

Jakub DOMARADZKI, Krzysztof CHABKO, Tomasz MARTYNPOLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT INFORMATYKI,
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa**Symulowanie topnienia lodu z wykorzystaniem procesorów graficznych****Mgr inż. Jakub DOMARADZKI**

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Obecnie jest słuchaczem studiów doktoranckich w Instytucie Informatyki na tym Wydziale. Interesuje się grafiką komputerową, programowaniem GPGPU oraz zagadnieniami związanymi z symulacją zjawisk naturalnych.



e-mail: J.Domaradzki@stud.elka.pw.edu.pl

Mgr inż. Krzysztof CHABKO

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako wykładowca w Instytucie Informatyki na tym Wydziale. Interesuje się grafiką komputerową, cyfrowym przetwarzaniem obrazu oraz zagadnieniami związanymi z techniką multimedialną.



e-mail: K.Chabko@ii.pw.edu.pl

Dr hab. inż. Tomasz MARTYN

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Od 1999 r. pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Informatyki na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Interesuje się grafiką komputerową, geometrią fraktalną oraz zagadnieniami dotyczącymi wytwarzania gier komputerowych.



e-mail: T.Martyn@ii.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę symulowania topnienia obiektów zbudowanych z lodu, implementowaną przy wykorzystaniu możliwości obliczeniowych nowoczesnych procesorów graficznych (GPU). Proces topnienia zrealizowano jako rezultat wymiany ciepła pomiędzy obiektami lodowymi i płynami (woda i powietrze), modelowanymi jako zbiory ruchomych cząstek o określonych parametrach fizycznych. Do obliczenia ruchu cząstek wykorzystano wariant algorytmu SPH. Zaprezentowano nowy cząstkowy model powietrza, który pozwala m.in. na uwzględnienie w symulacji lokalnych zmian temperatury powietrza w czasie. Otrzymane wyniki symulacji są bardziej realistyczne z punktu widzenia poprawności fizycznej i końcowego efektu wizualnego, aniżeli rezultaty otrzymywane przy użyciu metod poprzednich.

Słowa kluczowe: Symulacja, Topnienie lodu, Cząstki, SPH, GPGPU.

Simulation of ice melting on GPUs**Abstract**

The paper presents a fast GPU-based approach to simulation of melting ice objects at interactive frame rates. Our main contribution is a new particle-based model of air which allows one to take into account in simulation the effects of local changes in the air temperature. The process of melting is realized as heat transfer between ice and fluids (water and air), which are represented by means of sets of movable particles (Fig. 2). To convert the triangle-mesh representation of solids into particles, we use a GPU-based voxelization method [4]. Each particle carries some physical local properties of fluid, and their evolution over time is described by the Navier-Stokes equation for incompressible fluids. In order to solve the equation, we utilize a modified version of *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) method [6]. Then, triangle meshes of solids are extracted from the particle representation using *marching cubes* algorithm, and visualized via ray tracing. Thanks to the new model of air, the results of ice melting supplied by our method (Fig. 3) are more realistic from the standpoint of physical correctness as well as visual appearance than those obtained with the previous approaches.

Keywords: Simulation, Ice melting, Particles, SPH, GPGPU.

1. Wprowadzenie

Symulowanie zachowania obiektów naturalnych znajduje zastosowanie nie tylko w nauce (symulacje fizyczne), ale także

w przemyśle rozrywkowym (filmy, gry komputerowe). Jednakże zwykle trudno jest otrzymać pożądany rezultat symulowania interakcji wspomnianych obiektów z określonym otoczeniem; rezultat, który byłby poprawny z punktu widzenia praw rządzących fizyką zjawiska i jednocześnie atrakcyjny pod względem wizualnym.

W artykule przedstawiono metodę symulowania interakcji obiektów lodowych z wodą i powietrzem. W wyniku transferu ciepła pomiędzy lodem i powietrzem zachodzi zjawisko topnienia lodu i zmiana jego stanu skupienia w wodę. Powstała ciecz zaczyna spływać po powierzchni lodu i tworzyć krople przed oddzieleniem się od obiektu. Dodatkowo obiekt lodowy może zostać wprawiony w ruch pod wpływem grawitacji lub w wyniku kolizji z innym obiektem. Interakcja lodu z wodą uwzględnia także sytuację, w której obiekt lodowy znajduje się w cieczy.

Powszechnie wykorzystywane metody symulowania topnienia lodu można podzielić na dwie kategorie: metody bazujące na równomiernej siatce wokseli oraz metody wykorzystujące cząstki.

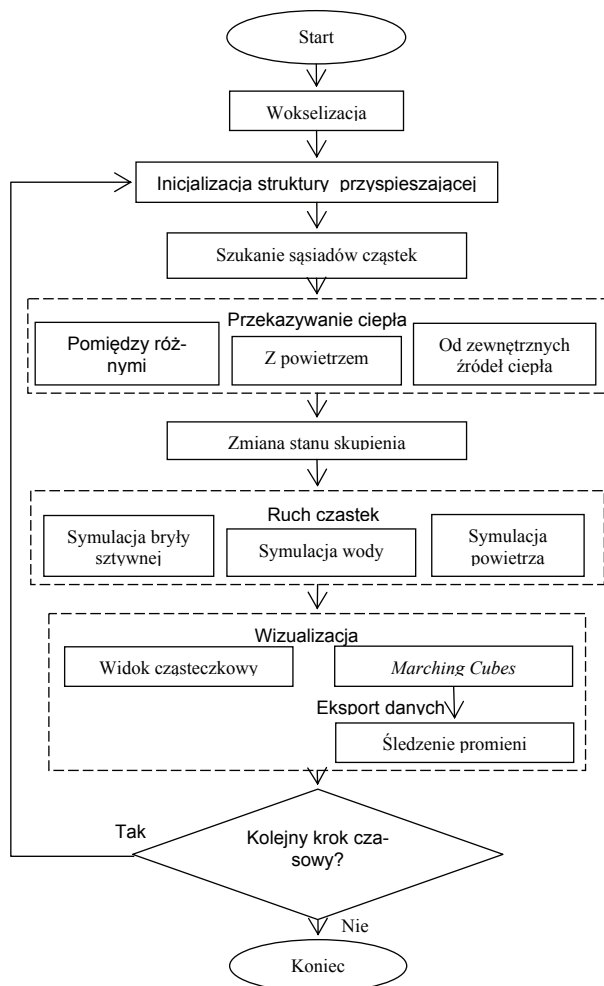
Metody wokselse otaczają modelowany układ fizyczny statyczną siatką, dyskretyzującą przestrzeń do komórek. Każda komórka przechowuje lokalne wartości parametrów fizycznych układu, zaś wszelkie obliczenia (np. transfer ciepła) wykonywane są pomiędzy komórkami sąsiadującymi [1]. Wady tego podejścia to: słabe odwzorowanie detali i skłonność do zmniejszenia objętości obiektu symulacji.

U podłoża działania metod należących do drugiej z wymienionych kategorii leży dyskretyzacja obiektów biorących udział w symulacji do postaci cząstek [2]. Z punktu widzenia schematu obliczeniowego, cząstki wykorzystywane są podobnie jak komórki siatki. Niemniej jednak, w odróżnieniu od wokseli, cząstki mogą się przemieszczać, umożliwiając tym samym modelowanie „drobnych” aspektów zjawiska (takich jak np. krople wody) przy zwykle mniejszym nakładzie obliczeniowym i pamięciowym aniżeli wymagałby tego w tym celu metody siatkowe.

Mając na uwadze zalety podejścia cząstkowego, w niniejszej pracy postanowiono oprócz proces symulacji na reprezentacji cząstkowej obiektów. W odróżnieniu od wcześniejszych rozwiązań bazujących na cząstkach, w których wymianę ciepła pomiędzy lodem a otaczającym go ośrodkiem płynnym (np. powietrzem) modelowano co najwyżej przy wykorzystaniu pewnych funkcji heurystycznych [3], proponujemy nowe podejście do uwzględnienia wpływu powietrza. W podejściu tym, powietrze, podobnie jak pozostałe obiekty biorące udział w symulacji, reprezentowane jest przy użyciu cząstek. Zastosowanie takiego rozwiązania wpływa na udoskonalenie znanych metod symulowania topnienia lodu pod względem odwzorowania fizyki tego zjawiska w modelu symulacyjnym, w szczególności pozwala na uwzględnienie lokalnych zmian temperatury powietrza w czasie symulacji. W rezultacie, wyniki symulacji charakteryzują się większym realizmem, zarówno pod względem wizualnym jak i poprawności fizycznej, aniżeli te otrzymywane przy użyciu metod poprzednich. Co więcej, dzięki wykorzystaniu do obliczeń programowanych kart graficznych symulacja dokonywana jest w czasie interaktywnym.

2. Proponowana metoda

Do modelowania wszystkich obiektów sceny wykorzystano reprezentację objętościową wykorzystującą cząstki. W fazie poprzedzającej symulację, do dokonania konwersji modeli wejściowych z reprezentacji brzegowej (siatki trójkątów) do opisu cząstkowego, zastosowano technikę wkszelizacji [4]. Na obiekt nakładana jest równomierna siatka komórek. W miejscu komórek, które znajdują się wewnątrz obiektu, tworzone są cząstki o geometrii sfery, po czym siatka jest usuwana.



Rys. 1. Schemat blokowy symulatora topnienia obiektów lodowych
Fig. 1. Flowchart of the ice-melting simulator

Dalsze operacje wykonywane są już na cząstkach, których jest zwykle bardzo dużo. W związku z tym, krytyczny pod względem wydajności działania programu jest wybór struktury przyspieszającej. Mając na uwadze wykorzystanie procesorów graficznych (GPU) do obliczeń oraz preferowany lokalny obszar przeszukiwania (wyszukiwanie sąsiedztwa cząstek), zastosowano trójwymiarową tablicę, w których przechowywane są indeksy cząstek na podstawie ich aktualnej pozycji [5].

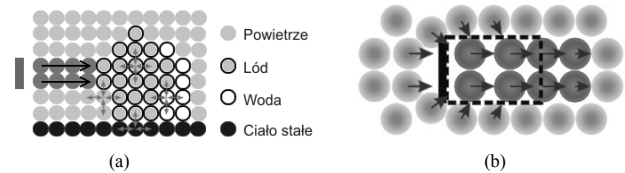
Na rys. 1 przedstawiono ogólny schemat blokowy opisanego dalej procesu symulacji i wizualizacji topnienia lodu.

Proces przekazywania ciepła pomiędzy lodem, wodą i powietrzem (rys. 2a) sprowadza się do wymiany ciepła pomiędzy cząstkami zgodnie ze wzorem

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha \sum_{j \in N_i} m_j \frac{T_j - T_i}{\rho_j} \nabla^2 W(r_{ij}, h), \quad (1)$$

gdzie: T_i – temperatura i -tej cząstki w czasie t , r_{ij} – odległość pomiędzy cząstką i a sąsiednią cząstką j , N_i – zbiór cząstek o odległości

mniejszej niż h od cząstki i , W – funkcja wygładzania [6], m_j – masa cząstki j , ρ_j – aktualna gęstość cząstki j , α – współczynnik dyfuzyjności termicznej.



Rys. 2. Przekazywanie ciepła pomiędzy różnymi ośrodkami (a); zblizenie na zewnętrzne źródło ciepła (b)

Fig. 2. Heat transfer between solid objects and fluids (a); close-up of an external heat source (b)

Dodatkową energię do układu można dostarczyć za pomocą zewnętrznego źródła ciepła [7] (rys. 2b). Składa się ono z emitera, który oddziałuje na pewien ustalony obszar, podnosząc temperaturę cząstek powietrza i rozpędzając je. Następnie ocieplone powietrze przemieszcza się w kierunku obiektu lodowego i oddaje mu część „niesionego” przez nie ciepła.

W celu symulowania ruchu cząstek wody i powietrza zastosowano modyfikację algorytmu SPH [6]. Algorytm ten rozwiązuje równanie Naviera-Stokesa dla płynów nieściśliwych i jest popularną metodą wykorzystywaną w symulacjach numerycznych. W opisie płynu uwzględniane są następujące siły: ciśnienia, lepkości oraz siły zewnętrzne (np. grawitacja).

Siła ciśnienia oddziałująca na i -tą cząstkę liczona jest przy wykorzystaniu równania

$$f_i^{pressure} = - \sum_{j \in N_i} \frac{p_i + p_j}{2} \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W(r_{ij}, h), \quad (2)$$

w którym p_i oznaczają bieżące ciśnienia cząstek i obliczane są jako $p_i = (\rho_i - \rho_0)k$, gdzie: ρ_i – bieżąca gęstość i -tej cząstki, ρ_0 – gęstość spoczynkowa płynu, h – stała sztywności płynu, k – stała gazowa.

W związku z występowaniem w symulacji dwóch płynów o różnych lepkościach (powietrze i woda) należy zmodyfikować, stosowane w SPH, równanie siły lepkości [6]. W niniejszej pracy siła lepkości oddziałująca na i -tą cząstkę liczona jest jako:

$$f_i^{viscosity} = \sum_{j \in N_i} \frac{\mu_i + \mu_j}{2} m_j \frac{u_{ji}}{\rho_i} \nabla^2 W(r_{ij}, h), \quad (3)$$

gdzie μ_i – współczynnik lepkości i -tej cząstki (stały w czasie i zależny od rodzaju płynu, który reprezentuje cząstka), u_{ji} – różnica prędkości cząstek i i j .

Ponadto, różnica gęstości pomiędzy powietrzem a pozostałymi ośrodkami (wodą i lodem) jest duża. Algorytm SPH niezbyt dobrze radzi sobie w takiej sytuacji – może to prowadzić do utraty stabilności symulacji. Możliwy sposób rozwiązania tego problemu polega na zredukowaniu różnicy gęstości poprzez zwiększenie masy cząstek reprezentujących powietrze. Dodatkowo, aby uwzględnić sytuację znajdowania się cząstek na granicy ośrodków, zmodyfikowano wzór obliczania wartości aktualnego ciśnienia dla tych cząstek do postaci:

$$p = \max((\rho - \rho_0), 0)k, \quad (4)$$

gdzie ρ_0 oznacza gęstość spoczynkową powietrza. Modyfikacja ta ma na celu usunięcie czynnika powodującego przyciąganie się cząstek na granicy ośrodków [7].

Implementacja powietrza za pomocą zbioru cząstek umożliwiła uwzględnienie dodatkowych efektów, takich jak np. przemieszczanie się cząstek powietrza pod wpływem temperatury. Proces ten uzyskiwany jest poprzez wpływanie na gęstość spoczynkową cząstki powietrza w zależności od jej temperatury:

$$\rho_0(T, \theta) = \frac{\rho_0}{1 + T \cdot \theta}, \quad (5)$$

gdzie: $\rho_0(T, \theta)$ – obliczona wartość aktualnej gęstości spoczynkowej powietrza przypisana indywidualnie do każdej cząstki powietrza, ρ_0 – gęstość spoczynkowa przypisana do cząstek powietrza dla temperatury wynoszącej zero stopni Celsjusza, T – aktualna temperatura dla danej cząstki powietrza wyrażona w Celsjuszach, θ – parametr służący do sterowania intensywnością zmiany nowej wartości gęstości spoczynkowej.

Ruch cząstek powietrza pod wpływem temperatury może zostać dodatkowo wzmocniony poprzez dodanie do symulacji sztucznej siły zewnętrznej (obliczanej indywidualnie dla każdej cząstki powietrza), która przeciwstawia się sile grawitacji:

$$F_b = \frac{\sigma}{T_{max} - T_i}, \quad (6)$$

gdzie: σ – współczynnik służący do sterowania wartością nowej siły, T_{max} – maksymalna dodatnia temperatura uwzględniana w programie, T_i – aktualna temperatura i -tej cząstki powietrza wyrażona w Celsjuszach.

W procesie symulacji uwzględniony został także ruch bryły sztywnej, jaką jest obiekt lodowy. Metody wykorzystane w tym celu operują na cząstkach należących do tych obiektów, biorąc pod uwagę siły wynikające z kolizji (przenikanie się cząstek), siły zewnętrzne (grawitacja) i pochodzące od cząstek wody i powietrza (w tym przypadku cząstki obiektu traktowane są jak cząstki płynu) [8]. Całkowita siła działająca na obiekt lodowy jest sumą wszystkich sił działających na jego cząstki.

Rezultaty poszczególnych kroków symulacji są następnie wizualizowane. W niniejszej pracy do wizualizacji realistycznej zastosowano metodę śledzenia promieni. Dane do programu dostarczane są w postaci siatek trójkątów, które są otrzymywane na podstawie reprezentacji cząstkowej poprzez zastosowanie algorytmu *marching cubes*.

3. Implementacja

W celu wykorzystania możliwości obliczeniowych współczesnych kart graficznych, jako środowisko programistyczne wykorzystano język C++ wraz z frameworkiem OpenCL w wersji 1.2. Wybór ten jest uzasadniony dobrą skalowalnością i poziomem rozproszenia implementowanych algorytmów.

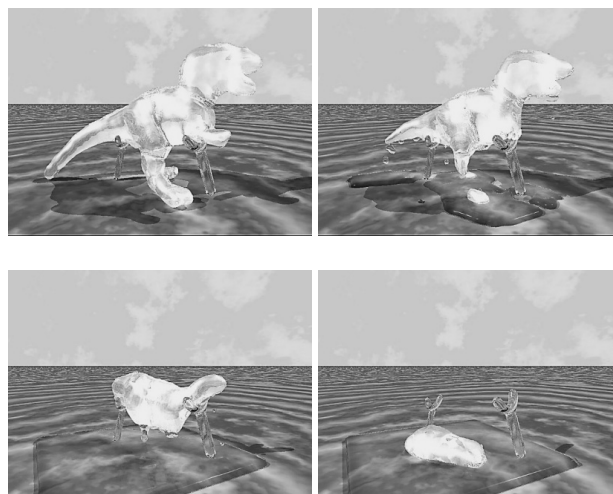
Choć w symulacji biorą udział setki tysięcy cząstek, to jednak każda z cząstek przetwarzana jest tym samym jądrem programowym. Model obliczeń jest więc zgodny z modelem obliczeniowym SIMT i fakt ten pozwala wykorzystać moc obliczeniową GPU, poprzez przypisanie każdej cząstce jednego wątku. Duża liczba operacji arytmetycznych, rzadkie rozgałęzienia w strumieniu instrukcji i na ogół ciągły układ danych w pamięci, pozwalają uzyskać przyspieszenie od kilku do nawet kilkudziesięciu rzędów w stosunku do wersji sekwencyjnej. Ponadto dane wejściowe do programu wysyłane są tylko raz, w związku z czym nie występuje tutaj problem narzutu czasowego, powodowanego kosztownym transferem danych z CPU do GPU.

4. Wyniki

Na rys. 3 przedstawiono kolejne klatki przykładowej animacji topnienia lodowego dinozaura pod wpływem otaczającego ciepłego powietrza. Rzeźba umieszczona jest na dwóch podpórkach, których temperatura wynosi zero stopni Celsjusza. Można zauważyć, że w pierwszej kolejności topnieniu ulegają cienkie fragmenty rzeźby (m.in. ręce, nogi, ogon). W wyniku całkowitego stopienia się rąk, rzeźba traci stabilność i ześlizguje się po jednej z podpórek. Przed upadkiem na ziemię powstrzymują ją jeszcze resztki ogona i szyja. Gdy ostatnie wystające elementy zamieniają się w wodę, obiekt opada na ziemię. W symulacji brało udział blisko 260 tysięcy cząstek, które były przetwarzane w interaktywnym czasie 10 ramek na sekundę, przy wykorzystaniu komputera przenośnego wyposażonego w przeciętną kartę graficzną Radeon 6770M.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono w sposób całościowy metodę topnienia obiektów lodowych. Omówione zostały kolejne kroki metody symulacji topnienia obiektów trójwymiarowych, podawanych na wejście aplikacji w postaci siatek trójkątów. Szczegółowo opisano nowy model powietrza, które jest reprezentowane, odmiennie niż w poprzednich metodach, w sposób jawny przy wykorzystaniu reprezentacji cząstkowej. W modelu tym zostały uwzględnione zjawiska i efekty, takie jak wymiana obszarów powietrza ze względu na lokalne różnice temperatury cząstek, czy wprowadzenie dodatkowej energii do układu, poprzez zastosowanie zewnętrznego źródła ciepła. Omówione zostały także korzyści wynikające z użycia GPU do przeprowadzenia obliczeń. Otrzymane wyniki symulacji charakteryzują się wysokim stopniem realizmu i świadczą o trafności zastosowania zaproponowanego modelu powietrza i reprezentacji cząstkowej w zagadnieniu symulacji topnienia obiektów lodowych.



Rys. 3. Topnienie lodowego dinozaura pod wpływem ciepłego otaczającego powietrza
Fig. 3. Melting an ice dinosaur under the influence of the heated air

6. Literatura

- [1] Tsuruno R., M. Matsumura: Visual Simulation of melting ice considering the natural convection. SIGGRAPH 05: ACM SIGGRAPH 2005 Sketches (2005), s. 61, 2005.
- [2] Paiva A., Petronetto F., Lewiner T., Tavares G.: Particle-based non-newtonian fluid animation for melting. Sibgrapi (2006), s. 78-85, 2006.
- [3] Iwasaki K., Uchida H., Dobashi Y., Nishita T.: Fast Particle-based Visual Simulation of Ice Melting. Pacific Graphics, vol. 29, 2010.
- [4] Schwarz M., Seidel H. P.: Fast Parallel Surface and Solid Voxelization on GPUs, ACM, 2010.
- [5] Green S.: Particle Simulation using CUDA [online]. NVidia Corporation, 2010.
- [6] Muller M., Charypar D., Gross M.: Particle-based fluid simulation for interactive applications. Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, s. 154-159, 2003.
- [7] Domaradzki J.: Modelowanie zjawiska topnienia lodu z wykorzystaniem modelu cząsteczkowego. Praca magisterska, Politechnika Warszawska, Instytut Informatyki, 2014.
- [8] Tanaka M., Sakaki M., Koshizuka S.: Particle-based rigid body simulation and coupling with fluid simulation. Transactions of Japan Society for Computational Engineering and Science, Paper No. 20070007, 2007.

otrzymano / received: 09.04.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.06.2014

artykuł recenzowany / revised paper