

MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH CHUYỂN ĐỘNG VÀ PHÂN TÁCH CỦA MÀNG DẦU TRÊN BIỂN DỰA TRÊN THUẬT TOÁN PHÂN CHIA ĐIỂM POISSON BASED ON THE POISSON DISTRIBUTION ALGORITHM TO SIMULATE THE TRANSPORTATION AND DISPERSION OF THE OIL FILM AT SEA

ĐỖ VĂN CƯỜNG*, TRẦN GIA NINH, NGUYỄN LÊ KIM PHÚC

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: dovancuong@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Mô phỏng chất lỏng là một nhiệm vụ khó khăn và phức tạp trong đồ họa máy tính. Đặc biệt khi có sự cố tràn dầu trên biển, màng dầu liên tục thay đổi vị trí và tính chất dưới tác động của môi trường. Trong bài báo này tác giả sử dụng mô hình lan rộng và trôi dạt dựa trên các công thức thực nghiệm để xây dựng mô hình toán học chuyển động của màng dầu trên biển. Ở giai đoạn tiếp theo, màng dầu phân thành các hạt chất lỏng dựa trên thuật toán phân chia điểm Poisson được lập trình song song đa luồng trên GPU để tăng tốc độ và đảm bảo thời gian thực. Đây là một ứng dụng hoàn toàn mới của thuật toán phân chia điểm Poisson cho mô phỏng màng dầu trên biển. Quá trình phân tách được thực hiện dưới tác động của sóng, gió và dòng chảy bằng phần mềm Unity với ngôn ngữ lập trình C#, đồng thời mô phỏng một cách sinh động và chân thực màng dầu tương tác với các đảo nhỏ. Kết quả của nghiên cứu có thể được sử dụng để dự đoán hướng dầu tràn, từ đó đưa ra giải pháp ứng phó và giảm thiểu thiệt hại do tràn dầu trên biển.

Từ khóa: Mô phỏng chất lỏng, Unity, thuật toán phân chia điểm Poisson.

Abstract

One of the most challenges in computer graphic is fluid simulation. Especially, when simulate oil spill at sea, because oil continuous changes its position and characteristic under the effect of environment. The authors used empirical formulas to construct the mathematical model of spread and drift model of the oil film at sea. In the next stage, we divided the oil film into thousands of particles by Poisson distribution algorithm which is parallel implemented in GPU and satisfy the real-time factor. This is the novelty of our research in the field of oil spill simulation. We simulate the dispersion process and oil particles

collide with island in vividly and realistically way by Unity with C# language. Our program can be used to predict the direction, respond and minimize damage caused by oil spills at sea.

Keywords: Fluid simulation, Unity, Poisson distribution algorithm.

1. Giới thiệu

Tác hại của một vụ tràn dầu đối với môi trường là vô cùng lớn, ảnh hưởng tới các loài sinh vật, du lịch, nuôi trồng thủy hải sản, ... Khắc phục hậu quả tràn dầu cũng rất tốn kém. Để giảm thiểu chi phí và ngăn ngừa thiệt hại, phương án xây dựng chương trình mô phỏng để huấn luyện các tình huống giả định nhằm nâng cao khả năng ứng phó khi có sự cố tràn dầu thật xảy ra cũng rất hiệu quả. Tuy nhiên để mô phỏng chân thực và sinh động các đặc tính của dầu - một dạng của chất lưu là một vấn đề rất khó khăn và phức tạp trong lĩnh vực đồ họa máy tính. Càng mô phỏng chi tiết các đặc tính thì khối lượng tính toán tăng lên, yêu cầu cấu hình phần cứng cao, làm chậm tốc độ của chương trình, và ngược lại.

Về cơ bản, có hai phương pháp để mô hình hóa vệt dầu loang: Phương pháp Eulerian và phương pháp Lagrangian. Phương pháp Eulerian dựa trên các phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng, hoặc phương trình đối lưu - khuếch tán, trong đó phần khuếch tán biểu thị sự lan truyền của dầu và đối lưu biểu thị cho sự dịch chuyển theo dòng chảy và gió. Trong phương pháp Lagrangian, màng dầu được đặc trưng bởi sự kết dính của nhiều hạt chuyển động dựa trên các yếu tố hải dương học. Phần lớn các mô hình tràn dầu hiện nay đều sử dụng phương pháp Lagrangian vì đã được chứng minh là phù hợp để mô phỏng các tình huống thực tế, đơn giản, hiệu quả và cần ít dữ liệu tính toán hơn so với mô hình Eulerian.

Đã có rất nhiều nghiên cứu mô phỏng tràn dầu trong nước và trên thế giới. Trần Anh Tú [1] sử dụng mô hình DELFT 3D để mô phỏng sự cố tràn dầu tại đảo Côn Cỏ, đây là mô hình đã được xây dựng sẵn nên người sử dụng sẽ phải cài đặt các thông số đầu vào như dữ liệu địa hình, mực nước và gió. Nguyễn Hữu

Nhân [2] trong nghiên cứu của mình đã xây dựng được chương trình dự báo tràn dầu OILSAS cho khu vực Vân Phong - Khánh Hòa, đây không phải là phần mềm thương mại hóa, tuy nhiên cũng chỉ dừng lại ở chế độ 2D và lấy dữ liệu GIS. Võ Văn Anh Pha [3] đã tích hợp mô hình lan truyền dầu vào bản đồ số 3D cho khu vực bán đảo Cà Mau, tuy nhiên đây là mô hình một chiều và bản đồ được xây dựng không chi tiết nên chưa thành công trong thể hiện địa hình các nhánh sông ở khu vực nghiên cứu. Trên thế giới đã có những mô hình dự báo tràn dầu 2D và 3D như OILMAP, MIKE 21, GULKSLIK, OSCAR hay các mô hình PISCES I, II, III của TRANSAS [4]. Đây là những mô hình có thiết kế giao diện đẹp nhưng lại là các phần mềm thương mại, người sử dụng phải trả một chi phí lớn để mua, bản đồ địa hình và hải đồ được xây dựng bởi nước ngoài nên khó đạt được độ chính xác cao khi áp dụng dự báo tràn dầu trong nước. Ngoài ra, người sử dụng cũng khó có thể can thiệp vào các chương trình tính toán của hệ thống. Trong nghiên cứu này, tác giả sẽ xây dựng mô hình mô phỏng vệt dầu loang trên biển dưới dạng 3D bằng phần mềm Unity. Mô hình cho phép hình dung sự cố tràn dầu trong môi trường 3D rất sống động và chân thực, hơn nữa tác giả cũng áp dụng thuật toán phân chia điểm Poisson vào mô phỏng hạt dầu và quá trình phân tách của màng dầu trên biển, đây là một ứng dụng mới trong mô phỏng tràn dầu trong nước và trên thế giới hiện nay.

2. Quá trình lan truyền cơ học của màng dầu

Trong mô hình, tác giả coi màng dầu là tập hợp rời rạc của các hạt dầu. Các hạt này có khả năng tương tác lẫn nhau và có những đặc tính vật lý riêng như độ nhớt, trọng lực, lực ma sát giữa các hạt và nước biển.

2.1. Mô hình toán học quá trình giãn nở

Sau khi tràn ra biển, quá trình giãn nở về mặt thể tích và diện tích sẽ diễn ra đầu tiên. Bằng nhiều thử nghiệm thực tế và trong phòng thí nghiệm, Lehr [5] đã chứng minh được rằng hình dạng màng dầu gần giống với hình Elip với trục chính có xu hướng theo hướng gió. Giả sử các hạt không tương tác với nhau khi khoảng cách lớn hơn r_0 , trong đó r_0 là kích thước hạt đặc trưng tỷ lệ với \sqrt{S} . Khi đó lực tương tác giữa các hạt với nhau được xác định bởi công thức sau:

$$\vec{F}_{int} = g_1(K_1, K_1, r_0) \left(\frac{r_0}{|\vec{r}|} \right)^q \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (1)$$

Trong đó: $|\vec{r}|$ là khoảng cách tâm hai hạt, K_j ($j = 1 \dots n$) và g_k ($k = 1, 2, 3$) là các hệ số và hàm tương ứng.

Khi di chuyển, các hạt còn chịu lực ma sát với nước biển được tính bởi công thức sau:

$$\vec{F}_{C_D} = -g_2(K_3, K_4, m_p) m_p \vec{V}_{spread} \quad (2)$$

trong đó, m_p là khối lượng hạt, V_{spread} là tốc độ giãn nở.

Áp dụng định luật 2 Newton để xác định tốc độ giãn nở của màng dầu như sau:

$$m_p \frac{d}{dt} \vec{V}_{spread} = \vec{F}_{C_D} + \sum_{i=1}^{N_{int}} \vec{F}_{int}^i \quad (3)$$

Trong đó: N_{int} là số lượng hạt dầu mô phỏng.

Theo Lehr [5], diện tích giãn nở của màng dầu A theo thời gian được tính bởi công thức:

$$A = (\pi / 4) QR \quad (4)$$

Dựa vào các công thức thực nghiệm, Lehr đã tính được giá trị của bán trục chính và bán trục phụ của Elip. Khi đó (4) được viết lại như sau:

$$A = 2270 \left[\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right]^{\frac{2}{3}} V^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} + 40 \left[\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{3}} V^{\frac{1}{3}} W^{\frac{4}{3}} t \quad (5)$$

$$A_{max} = 10^5 V^{\frac{3}{4}} \quad (6)$$

với, A là diện tích màng dầu; A_{max} là diện tích tối đa; V là thể tích dầu tràn; W là tốc độ gió; t là thời gian; ρ_0 là khối lượng riêng của dầu; $\Delta\rho$ là biến thiên khối lượng riêng dầu-nước; Q là bán trục phụ; R là bán trục chính.

2.2. Mô hình toán học quá trình trôi dạt

Ngoài quá trình tự giãn nở, khi dầu tràn ra biển còn xảy ra quá trình trôi dạt. Bằng các nghiên cứu thực nghiệm M.Fingas [6] đã chứng minh được rằng, đối với các vụ tràn dầu ở khu vực ven bờ với tốc độ gió không quá 10 km/h thì tác động của gió và dòng chảy lần lượt khoảng 3 % và 100 % tới vận tốc trôi dạt của màng dầu. Do vậy quá trình di chuyển của màng dầu là hoàn toàn ngẫu nhiên. Lúc này sự dịch chuyển của màng dầu được tính toán dựa trên phương trình di chuyển ngẫu nhiên của các hạt dầu. Tốc độ di chuyển của hạt dầu thứ i bất kỳ được xác định bởi đạo hàm của trục X theo thời gian t :

$$\frac{dX_i}{dt} = V_{drift}(x_i, y_i, t) + V_{diff}(x_i, y_i, t) \quad (7)$$

với, $X_i(x_i, y_i)$ là vị trí của hạt thứ i ; V_{diff} là tốc độ phân tán; t là thời gian (s).

$$V_{drift}(x_i, y_i) = a_w V_w(x_i, y_i) + a_c V_c(x_i, y_i) \quad (8)$$

với, V_w là tốc độ gió tại 10m trên mặt nước biển; V_c là tốc độ dòng chảy; $a_w = 0.03$ là hệ số gió; $a_c = 1.0$ là hệ số dòng chảy.

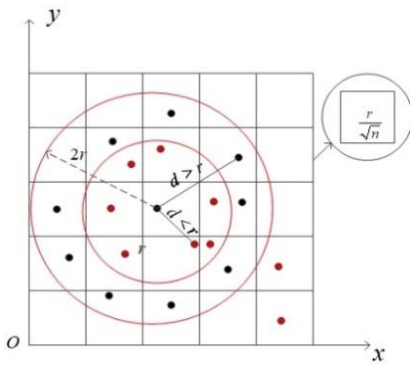
$$V_{diff}(x_i, y_i) = V_{drift} R_n e^{i\alpha_n} \quad (9)$$

với, $R_n [-1, 1]$ là số ngẫu nhiên được phân phối trong đoạn từ -1 đến 1; $\alpha_n [0, \pi]$ là góc lệch; V_{drift} là vận tốc dạt.

3. Ứng dụng thuật toán phân chia điểm Poisson vào mô phỏng chuyển động vật dầu loang trên biển

3.1. Thuật toán phân chia điểm Poisson

Định nghĩa về thuật toán phân chia điểm Poisson lần đầu tiên được giới thiệu bởi nhà thống kê học người Thụy Điển Bertil Matern [7] vào năm 1960 để thực hiện phân bố cây trong rừng. Trong lĩnh vực đồ họa máy tính, Dippe và Wold [8] đã áp dụng thuật toán để khắc phục hiện tượng răng cưa trên ảnh, khi đó nó có tên gọi khác là thuật toán Dart-throwing. Thuật toán này phân chia các điểm ngẫu nhiên trên vật thể 2D hoặc 3D, tuy nhiên nhược điểm là không kiểm soát được khoảng cách tối thiểu giữa các hạt và sẽ có các hạt bị chồng lấn lên nhau.

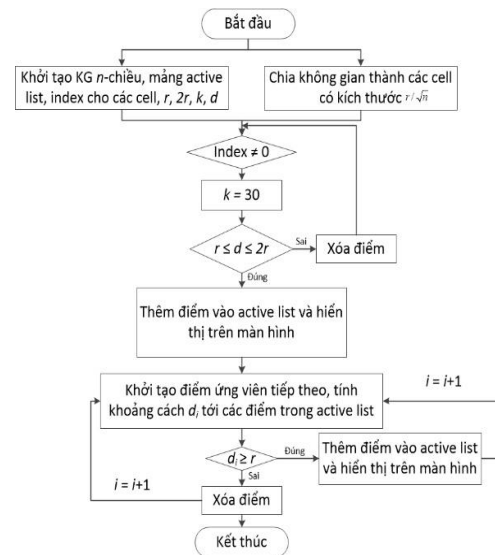


Hình 1. Nguyên lý phân chia điểm Poisson

Ứng dụng của thuật toán phân chia điểm Poisson trong đồ họa máy tính rất quan trọng, đặc biệt là để kết xuất hình ảnh, tạo hình và xử lý hình học cho đối tượng. Nguyên tắc hoạt động của thuật toán như sau: Thuật toán sẽ tạo ra một tập hợp điểm phân bố ngẫu nhiên trong không gian n chiều, chia không gian n chiều thành các ô vuông đối với 2D hoặc khối lập phương đối với 3D. Đồng thời thuật toán sẽ khống chế khoảng cách giữa hai điểm bất kỳ không nhỏ hơn một khoảng cách r cho trước. Để làm được điều này, thuật toán sẽ tạo ngẫu nhiên một điểm, sau đó tạo ra k điểm xung quanh nó, lần lượt kiểm tra xem trong số k điểm này thỏa mãn điều kiện khoảng cách r nói trên thì sẽ được hiển thị, thuật toán sẽ tiếp tục đối với các điểm được hiển thị tiếp theo, mỗi một cell chỉ có thể chứa duy nhất một điểm. Như vậy, trong không gian 2 chiều có thể thấy thuật toán sẽ tạo ra 2 vòng tròn có bán kính tương ứng với khoảng cách tối thiểu và tối đa giữa hai điểm bất kỳ, còn trong không gian 3 chiều là hai hình cầu tương ứng. Ưu điểm của phương pháp là tạo ra phân bố ngẫu nhiên các điểm trong không gian và

cách nhau một khoảng r cho trước. Trong Hình 1, điểm màu đỏ không được hiển thị, điểm màu đen được hiển thị, khoảng cách tối thiểu r , tối đa $2r$, kích thước cell là r/\sqrt{n} .

Để có thể hiểu rõ hơn nguyên lý xây dựng thuật toán như Hình 2, tác giả đã xây dựng sơ đồ thuật toán tạo điểm trong không gian n chiều, như Hình 1 và số điểm ứng viên tối đa là $k = 30$.



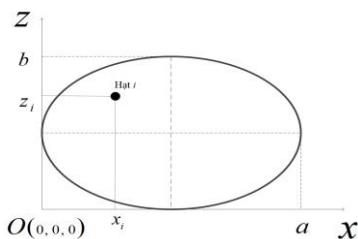
Hình 2. Sơ đồ thuật toán phân chia điểm Poisson

3.2. Ứng dụng vào mô hình vệt dầu loang trên biển

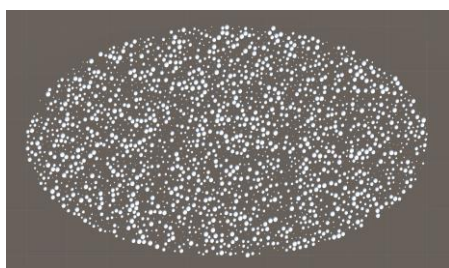
Tác giả áp dụng phương pháp thực nghiệm của Lehr để ước tính gần đúng hình dạng ban đầu của mảng dầu. Trong giai đoạn vài giờ đầu tiên, mảng dầu giãn nở theo hình Elip, và đạt đến diện tích tối đa A_{max} , như trong phương trình (6). Dưới tác dụng của sức căng bề mặt, sóng, gió, dòng, vệt dầu bị phân tách thành nhiều phần nhỏ một cách ngẫu nhiên. Để mô phỏng quá trình này, tác giả đã áp dụng thuật toán phân chia điểm Poisson khi mảng dầu đạt diện tích tối đa thành hàng nghìn hạt dầu có kích thước khác nhau. Trong Hình 3, giả sử đặt mảng dầu trong hệ tọa độ $Oxyz$, trong đó mặt phẳng Oxz là mặt phẳng chứa mảng dầu, trục y biểu thị chiều cao của sóng biển. Một điểm chỉ được hiển thị trên màn hình khi nó nằm bên trong hoặc trên biên của hình Elip, những điểm không thuộc điều kiện này thì sẽ không được hiển thị. Hình 4 là minh họa quá trình áp dụng lập trình tuần tự trên CPU với 50 nghìn hạt dầu. Sử dụng bất phương trình sau để kiểm tra điều kiện biên:

$$\frac{(x_i - a/2)^2}{(a/2)^2} + \frac{(z_i - b/2)^2}{(b/2)^2} \leq 1 \quad (10)$$

với, x_i, z_i là tọa độ của hạt thứ i , $a/2$ và $b/2$ là bán trục chính và bán trục phụ của Elip.



Hình 3. Miền phân chia điểm trong hệ tọa độ Oxyz



Hình 4. Miền phân chia 50 nghìn hạt

Tuy nhiên khi số điểm tăng lên sẽ ảnh hưởng khá lớn tới tốc độ của chương trình vì các phép tính toán tăng lên. Để khắc phục điều này, tác giả đã sử dụng phương pháp lập trình song song chạy đa luồng trên GPU với số hạt dầu trên 500 nghìn hạt nhằm tăng tốc độ tính toán của chương trình. Phương pháp này được thực hiện như sau:

Gọi M là bề mặt cần sinh điểm trong tập \mathbb{R}^n , và r là bán kính đĩa Poisson.

Bước 1: Tạo một tập điểm \mathcal{P} trên M và gán cho mỗi điểm một trạng thái IDLE - chưa được xử lý.

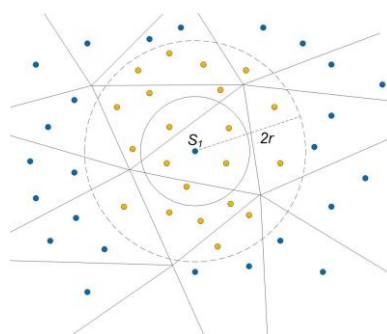
Bước 2: Mỗi một luồng sẽ tự động nhặt một điểm p_i từ tập \mathcal{P} (ở trạng thái IDLE), đặt cho nó một trị số ưu tiên duy nhất và cập nhật trạng thái cho điểm p_i là ACTIVE - đã được xử lý bởi một luồng (thread) trong một khối tương ứng (block). Sau đó luồng này sẽ tính toán khoảng cách từ tâm điểm p_i với bán kính $2r$ và đưa những điểm có trạng thái ACTIVE và IDLE vào trong đĩa.

Bước 3: Nếu có sự xung đột giữa các điểm ACTIVE thì điểm nào có giá trị ưu tiên thấp hơn sẽ bị loại bỏ.

Bước 4: Điểm ACTIVE thỏa mãn điều kiện $d \geq 2r$ sẽ được giữ lại và hiển thị trên màn hình, ngược lại những điểm có $d < 2r$ sẽ bị xóa. Quay trở lại bước 2 cho tới khi không còn điểm IDLE nào có thể tìm thấy trong tập \mathcal{P} nữa.

Như vậy việc vẽ các điểm sẽ được thực hiện đồng

thời trên nhiều luồng khác nhau, do đó sẽ tăng tốc độ tính toán của chương trình mà vẫn thỏa mãn số lượng lên tới hàng trăm nghìn điểm và đảm bảo yếu tố thời gian thực (real-time). Hình 5 thể hiện nguyên lý của thuật toán song song cho một luồng (thread). Chọn ngẫu nhiên một điểm S_i hiển thị trên màn hình, thuật toán ngay lập tức kiểm tra điều kiện những điểm nằm ngoài phạm vi bán kính $2r$ sẽ được hiển thị (màu xanh), những điểm nằm trong phạm vi $2r$ sẽ bị xóa (màu vàng). Công việc này cũng diễn ra tương tự trên các luồng khác.



Hình 5. Phân chia điểm đa luồng trên GPU

4. Thực hiện mô phỏng vệt dầu loang trên biển

Chương trình mô phỏng vệt dầu loang trên biển được thực hiện trên máy tính có cấu hình như sau:

- Chipset: Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz;
- Card đồ họa: NVIDIA GTX 1050Ti;
- Bộ nhớ RAM: DDR4 16GB;
- CPU: 4 nhân, 8 luồng.

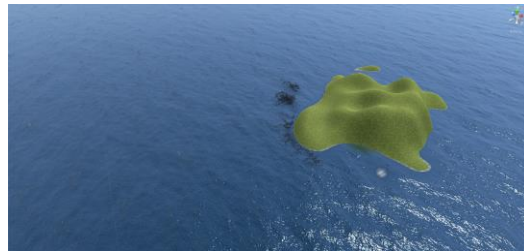
Để thực hiện mô phỏng 3D vệt dầu trong môi trường sóng biển, tác giả đã sử dụng phần mềm Unity với ngôn ngữ lập trình C# trong Microsoft Visual Studio 2015 để dựng cảnh và viết code cho dự án. Các thông số của dầu và môi trường như sau:

- Lượng dầu tràn: $1500 m^3$;
- Khối lượng riêng của dầu: $\rho_0 = 890 kg/m^3$;
- Khối lượng riêng nước biển: $\rho_w = 1023 kg/m^3$;
- Vận tốc gió ở độ cao $10m$ so với mặt nước biển: $W_{10} = 0.5 m/s$.

Ở giai đoạn đầu, màng dầu phát triển theo dạng hình Elip như giả thuyết của Lehr, khi đạt đến diện tích tối đa thì áp dụng thuật toán song song chia điểm Poisson để phân màng dầu thành 500.000 hạt dầu có kích thước khác nhau. Chương trình sẽ mô phỏng 2 trường hợp: Màng dầu trôi dạt trên biển và va chạm với một đảo nhỏ, sau đó phân tách ngẫu nhiên dưới tác động của



a)

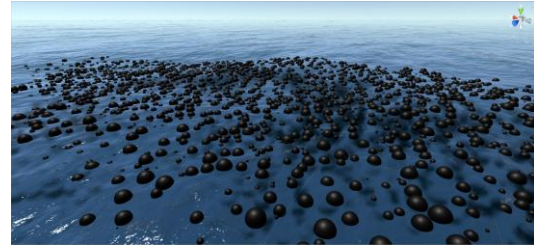


b)

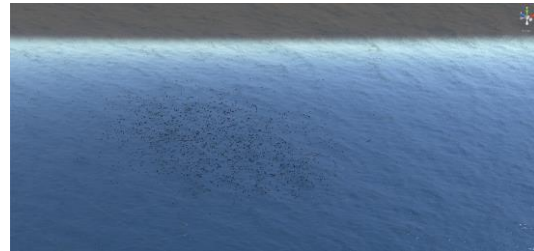
Hình 6. Vệt dầu tương tác với chướng ngại vật

sóng, gió và các yếu tố môi trường (Hình 6a, 6b); hoặc là màng dầu tự do giãn nở và phân tách ngẫu nhiên dưới tác động của sóng, gió và các yếu tố môi trường (Hình 7a, 7b). Nhìn vào Hình 6 có thể thấy, khi màng dầu gặp các đảo nhỏ thì nó có xu hướng dịch chuyển theo đường bờ biển và phụ thuộc vào các dòng chảy rối ven bờ. Khi màng dầu di chuyển tự do không có tác động của vật cản (Hình 7), quá trình phân tách thành các phần nhỏ sẽ diễn ra lâu hơn và hình dạng của màng dầu dần sẽ phân bố theo các rãnh sóng (windrow) như trong nghiên cứu của Lehr [9] vào năm 2017.

Hiện nay, nghiên cứu mô phỏng 3D tràn dầu vẫn còn một số hạn chế. Zou [10] đã sử dụng phương pháp kết xuất hình ảnh (RTT) để mô phỏng 3D vệt dầu loang trên biển, tuy nhiên hình ảnh vệt dầu không thể hiện được sự phân tách màng dầu thành các phần nhỏ hơn như trong mô hình của tác giả, xem Hình 8. Ren [11] cũng phát triển mô hình 3D tràn dầu dựa trên mô hình hạt, tuy nhiên số lượng hạt nhỏ và coi kích thước các hạt hình trụ là như nhau trong một phân bố đều, không tính đến tác động của gió, dòng, do đó mô hình có độ chính xác không cao và màng dầu chỉ đơn giản là sự mở rộng diện tích của hình tròn. Công ty Transas [4] cũng rất thành công trong các mô phỏng huấn luyện buồng lái với rất nhiều bài tập tình huống khác nhau, tuy nhiên trong mô phỏng ứng cứu sự cố tràn dầu họ chỉ áp dụng phương pháp dán hình ảnh vệt dầu lên bề mặt biển, sau đó sử dụng Shader để tạo các hiệu ứng màu sắc và tương phản cho hình ảnh dầu, vì thế cũng không đáp ứng được yêu cầu mô phỏng sự phân tách của màng dầu thành các phần nhỏ hơn như trong nghiên cứu này.



a)



b)

Hình 7. Vệt dầu không tương tác với chướng ngại vật



Hình 8. Mô phỏng vệt dầu loang của Zou

5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu phương pháp hoàn toàn mới trong việc mô phỏng tràn dầu trên biển bằng thuật toán phân chia điểm Poisson được lập trình song song đa luồng trên GPU để tăng tốc độ và đảm bảo thời gian thực. Tác giả đã thực hiện mô phỏng chuyển động của màng dầu bằng phần mềm Unity với các tình huống màng dầu tương tác với đảo nhỏ và di chuyển tự do trong môi trường sóng biển. Kết quả của bài báo có thể được sử dụng để tham khảo cho các mô hình ứng phó sự cố tràn dầu trên biển.

Tuy nhiên mô hình hiện tại chỉ là tập hợp các hạt dầu nên chưa đáp ứng được hình dung của chất lỏng. Các nghiên cứu tiếp theo tác giả sẽ giới thiệu thuật toán Marching Cube để tái tạo bề mặt lưới cho các vùng hạt có cùng độ sâu và kết xuất bề mặt chất lỏng. Thuật toán có ưu điểm là đơn giản và có thể mô phỏng vệt dầu loang trên một không gian rộng lớn mà không cần đòi hỏi độ chi tiết cao của màng dầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT21-22.05**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Anh Tú, Lê Đức Cường, *Mô phỏng một số kịch bản tràn dầu khu vực đảo Côn Cỏ*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, (Số 2), tr.187-194, 2014.
- [2] Nguyễn Hữu Nhân, Huỳnh Kỳ Hạnh, *Thử nghiệm mô hình OILSAS - Công cụ trợ giúp ứng phó sự cố tràn dầu trên vịnh Vân Phong, Tỉnh Khánh Hòa*, Tuyển tập nghiên cứu biển, (Tập 20), tr.19-29, 2014.
- [3] Võ Văn Anh Pha, *Nghiên cứu tích hợp mô hình lan truyền dầu vào bản đồ số 3D cho khu vực khí - điện - đạm Cà Mau để phục vụ công tác ứng phó sự cố tràn dầu*, Tạp chí An toàn - Môi trường Dầu khí, Số 12, tr.50-57, 2014.
- [4] Delgado L, Kumzerova, Martynov M. *Simulation of oil spill behavior and response operations in PISCES*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol.88, pp.279-292, 2006.
- [5] W. J. Lehr et al., *A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula*, Marine Pollution Bulletin, Vol.15, No.9, pp.326-329, 1984.
- [6] M.Fingas, *Chapter 8 - Introduction to spill modeling*, pp.187-200, 2015.
- [7] M.N.Gamito and S.C.Maddock, *Accurate multidimensional poisson disk sampling*, ACM Transactions on Graphics, Vol.29, No.1, Article 8, pp.1-19, 2009.
- [8] R. L. Cook, *Stochastic sampling in computer graphics*, ACM Transaction on Graphics, Vol.5, No.1, pp.51-72, 1986.
- [9] D. S. Beatty and W. J. Lehr, *Extended oil spill spreading with Langmuir circulation*, Marine Pollution Bulletin, Vol.122, pp.226-335, 2017.
- [10] Xuan Chen, Feng Yu, Changjun Zou, Xiuwen Liu, Guangqiang Liu, *Research of 3D Oil Spill Response Drill System*, Aquatic Procedia, No.3, pp. 15-20, 2015.
- [11] Ren Hongxiang et al., *3D Real-Time Rendering of Continuous Oil Spill on Simulated Ocean*, Journal of System Simulation, Vol.20, No.19, pp. 5117-5120, 2008.

Ngày nhận bài:	05/01/2022
Ngày nhận bản sửa:	18/01/2022
Ngày duyệt đăng:	08/02/2022