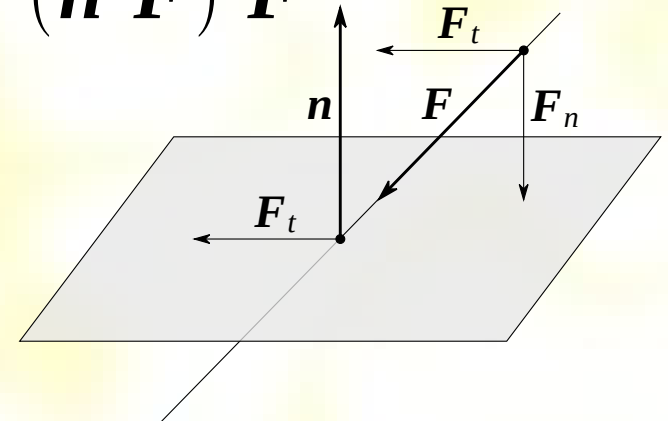
Reakcia na kolíziu – sily

- $\mathbf{n} \cdot \mathbf{F} > 0$, častica akceleruje od roviny
- $\mathbf{n} \cdot \mathbf{F} = 0$, častica akceleruje v rovine
- $\mathbf{n} \cdot \mathbf{F} < 0$, častica je zatlačená do roviny

Vzniká kontaktná sila \mathbf{F}_c , ktorá vynuluje normálovú zložku sily a častica sa začne kĺzať v rovine, keďže na ňu pôsobí sila šmýkania \mathbf{F}_f

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t \quad \mathbf{F}_n = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{F}) \cdot \mathbf{F} \quad \mathbf{F}_c = -(\mathbf{n} \cdot \mathbf{F}) \cdot \mathbf{F}$$

$$\mathbf{F}_f = k_f \mathbf{F}_t \quad k_f \in \langle 0, 1 \rangle$$



Zánik častíc

- Je určený vekom a životnosťou, prípadne ohraničením oblasti v ktorej môže častica existovať
- Vek je čas (počet snímkov), ako dlho daná častica existuje. Životnosť je daná maximálnym možným vekom (počtom snímkov)
- Po skončení životnosti je častica odstránená zo systému
- Životnosť je pevná, náhodná, alebo určená inak:
 - funkciou – viditeľnosť či veľkosť je pod hranicou, rozpad častice (iskry ohňa, dym)
 - interakciou s inými časticami či objektmi scény – kolízia (kvapky vody, snehové vločky)
 - hranicami celej scény

Cyklus animácie čast. systému

Pre každý obrázok/frame:

- 1) Generuj nové častice
- 2) Každéj častici priradiť atribúty (fyzikálne, grafické, matematické)
- 3) Ak častica prekročila stanovený vek, vymaž ju
- 4) Zvyšné častice zmenia pozíciu (posunutie, otočenie) a stav, t.j. interagujú s ostatnými časticami (kolízia, atď.) a silami prostredia => vypočítaj nové, väčšinou fyzikálne atribúty
- 5) Renderuj/vykresli scénu so zvyšnými časticami

Výpočet nového stavu častice

- Bezstavový – nasledujúci stav (atribúty) je vypočítaný konkrétnymi (napr. matematickými) funkciami (rýchlosť, pozícia, teplota, atď).
Nevyužíva sa predošlý stav
- Stavový – pre výpočet nového stavu sa používajú atribúty (smer, rýchlosť, ...) predošlého, prípadne aj nového stavu

Pohyb častíc

- Používa klasický vzťah (Eulerovu, Verletovu, midpoint, R-K metódu riešenia diferenciálnej rovnice) pre pohyb telesa určený vektorom zrýchlenia $\mathbf{a}(t)$ a/alebo vektorom rýchlosti $\mathbf{v}(t)$

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{x}}(t) \quad \mathbf{a}(t) = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{v}}(t)$$

- Eulerova metóda (Taylorov rozvoj 1 stupňa) využíva deriváciu prvého stupňa a jeden krok Δt

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t) \cdot \Delta t$$

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \cdot \Delta t$$

Táto metóda je ale najmenej presná, iba $O(\Delta t^2)$ a preto vyžaduje malý krok Δt

Pohyb častíc

- Midpoint metóda je presnejšia a využíva polohu častice \mathbf{x}_{mid} v polovičnom kroku $\Delta t / 2$:

$$\mathbf{v}_{mid} = \mathbf{v}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t) \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

$$\mathbf{x}_{mid} = \mathbf{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}_{mid}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \cdot \Delta t$$

- Verletova metóda používa aj dvojnásobný krok $2\Delta t$:

$$\mathbf{x}(t + 2\Delta t) = \mathbf{x}(t + \Delta t) + \mathbf{v}(t + \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$= 2\mathbf{x}(t + \Delta t) - \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$= 2\mathbf{x}(t + \Delta t) - \mathbf{x}(t) - \mathbf{v}(t) \cdot \Delta t + (\mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t) \cdot \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$= 2\mathbf{x}(t + \Delta t) - \mathbf{x}(t) + \mathbf{a}(t) \cdot \Delta t^2$$

Pohyb částic

- Použitím Newtonovho zákona

$$\mathbf{F}(t) = m \cdot \mathbf{a}(t)$$

dostaneme

$$\mathbf{x}(t + 2\Delta t) = 2\mathbf{x}(t + \Delta t) - \mathbf{x}(t) + \frac{\mathbf{F}(t)}{m} \cdot \Delta t^2$$

- Numerickým integrovaním vztahu

$$x'' = 2x' - x + \frac{F}{m} \Delta t^2$$

získáme řešení, t.j. polohu částice v čase t s presnosťou $O(\Delta t^3)$

Pohyb častíc

- Možnosti integrovania:
 - priamo – vyčíslenie polohy častice v ľubovoľnom čase pomocou danej parametrickej rovnice $x(t)$, začiatočnej polohy $x(0)$, rýchlosti $v(0)$ a konštantného zrýchlenia (napr. g)

$$x(t) = x(0) + v(0) \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

je vhodné iba pre častice s konštantným zrýchlením, napr. letiaci projektil

- iterovaním – numerické vyčíslenie integrálu
 - Eulerova integrácia
 - Verletova integrácia
 - integrovanie pomocou Runge-Kutta

Pohyb častíc – krdle, húfy, roje

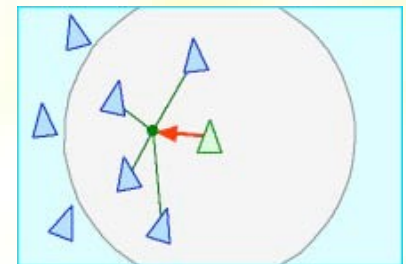
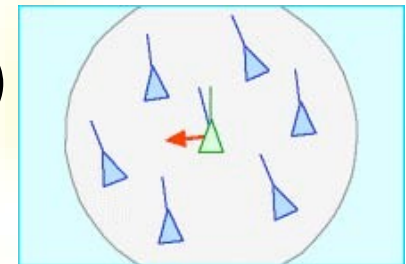
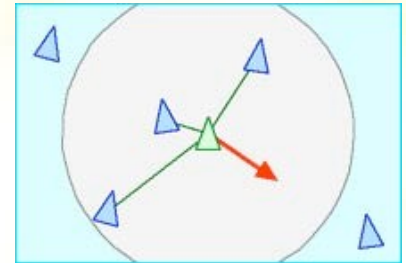
- Simulácia krdľov, húfov, rojov a davov (C. Reynolds 1986) zahŕňa nielen vzájomné ale i individuálne správanie objektov (boidov) v skupine
- Jednoduché lokálne pravidlá vedú ku komplexnému správaniu
- Celý pohyb krdľa či húfu smeruje k nejakému cieľu (napr. koristi'), ktorý môže byť statický, alebo sa pohybuje po krivke
- *Boid* je zovšeobecnenie častice, ktorá má nejakú inteligenciu a vykonáva vlastný pohyb, napr. let (smer, uhol náklonu) a môže byť ovplyvňovaný nielen gravitáciou ale aj odstredivou silou

Pohyb častíc – krdle, húfy, roje

- Boidi reagujú iba na susedov v ich blízkom okolí, ktorí sa nachádzajú pred nimi a po stranách
- Rozhodujú sa samostatne, aby sa vyhli konfliktu (napr. zrážke s ostatnými alebo s okolitým objektom)
- Boidi sa navzájom ovplyvňujú, pričom ich správanie sa riadi jednoduchými pravidlami:
 - separácia
 - súdržnosť
 - usporiadanie
 - vyhýbanie sa prekážkam

Pohyb častíc – krdle, húfy, roje

- Separácia – každý boid si udržiava určitú vzdialenosť od susedov (snaha vyhnúť sa konfliktu, avšak udržať sa v spoločenstve
- Usporiadanie – boidi udržujú (kopírujú) smer, ktorým sa pohybuje vedúci jedinec
- Súdržnosť – vzdialenejší boidi sa snažia dostať bližšie k centru zoskupených boidov



Vykresľovanie častíc

- Častica je buď 0-rozmerný bod (napr. iskra), ktorý emituje svetlo (využíva sa aditívnosť, ak viac častíc je na tom istom mieste), alebo je to normálny objekt (napr. guľa). Pohybujúca častica môže vytvárať aj krivku, tzv. stopu častice (ohňostroj, dážď, a pod.)
- Využitie tzv. textúrových billboardov s priesvitnosťou (listy stromov, vločky snehu, ryba v húfe, ...) a izoplôch $F(x, y, z) = c$, alebo metagúl' (častice iba na povrchu tekutiny – hladina, splývanie kvapiek)
- Pri rýchlo pohybujúcich sa časticiach (dážď, iskry) sa využíva rozmazanie pohybom
- Pri fuzzy objektoch sa blízke častice renderujú detailnejšie ako vzdialené

Vykresľovanie častíc

- Obyčajne sa zanedbáva vrhanie tieňu častice na inú časticu, napr. listy stromu na iný strom (listy na okrajoch stromu sú zväčša osvetlené, avšak vo vnútri stromu sú v tieni = funkcia vzdialenosti). Problém s vrhaním tieňu jedného systému na druhý (napr. vrcholy stromov sú osvetlené)
- Zjednodušenie = vrhanie tieňa zhluku (obálky) častíc na statické objekty
- Urýchlenie výpočtu tieňov pomocou algoritmu maliara či mapy tieňov (shadow maps)
- Na výpočet atribútov (fyzikálnych aj grafických) sa často využíva GPU (AGEIA PhysX - NVIDIA) a paralelné výpočty