Modele cząstek

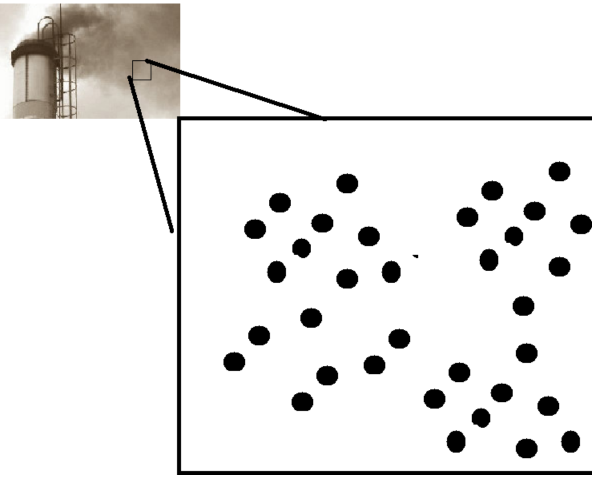
(w zastosowaniu do grafiki komputerowej)

Próba definicji

- Pojęcie systemu cząstek (*particle system*) jest w grafice komputerowej nie całkiem precyzyjnie określone.
- Coś jednak daje się sprecyzować:
  - System cząstek jest zwykle złożony wielu obiektów
  - Obiekty nie muszą być identyczne, ale najczęściej są przynajmniej podobne
  - Cząstki mogą być reprezentowane przez punkty/piksele. ale również przez bardziej złożone obiekty – trójkąty lub siatki wielu trójkątów…
  - Cząstki zwykle poruszają się według wspólnych zasad fizyki
  - System cząstek może wykorzystywać element losowości.

Do czego może służyć system cząstek?

- Systemy cząstek zwykle są używane do symulacji wielu różnych zjawisk i procesów
  - Śnieg / Deszcz / Tornada
  - Eksplozje / Ogień / Dym
  - Efekty magiczne… np. w filmach animowanych
  - Przepływ wody / Fontanny / Wodospady / Krew
  - Kurz
  - Iskry / Fajerwerki
- Można również modelować:
  - Tkaniny
  - Włosy
  - Bryły sztywne i elastyczne



Historyczne prace

W.T. Reeves, "Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", Computer Graphics, vol. 17, no. 3, pp 359-376, 1983.

W.T. Reeves, "Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems", Computer Graphics, vol. 19, no. 3, pp 313-322, 1985.

William Reeves pracował w dziale grafiki komputerowej Lucasfilm oraz był współzałożycielem firmy Pixar.
Proszę przeczytać lub choć przejrzeć pierwszy z artykułów, dostępny np.
https://www.lri.fr/~mbl/ENS/IG2/devoir2/files/docs/fuzzyParticles.pdf

Atrybuty cząstek wprowadzone przez Reevesa (podzielone na grupy)

- *Position*
- *Velocity* (speed and direction)

- *Color*
- *Shape*
- *Size*
- *Transparency*

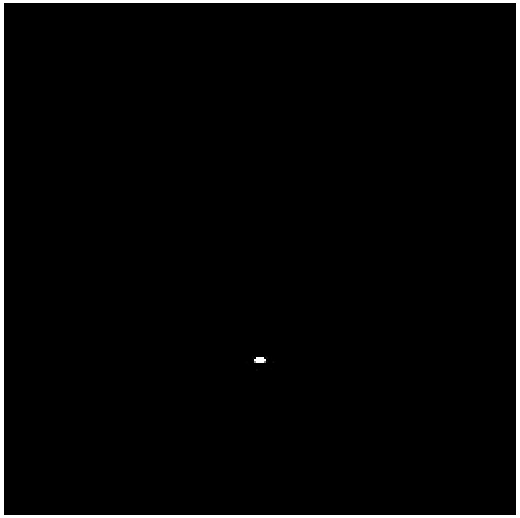
- *Age*
- *Lifetime*

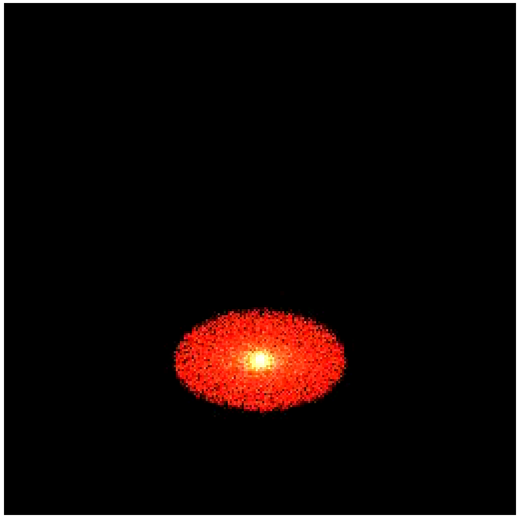
Cykl życia cząstek – najbardziej charakterystyczna cecha systemu cząstek

- Pojawienie się, generacja cząstek – z początkowym położeniem, prędkością i częstością generacji, zwykle losowo według zadanego rozkładu
- Dynamika cząstek – według zadanych reguł
- Wiek cząstki, sterowany parametrem Age – może wpływać na wygląd cząstki
- Zniknięcie cząstki po osiągnięciu wieku Lifetime

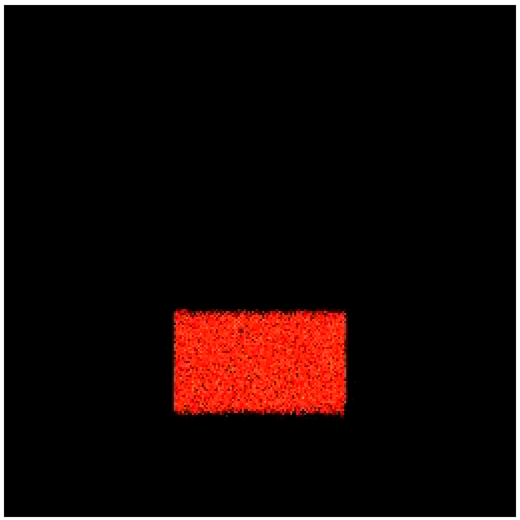
Przykłady z modelu Reevesa

Proponuję obejrzeć krótki film z wczesnych rozwiązań systemu cząstek w grafice: https://youtu.be/XucueQe0qiE

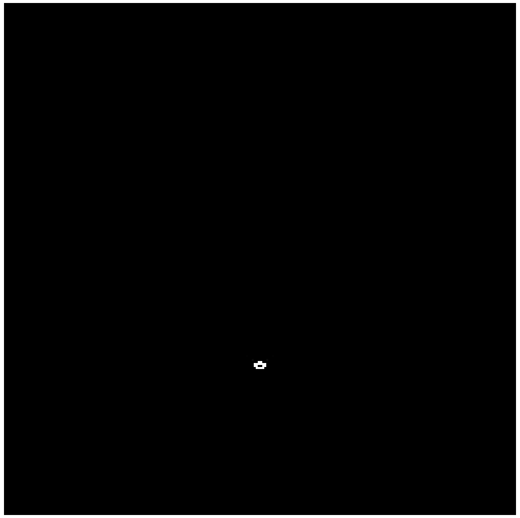


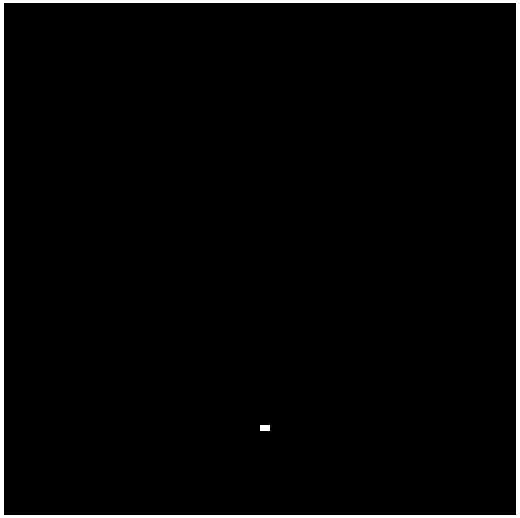


Przykłady z modelu Reevesa

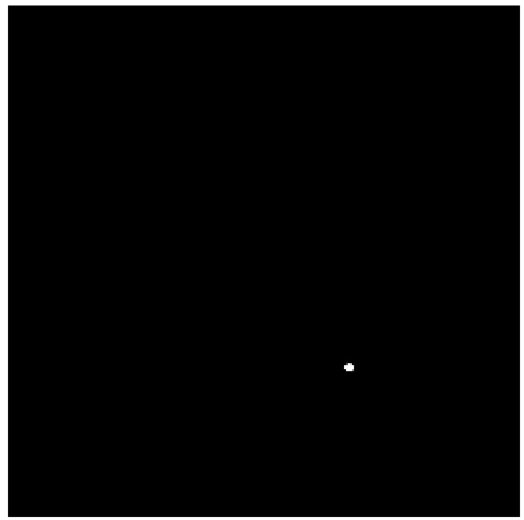


Przykłady z modelu Reevesa





Przykłady z modelu Reevesa



Wrath of Khan – odcinek z serialu Star Track – efekt Genesis

- https://youtu.be/13b7TSiidaM https://youtu.be/52XlyMbxxh8

Dynamika cząstek

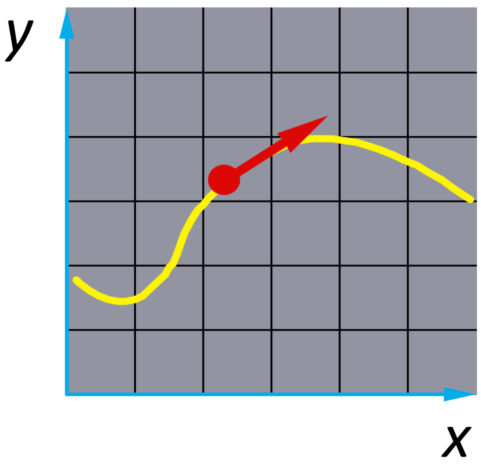
Dynamika cząstek – różne, choć pokrewne podejścia

- Ruch cząstek podlega wprost drugiej zasadzie dynamiki. Cząstki poruszają się w zewnętrznym polu sił i/lub w polu sił wytwarzanych przez nie same

- Cząstki poruszają się w zewnętrznym polu prędkości, zgodnie z wektorami przez nie wskazanymi (cząstki jak piłeczki płynące z nurtem wody). Forma pola prędkości może być wynikiem złożonych obliczeń (np. rozwiązania równan przepływu Naviera-Stokesa)

Cząstki w polu prędkości

- Zaczynamy od pojedynczej cząstki



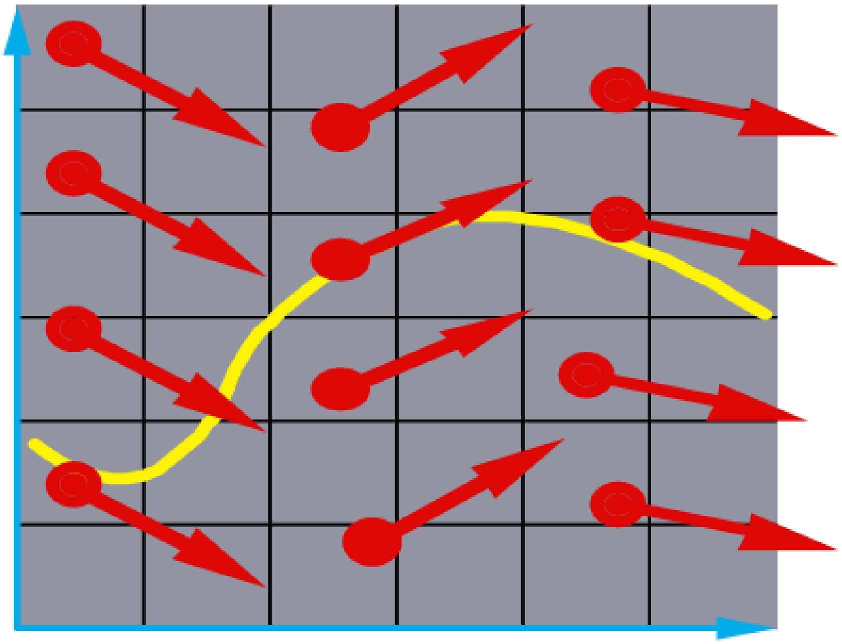
- o położeniu w 2D $\vec{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$

- i prędkości $\vec{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{x}} = \frac{d\vec{\mathbf{x}}}{dt} = \begin{bmatrix} dx/dt \\ dy/dt \end{bmatrix}$

- Załóżmy, że pole prędkości jest określone funkcją g, i zatem $\dot{\mathbf{x}} = g(\vec{\mathbf{x}}, t)$

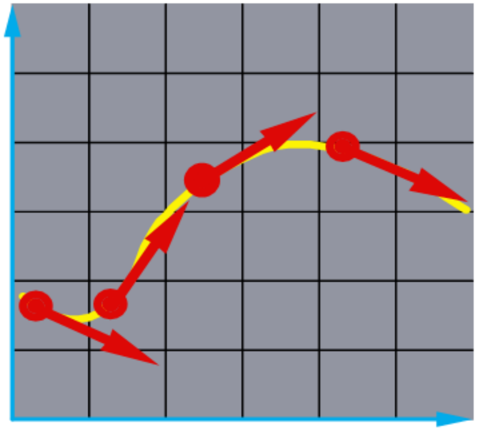
Wektorowe pole prędkości

- Funkcja g definiuje pole wektorowe nad **x**



Trajektorie

Równanie prędkości jest równaniem różniczkowym pierwszego rzędu.
Możemy je rozwiązać względem x dla kolejnych kroków czasowych

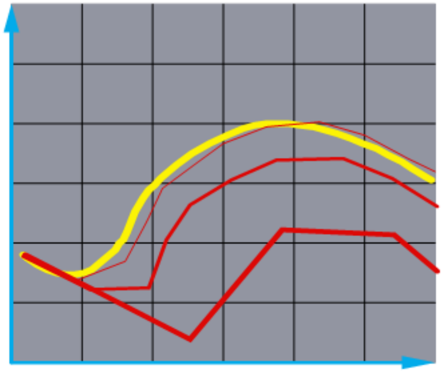


Nazywamy to rozwiązaniem zagadnienia początkowego, które jest trajektorią ruchu cząstki – krzywą całkową.

Obliczanie trajektorii - schemat numeryczny

Najprostszy jest znany schemat Eulera

Znany również z dużych błędów dla dużych kroków czasowych – prowadzących często do niestabilności



Jak można sobie z tym poradzić?

Dygresja. Jak zaprojektować ciekawe pole g?

- Funkcja g może być rozwiązaniem równania przepływu, np. ciepła (co jest prostsze) lub płynu w różnych warunkach brzegowych (np. równania Bernoulliego, Naviera-Stokesa lub innych)

- Może być również zdefiniowana w prostszy sposób, co jest wspomniane na kilku następnych slajdach

Animation Aerodynamics

Jakub Wejchert i David Humann
Animation Aerodynamics
Computer Graphics, Volume 25, number 4 July 1991

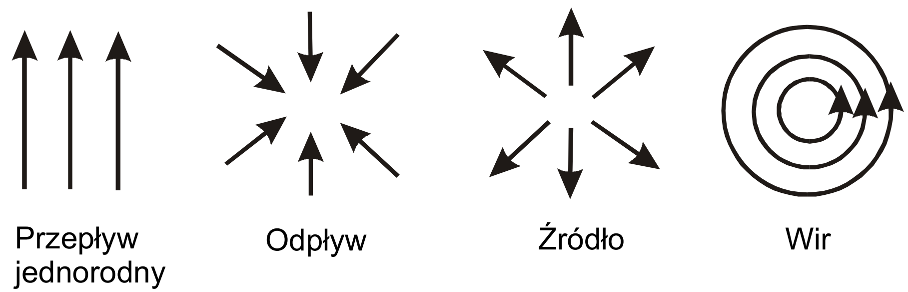
Autorzy opisują prosty sposób modelowania i sterowania ruchem cząstek w polu przepływów.

Mechanika przepływu jest opisana przez równania Naviera-Stokesa, Przy upraszczających założeniach, że płyn jest nielepki, nieściśliwy i bezwirowy, a samo pole Φ jest potencjalne.

$$\nabla \boldsymbol{v} = \nabla \nabla \Phi = \nabla^2 \Phi = 0$$

$$\boldsymbol{v} = \nabla \Phi$$

Flow primitives

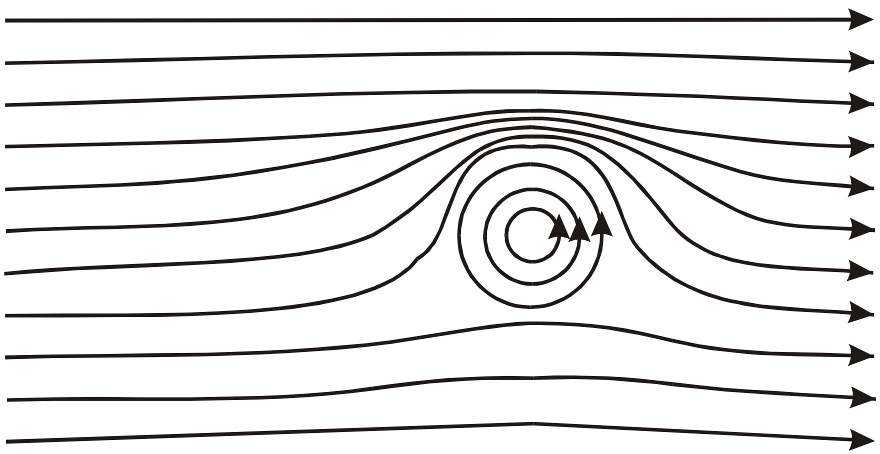


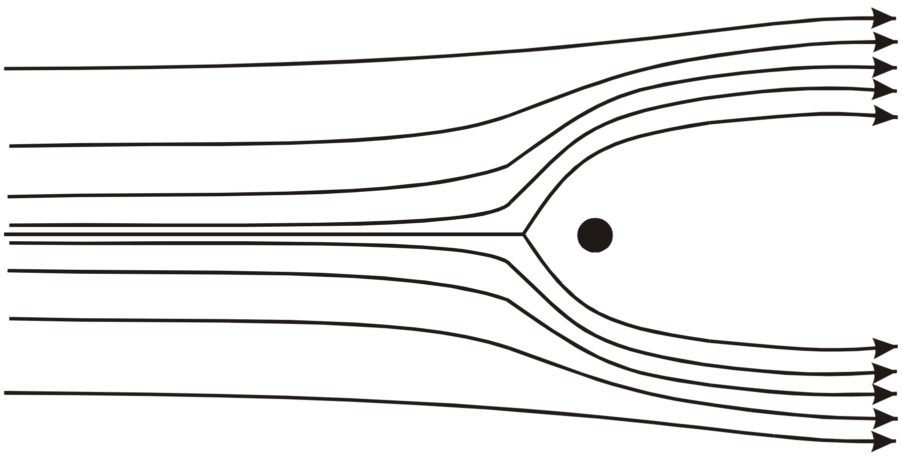
$$\Phi = \frac{a}{2\pi} * \ln r \quad v_r = \frac{a}{2\pi r} \quad v_\theta = 0 \quad v_z = 0 \qquad \text{źródło}$$

$$\Phi = \frac{b}{2\pi} * \theta \quad v_r = 0 \quad v_\theta = \frac{b}{2\pi r} \quad v_z = 0 \qquad \text{wir}$$

$$V = v_{wir}(x,y,z) + v_{odpływ}(x,y,z) + v_{źródło}(x,y,z) + \ldots$$

Superpozycja podstawowych pól

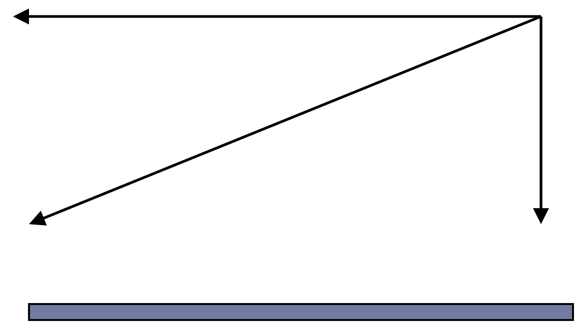




Opór obiektów

Pojedyncza kula: $F = 6\pi a \eta v^r$

gdzie: $v^r = v - p$ prędkość względna



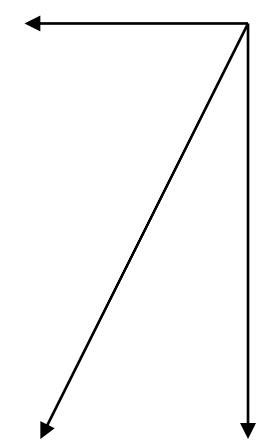
Z kolei $v^r = v^n + v^t$

$$F^n = \rho A v^2$$

$$F^t = A\eta \frac{dv}{dy}$$

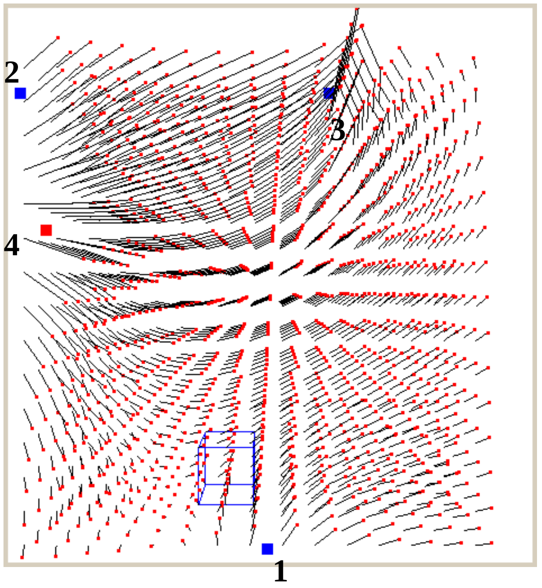
$$\vec{F}^n = \rho A v \vec{v}$$

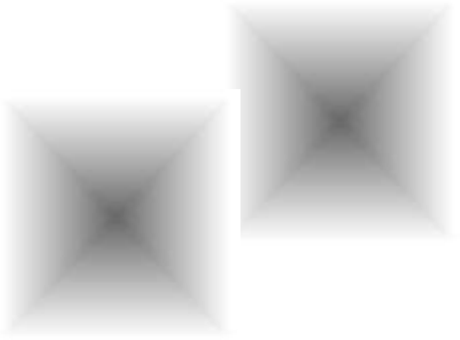
$$\vec{F}^t = A\eta \vec{v}^t$$



Rysunki Wejcherta

Prosty przykład





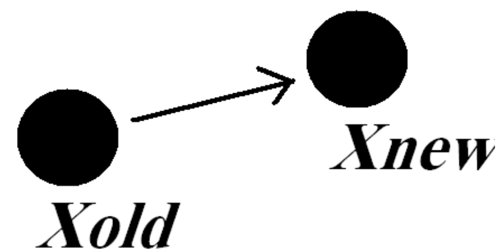
Demonstracja Karla Simsa, Particle Dreams, 1988

https://youtu.be/m-JVJbqwe1E

Dynamika cząstek w polu sił

- Korzystamy wprost z równań ruchu Newtona

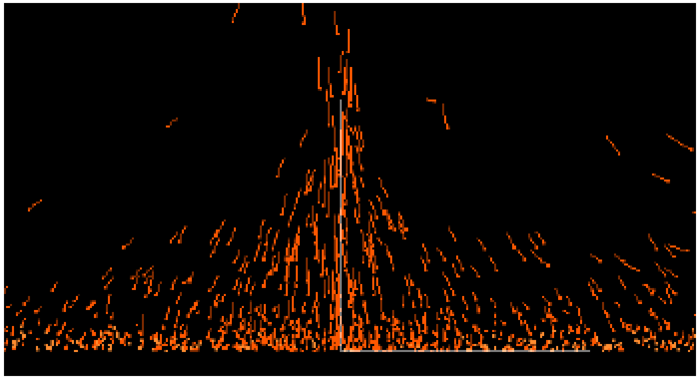
$$
\begin{aligned}
a &= \frac{F}{m} \\
x' &= x + v\Delta t \\
v' &= v + a\Delta t
\end{aligned}
$$

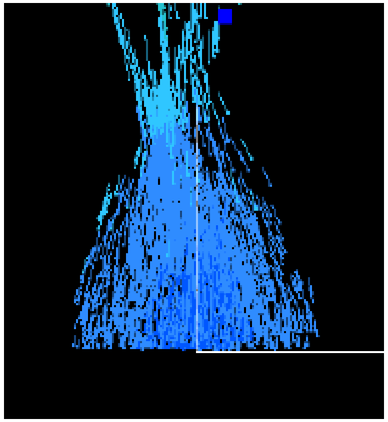


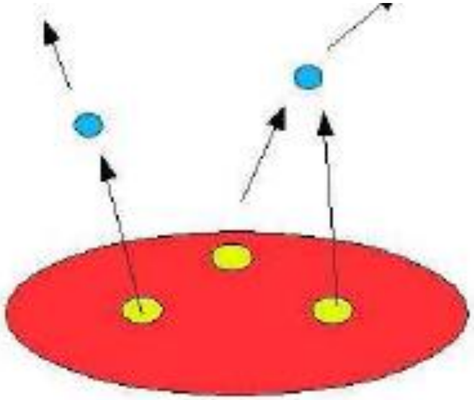
- Wrócimy do tego nieco później

Modelowanie ognia

- Definiujemy obszar emisji
- Cząstki pojawiają się losowo

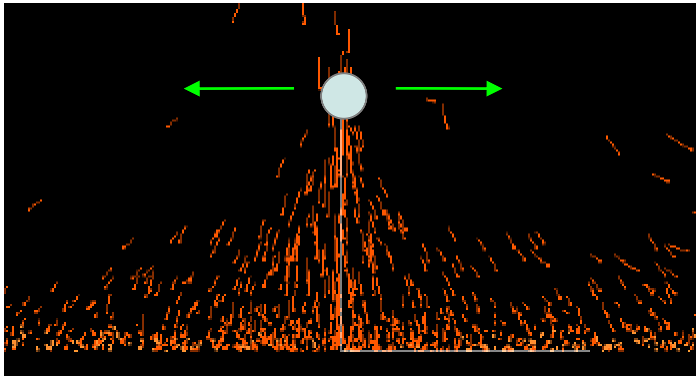






Modelowanie ognia (2)

- Do cząstek dodana jest siła, tak, żęe przemieszczają się do określonego punktu
- Cel ruchu jest poddany generatorowi liczb losowych i drga

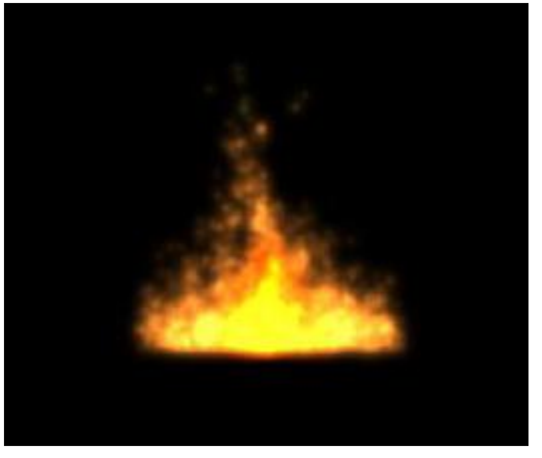


$$g_x = 7sin(rand(-1,1) \times \pi)$$
$$g_z = 7cos(rand(-1,1) \times \pi)$$
$$g_y = rand(5,25)$$

https://youtu.be/7LbtpmFSKF4

Modelowanie ognia (3)

- Kolor cząstek zmienia się, tak że najjaśniejsze są w środku i ciemnieją ku brzegom



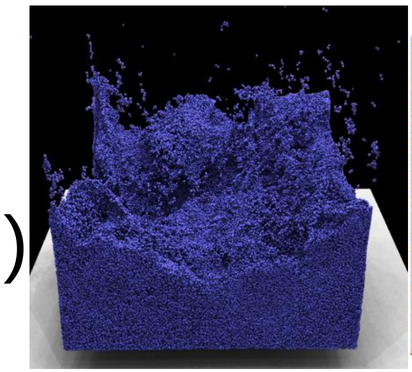
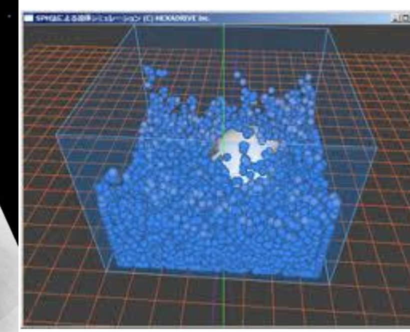
https://youtu.be/gS_koVukVzE

Modelowanie cieczy za pomocą cząstek

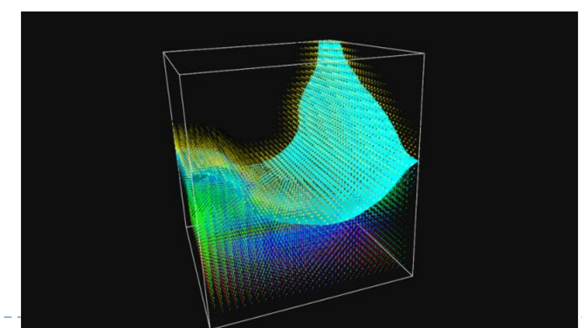
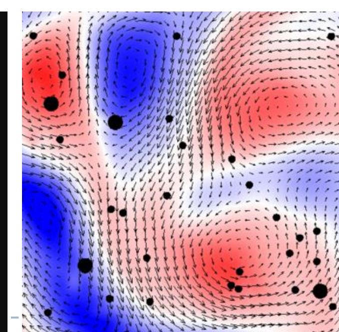
– Możemy symulować takie rzeczy jak
  - wodę,
  - płomień,
  - przepływ powietrza

Symulacja cieczy (2)

– Dwa podejścia
  - Lagrange'a
    – np. SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

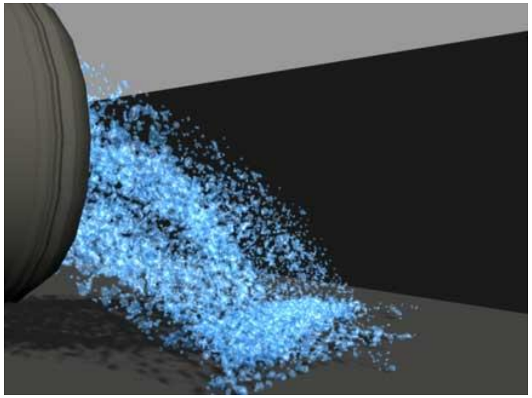



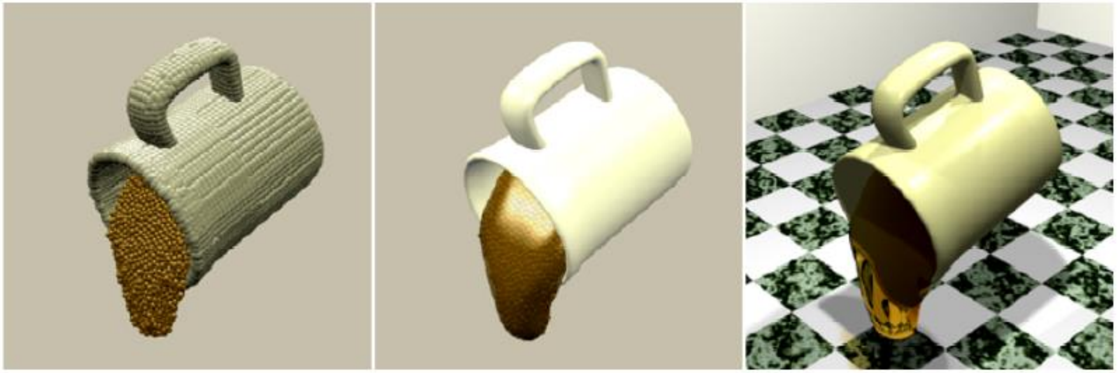
  - Eulera
    – pola wektorowe na siatce
    – np. tzw. „Stable Fluids"

Renderowanie cieczy

- Na dwa sposoby
  - Renderujemy każdą cząstkę oddzielnie
  - Renderujemy powierzchnię otaczająca cząstki





http://www.youtube.com/watch?v=n5lOjME8B6M

http://david.li/fluid/

Inne historyczne prace

- Jim X. Chen
- Nishita
- Dobashi…

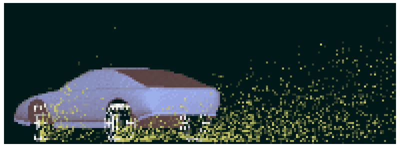
Jim X. Chen (www.cs.gmu.edu/~jchen)

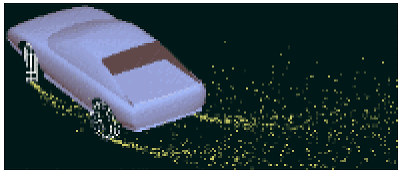
J. X. Chen, Xiaodong Fu, and E. J. Wegman, "Real-Time Simulation of Dust Behaviors Generated by a Fast Traveling Vehicle," ACM Transactions on Modeling and Simulation, Vol. 9, No. 2, April, 2000, pp. 81-104.

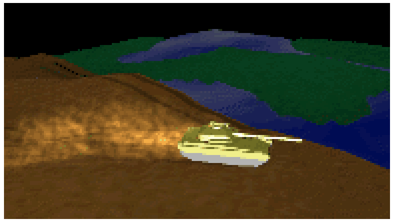
http://www.cs.unc.edu/~lin/COMP259/PAPERS/p81-chen.pdf

Proszę przejrzeć ten artykuł.

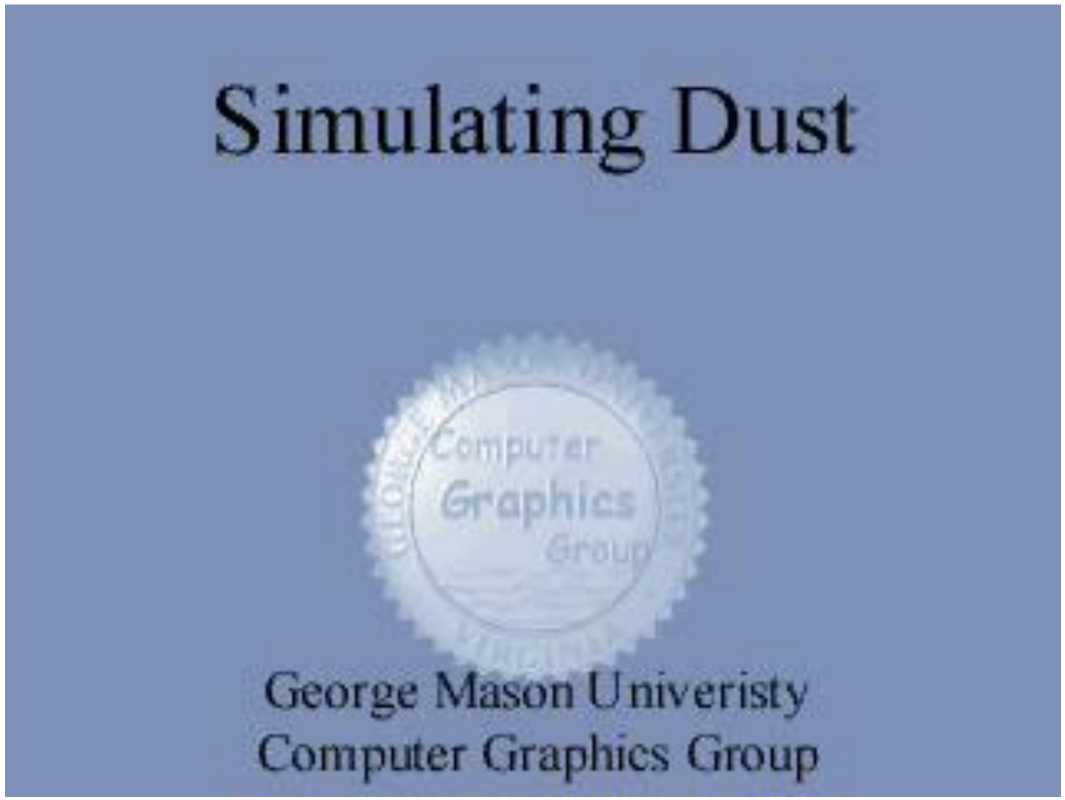
J.X.Chen







Chen cd.


Simulating Dust
Computer
Graphics
Group
George Mason Univeristy
Computer Graphics Group

Prace z przełomu wieków (1997-2002)

Modelowanie śniegu

Norishige Chiba
(www-cg.cis.iwate-u.ac.jp/)

Tomoyuki Nishita, Yoshinori Dobashi

„A Modeling and Rendering Method for Snow by Using Metaballs” Nishita, Iwasaki, Dobashi, Nakamae , Eurographics 1997 (http://nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp/~nis/)

Modeling and Rendering of Various Natural Phenomena Consisting of Particles (CGI'01)
July 03 - 06, 2001 Hong Kong, China

Co możemy zrobić w three.js?

https://gpfault.net/posts/webgl2-particles.txt.html

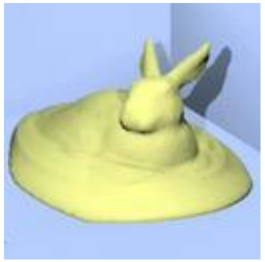
https://turanszkij.wordpress.com/2017/11/07/gpu-based-particle-simulation/

Animating sand as a fluid

- Y. Zhu and R. Bridson, ACM SIGGRAPH 2005

- http://www.cs.ubc.ca/~rbridson/ - na stronie Roberta Brisdona są również inne demonstracje symulacji cząsteczkowych i nie tylko.

Sandbunny



A parallel SPH implementation on multi-core CPU

- Ihmsen, Akinci et al., SIGGRAPH 2011

Versatile Rigid-Fluid Coupling for Incompressible SPH

- Akinci et al., SIGGRAPH 2012

Incompressible_SPH

Animating Bubble Interaction in Liquid Foam

- Busaryev, SIGGRAPH 2012.

Bubbles

https://youtu.be/GPbFp50ZGUE

Position based fluids, Siggraph 2013

- M. Macklin, M. Mueller NVIDIA

Position based Fluids

Reconstructing Surfaces of Particle-Based Fluids Using Anisotropic Kernels

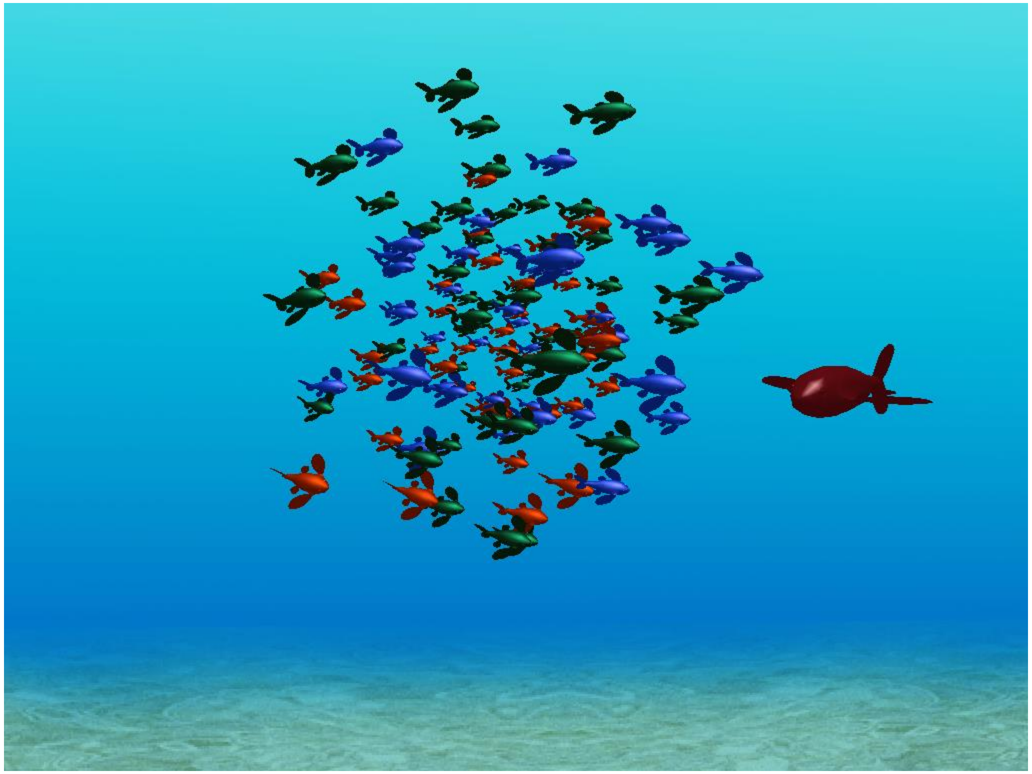
- Yu, Turk, SIGGRAPH 2013

Anisotropic_Kernels

SPH w WebGL

- Three.js raczej mniej użyteczny
- http://dev.miaumiau.cat/sph/
- http://www.yuwang-cg.com/2_0_SPH_WebGL_WebCL/sph_webgl_webcl.html
- https://www.youtube.com/watch?v=2SeXwilxc2s
- https://www.youtube.com/watch?v=YpuZRN3V0cs
- https://docs.google.com/presentation/d/1JbPv11NS7ExcDAGiAbU6cjhfUQzfhptHNNa48eK97oo/edit?pli=1#slide=id.g3324075be_01074

Flocks, Herds, Schools



http://nicksainz.com/boid-simulation

Three.js boids

- Jeden z podstawowych przykładów: http://mrdoob.github.io/three.js/examples/canvas_geometry_birds.html
- Zmodyfikowany np. w taki sposób: http://blog.int3ractive.com/2012/05/fish-boids-threejs-demo.html

Połączone cząstki

- Połączone elastycznie cząstki mogą tworzyć liny, tkaniny…

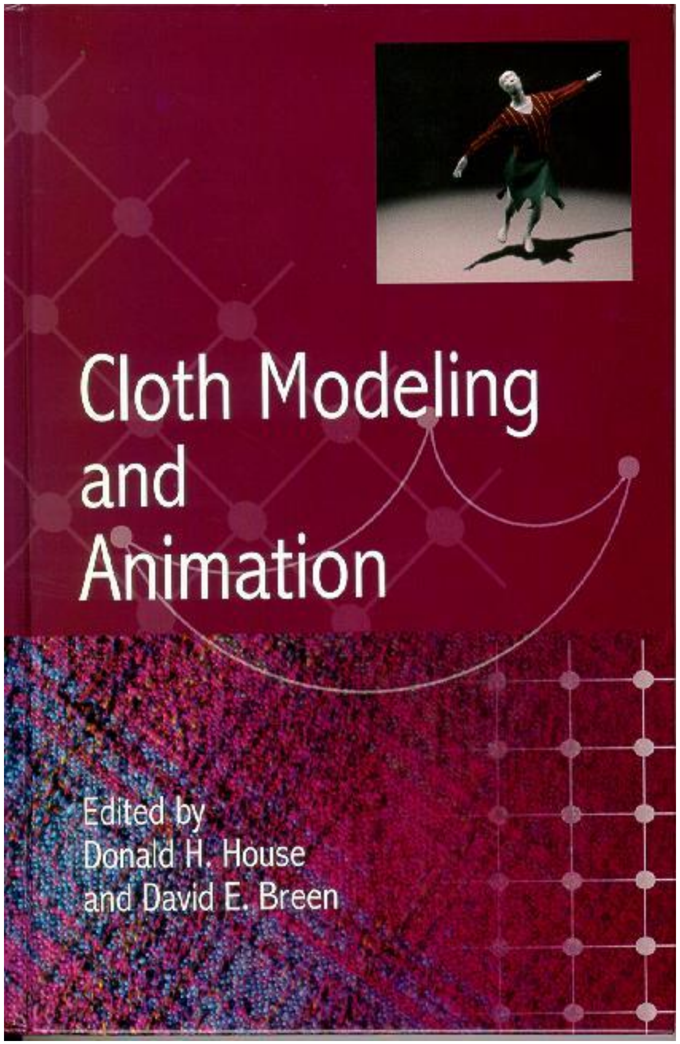
Pierwsze znaczące prace

- D.E. Breen, D.H. House and M.J. Wozny, "Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles," *SIGGRAPH '94 Conference Proceedings*, (Orlando, FL, July 1994) pp. 365-372
- Tematem tej pracy jest otrzymanie statycznej (końcowej) konfiguracji.
  - Modelowanie statyczne.
  - Czy bawełna układa się tak jak jedwab?

Modelowanie statyczne

- Przykład ułożenia tkaniny na obiekcie (Breen, House Wozny, 1994)

Animacja pojawiła się dość szybko



Wydawnictwo: A.K.Peters, Ltd

July 2000

ISBN 1-56881-090-3

Model oparty na cząstkach połączonych sprężynkami

- Włókna i splot

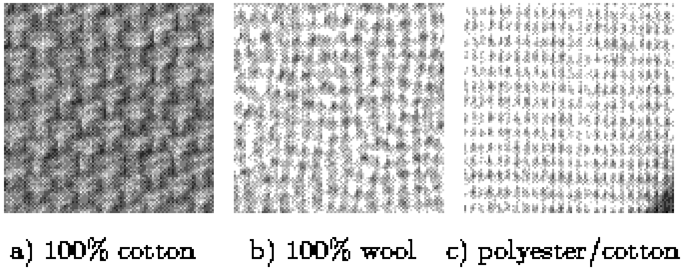
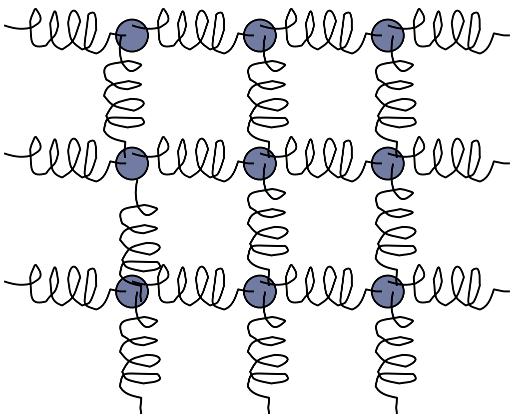


Figure 1.2: Magnified views of 3 samples of woven cloth

- Przybliżenie masami na sprężynkach.

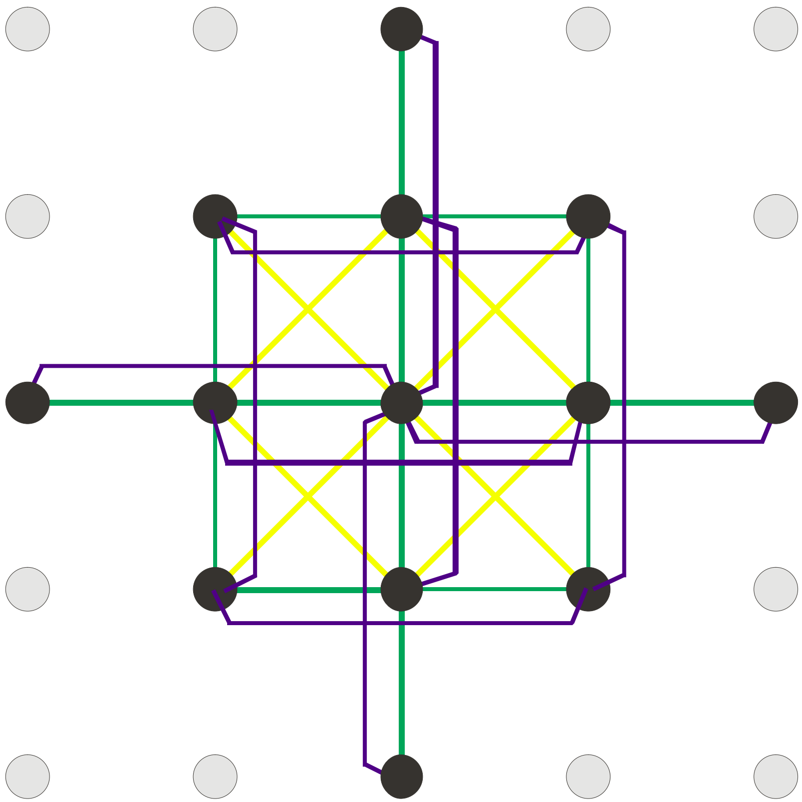


Dynamika tkanin

- Breen zwracał uwagę na stan statyczny
  - Krok czasowy mógł być dowolnie mały
- VR + gry wymagają interakcji.
  - Symulacja w czasie rzeczywistym wymaga dłuższego kroku czasowego (dt >.03 sec)

Xavier Provot

Rodzaje sprężyn w modelu Provota



- Zielone – strukturalne
- Żółte – rozpinające
- Fioletowe – napinające

Model Fizyczny- siły

- Sprężystość

$$\vec{F}_h = K_s\left(\vec{l}_0 - \vec{l}\right), \text{gdzie } K_s = \frac{SE}{l_0}$$

- Tłumienie sprężynek

$$\mathrm{F}_d = \frac{(\Delta\vec{v}\cdot\Delta\vec{x})K_d}{l}$$

- Tłumienie środowiska

$$\vec{\mathrm{F}}_\mathrm{d} = -K_D\vec{v}_i$$

- Grawitacji

$$\vec{\mathrm{F}}_\mathrm{g} = m_i\vec{a}$$

- Wiatru

$$\vec{\mathrm{F}}_\mathrm{w} = K_w(\vec{N}_i\cdot(\vec{v}_w - \vec{v}_i))\vec{N}_i$$

- Wynikające z kolizji
- Wprowadzone przez użytkownika

całkowanie

- Postępowanie
  - Mając dane położenie $x(t_o)$ i prędkość $v(t_o)$ w chwili t_o
    - Znajdujemy nowe położenie $x(t_0+h)$ i nową prędkość $v(t_o+h)$ w chwili t_0+h

Całkowanie bezpośrednie

- Euler

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{v} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}_0 \end{pmatrix}$$

where the force $\mathbf{f}_0$ is defined by $\mathbf{f}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)$

  - rezultat zależy jedynie od warunków w chwili t_0
  - nie patrzy na zmiany pochodnych

Całkowanie bezpośrednie

- Użycie metody Eulera jest niewygodne. Wymaga zdecydowanie małych kroków.
- Możliwe użycie schematu Rungego-Kutty 4 rzędu
  - Gładsze rozwiązanie
    - Ale siła musi być obliczana więcej niż raz w kroku.
  - Trochę bardziej stabilny, ale nie rozwiązuje podstawowych problemów
    - RK4 nie lubi nieciągłości.

Całkowanie bezpośrednie

- Schemat Eulera

$$\mathrm{v}^{n+1} = \mathrm{v}^{n} + \mathrm{F}^{n}\frac{h}{m},$$
$$\mathrm{x}^{n+1} = \mathrm{x}^{n} + \mathrm{v}^{n+1}h$$

- Schemat punktu środkowego

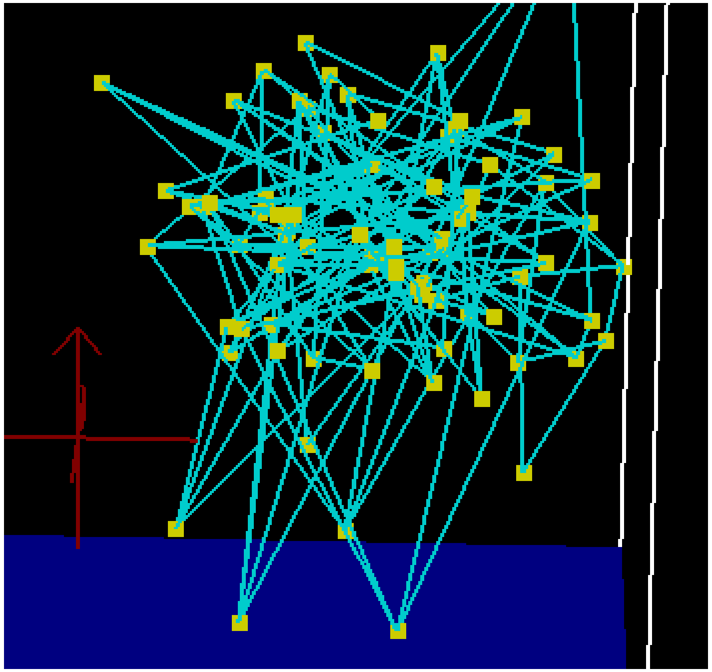
$$\mathrm{v}^{n+1} = \mathrm{v}^{n} + \mathrm{F}^{n+\frac{1}{2}}\frac{h}{m},$$
$$\mathrm{x}^{n+1} = \mathrm{x}^{n} + \mathrm{v}^{n+1}h$$

- Rungego-Kutty 4 rzędu

$$\Delta\mathrm{v}^{n+1} = \frac{\Delta\mathrm{v}^{\mathrm{n}+\frac{1}{2}}}{6} + \frac{\Delta\mathrm{v}^{\mathrm{n}+1}}{3} + \frac{\Delta\mathrm{v}^{\mathrm{n}+2}}{3} + \frac{\Delta\mathrm{v}^{\mathrm{n}+3}}{6},$$
$$\Delta\mathrm{x}^{n+1} = \frac{\Delta\mathrm{x}^{\mathrm{n}+\frac{1}{2}}}{6} + \frac{\Delta\mathrm{x}^{\mathrm{n}+1}}{3} + \frac{\Delta\mathrm{x}^{\mathrm{n}+2}}{3} + \frac{\Delta\mathrm{x}^{\mathrm{n}+3}}{6}$$

Całkowanie bezpośrednie

- Możliwe uboczne efekty w niestabilności: Jeff Lander **www.gamasutra.com/features/20000327/lander_pfv.htm**



Całkowanie pośrednie

Pierwszy raz w modelowaniu tkanin:

David Baraff and Andrew Witkin
„Large Steps in Cloth Simulation"
SIGGRAPH'98, Computer Graphics Proceedings
(Orlando, FL, July 1998) pp. 43-54

https://www.cs.cmu.edu/~baraff/papers/sig98.pdf

Baraff/Witkin

Całkowanie pośrednie

- Metoda pośrednia Eulera („backward" Euler)

$$\begin{pmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\mathbf{v} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 + \Delta\mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}(\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{v}_0 + \Delta\mathbf{v}) \end{pmatrix}$$

- Przypomnijmy – w całkowaniu bezpośrednim mamy:

$$\begin{pmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\mathbf{v} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}_0 \end{pmatrix}$$

Metoda pośrednia a bezpośrednia

W metodzie bezpośredniej wystarczy wyliczyć **f** na podstawie bieżących położeń.

W metodzie pośredniej trzeba rozwiązać układ równań, żeby znaleźć $\mathbf{\Delta x}$ i $\mathbf{\Delta v}$.

Równania są generalnie nieliniowe, więc dla uproszczenia obliczeń zwykle dokonujemy linearyzacji.

Backward Euler

- Musimy obliczyć f (x_0+dx, v_0+dv)
  - Stosujemy przybliżenie pierwszego rzędu

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{v}_0 + \Delta\mathbf{v}) = \mathbf{f}_0 + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\Delta\mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}}\Delta\mathbf{v}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\mathbf{v} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 + \Delta\mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}\left(\mathbf{f}_0 + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\Delta\mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}}\Delta\mathbf{v}\right) \end{pmatrix}$$

Backward Euler

- Grupując wszystkie Δv otrzymujemy
- $\Delta\mathbf{v} = \left(\mathbf{I} - h\mathbf{M}^{-1}\frac{\partial\mathbf{f}}{\partial\mathbf{v}} - h^2\mathbf{M}^{-1}\frac{\partial\mathbf{f}}{\partial\mathbf{x}}\right)\Delta\mathbf{v} = h\mathbf{M}^{-1}\left(\mathbf{f}_0 + h\frac{\partial\mathbf{f}}{\partial\mathbf{x}}\mathbf{v}_0\right)$
- Rozwiązujemy dla Δv i Δx

Przykłady modelowania tkanin w three.js

- http://threejs.org/examples/webgl_animation_cloth.html
- https://www.chromeexperiments.com/experiment/curtain-me