

PHƯƠNG PHÁP THỦY VÂN BỀN VỮNG CHO MÔ HÌNH LƯỚI 3D

Nguyễn Lương Nhật*, Đào Duy Liêm*

*Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

+Trường Đại học Công Nghệ Sài Gòn

Tóm tắt: Thủy vân bền vững trên lưới 3D là một chủ đề nghiên cứu cơ bản trong đồ họa máy tính, cung cấp một giải pháp hiệu quả để bảo vệ bản quyền cho lưới 3D. Bài báo này trình bày cách tiếp cận thủy vân không mù mạnh mẽ cho các mô hình lưới 3D. Ý tưởng của phương pháp này là nhúng thông tin thủy vân vào các lưới 3D bằng cách thay đổi phân bố của các đỉnh tại miền biên đối. Kết quả thử nghiệm cho thấy thủy vân có tính trong suốt cao và bền vững trước các tấn công hình học khác nhau.

Từ khóa: Mô hình lưới 3D, bảo vệ bản quyền, thủy vân bền vững, tọa độ hình cầu.

I. GIỚI THIỆU

Cùng với sự phát triển của hạ tầng mạng và tốc độ xử lý của máy tính, mọi người có thể sao chép, sửa đổi, lưu trữ và phân phối dữ liệu kỹ thuật số một cách dễ dàng. Gần đây, mô hình lưới 3D (Three-dimensional) đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng như công nghiệp, giải trí và y tế [1], [2]. Do đó, việc bảo vệ bản quyền đối với lưới 3D là một vấn đề quan trọng và giải pháp được ưa chuộng là thủy vân số. Thủy vân được tạo ra và nhúng vào dữ liệu, không thể tách rời thủy vân khỏi dữ liệu nếu không có đúng phương pháp và khóa. Bằng việc nhúng thủy vân vào mô hình lưới 3D, sau đó có thể tách thủy vân ra để khẳng định chủ quyền của mô hình 3D.

Kỹ thuật thủy vân có thể phân loại theo nhiều cách khác nhau: thủy vân mù, không mù hay bán mù; thủy vân bền vững hay dễ vỡ; thủy vân miền không gian hay miền biên đối;... Trong [3] chúng tôi đã thực hiện phương pháp nhúng thủy vân mù trên miền không gian tại hệ tọa độ cầu. Trong bài báo này chúng tôi trình bày một thuật toán thủy vân không mù, bền vững được thực hiện trên hệ tọa độ cầu ở miền biên đối, với việc chọn lựa hệ số nhúng phù hợp có thể nâng cao tính trong suốt của mô hình 3D hay tính bền vững của thông tin thủy vân.

Trong phần II chúng tôi trình bày các cơ sở lý thuyết liên quan gồm: giới thiệu kiến trúc thực tế về mô hình lưới 3D, phép biến đổi cosine rời rạc sửa đổi (MDCT - modified discrete cosine transform) và một số hình thức tấn công hình học trên lưới 3D. Phần III trình bày thuật toán thủy vân trên mô hình 3D đề xuất được thực hiện trong miền biên đối MDCT, phần IV cung cấp các kết quả thực nghiệm cùng các thí nghiệm tấn công để đánh giá

tính bền vững của thuật toán. Cuối cùng phần V là kết luận.

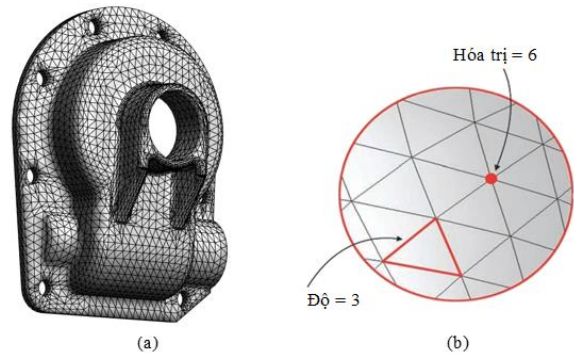
II. CÁC CƠ SỞ LÝ THUYẾT

A. Mô hình lưới 3D

Trong thực tế các mô hình 3D thường được đại diện bởi các lưới đa giác. Một lưới 3D được đặc trưng bởi ba thành phần: đỉnh, cạnh và mặt (thường là hình tam giác hoặc tứ giác). Trong khi tọa độ của các đỉnh tạo nên thông tin hình học của lưới thì các cạnh và các mặt mô tả các mối quan hệ liên kề giữa các đỉnh và tạo thành thông tin kết nối của lưới [4]. Mô tả theo toán học, một lưới M chứa N_V đỉnh và N_E cạnh có thể được mô hình hóa bởi $M = \{V, E\}$, trong đó:

$$V = \{v_i = (x_i, y_i, z_i) | i \in \{1, 2, \dots, N_V\}\} \quad (1)$$

$$E = \left\{ \begin{array}{l} e_i = (P_1^{(i)}, P_2^{(i)}) \\ j \in \{1, 2, \dots, N_E\}; \\ P_1^{(j)}, P_2^{(j)} \in \{1, 2, \dots, N_V\} \end{array} \right\} \quad (2)$$



Hình 1. (a) Mô hình lưới 3D casting, (b) Hóa trị (valence) của đỉnh và độ (degree) của mặt

Mỗi đỉnh v_i được mô tả bởi tọa độ ba chiều x_i, y_i, z_i của nó, mỗi phần tử trong E biểu diễn một cạnh nối hai đỉnh khác nhau được đánh số $P_1^{(j)}$ và $P_2^{(j)}$ tương ứng. Hình 1. minh họa về lưới 3D với “hóa trị” của một đỉnh là số cạnh nối đến đỉnh đó và “độ” của một mặt là số cạnh tạo nên mặt đó. Các đỉnh lân cận là các đỉnh được kết nối trực tiếp với đỉnh đó bằng một cạnh.

B. Phép biến đổi cosine rời rạc sửa đổi

MDCT được giới thiệu lần đầu vào [5] và được phát triển thêm trong [6]. Là một phép biến đổi lapped dựa trên biến đổi cosine rời rạc loại IV (DCT-IV), nên MDCT có sự bất thường so với các phép biến đổi Fourier khác ở chỗ

Tác giả liên hệ: Nguyễn Lương Nhật,

Email: nhatnl@ptithcm.edu.vn

Đến tòa soạn: 18/10/2021, chỉnh sửa: 16/11/2021, chấp nhận đăng: 18/11/2021

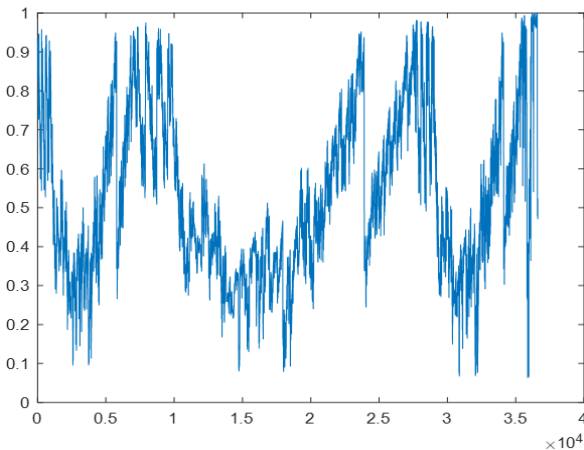
nó có một nửa ngõ ra giống như ngõ vào (thay vì cùng một số). Nó là một hàm tuyến tính $F: R^{2N} \rightarrow R^N$ (trong đó R là tập số thực). Tập $2N$ số thực x_0, \dots, x_{2N-1} được chuyển thành N số thực X_0, \dots, X_{N-1} theo công thức sau:

$$X_k = \sum_{n=0}^{2N-1} x_n \cos\left[\frac{\pi}{N}\left(n + \frac{1}{2} + \frac{N}{2}\right)\left(k + \frac{1}{2}\right)\right], k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

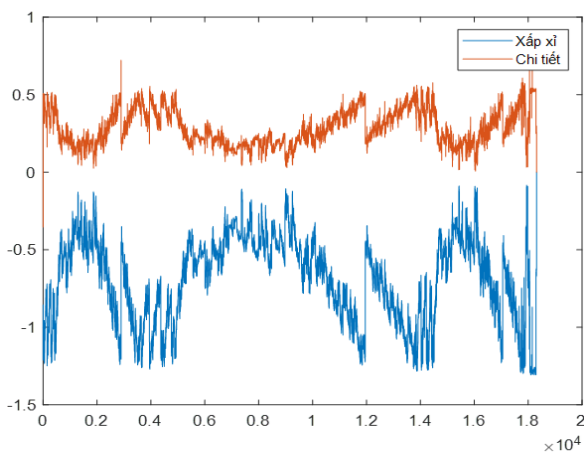
Phép biến đổi cosine rời rạc ngược có sửa đổi (IMDCT) thực hiện chuyển N số thực X_0, \dots, X_{N-1} thành $2N$ số thực y_0, \dots, y_{2N-1} theo công thức sau:

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cos\left[\frac{\pi}{N}k\left(n + \frac{1}{2} + \frac{N}{2}\right)\left(k + \frac{1}{2}\right)\right], n=0,1,\dots,2N-1 \quad (4)$$

Hình 2 và 3 mô tả trên Matlab các thành phần bán kính của các đỉnh trong mô hình lưới “hand” 36619 đỉnh ở thời điểm trước và sau khi biến đổi MDCT.



Hình 2. Bán kính các đỉnh của mô hình hand.off



Hình 3. Bán kính các đỉnh sau khi thực hiện MDCT

C. Các dạng tấn công trên lưới 3D

Chia nhỏ. Trong phép tấn công này, các đỉnh và cạnh được thêm vào lưới gốc để có được phiên bản sửa đổi mượt hơn và có chất lượng hình ảnh cao hơn. Có ba lược đồ chia nhỏ điển hình: lược đồ $\sqrt{3}$, lược đồ điểm giữa đơn giản và lược đồ vòng lặp [7]. Hình 4-(b) cho thấy kết quả phép tấn công chia nhỏ $\sqrt{3}$ của lưới 3D gốc trong hình 4-(a).

Cắt xén. Trong dạng tấn công này, một phần của lưới 3D bị cắt mất và tạo ra một mô hình mới. Hình thức tấn công cắt xén được thực hiện với các tỷ lệ cắt đỉnh gần

đúng khác nhau. Đối với mỗi tỷ lệ, lưới 3D sẽ được cắt xén dọc theo ba trục trục giao chọn ngẫu nhiên. Hình 4-(c) là một ví dụ cho lưới 3D bị cắt xén 30% so với mô hình gốc.

Đơn giản hóa. Phiên bản gốc của mô hình lưới 3D thường có độ phức tạp rất cao vì cần đảm bảo độ chính xác. Trong các ứng dụng thực tế, thủy vân được nhúng trong các mô hình ban đầu, sau đó lưới 3D được đơn giản hóa để thích ứng với khả năng của các tài nguyên có sẵn [8]. Hình 4-(d) là kết quả của phép tấn công này với tỷ lệ giảm cạnh 95%.

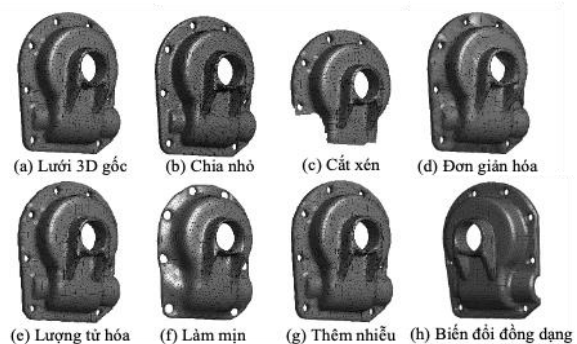
Lượng tử hóa tọa độ đỉnh. Hoạt động này được sử dụng phần lớn trong kỹ thuật nén lưới 3D. Trong phương pháp lượng tử hóa đồng nhất R -bit, tọa độ x (tương tự với y và z) của mỗi đỉnh được làm tròn thành một trong 2^R mức lượng tử.

Làm mịn. Là một hoạt động phổ biến được sử dụng để loại bỏ nhiễu trong quá trình tạo lưới thông qua phương pháp quét 3D. Đối với các lưới 3D thủy vân, quá trình làm mịn thường được thực hiện với thuật toán Laplacian [9] với số lần lặp khác nhau cùng hệ số biến dạng $\lambda=0.1$. Hình 4-(f) là kết quả của phép làm mịn với $\lambda=0.1$ và số lần lặp là 30.

Thêm nhiễu. Dạng tấn công này nhằm mục đích mô phỏng các dữ kiện tạo ra trong quá trình tạo lưới hoặc truyền dữ liệu. Trong bài báo này, chúng tôi thêm nhiễu giả ngẫu nhiên trên tọa độ đỉnh x_i theo phương trình sau (tương tự cho y_i và z_i):

$$x'_i = x_i + a_i \cdot \bar{d} \quad (5)$$

Trong đó \bar{d} biểu thị khoảng cách trung bình từ đỉnh đến tâm đối tượng (tâm của đối tượng được tính theo thể tích của lưới [10] hoặc vị trí trung bình của các đỉnh lưới [11]) và a_i là cường độ nhiễu của x_i . a_i là một số giả ngẫu nhiên phân bố đều trong khoảng $[-A, A]$ với A là cường độ nhiễu lớn nhất. Hình 4-(g) là kết quả của phép tấn công thêm nhiễu với $A=0.3\%$.



Hình 4. Mô phỏng các tấn công lưới 3D

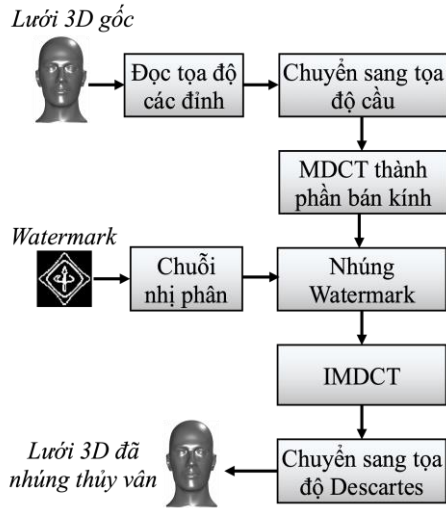
Biến đổi đồng dạng. Phép biến đổi này là sự kết hợp giữa các phép tịnh tiến, xoay và tỷ lệ đều nhưng vẫn giữ nguyên hình dạng lưới. Trong mỗi lần thực hiện phép đồng dạng này, mô hình lưới 3D tuân theo một phép tịnh tiến ngẫu nhiên, một phép xoay ngẫu nhiên và một tỷ lệ đều ngẫu nhiên như thể hiện trong hình 4-(h).

III. THỦY VÂN TRÊN MÔ HÌNH LƯỚI 3D

Trong phần này chúng tôi sử dụng một hệ thống bảo vệ bản quyền lưới 3D bằng phương pháp thủy vân. Mô

hình gồm hai quy trình chính: nhúng thủy vân và xác minh như sau.

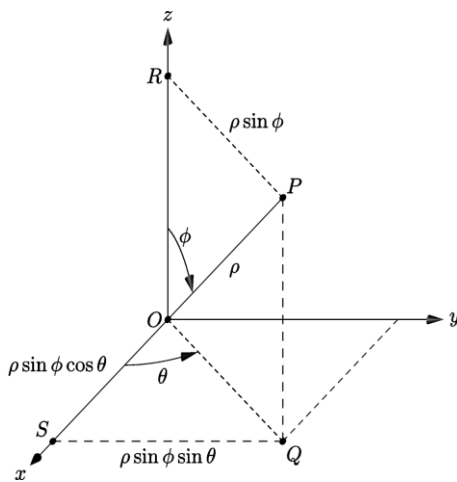
A. Nhúng thủy vân



Hình 5. Quá trình nhúng thủy vân

Thủy vân (watermark) có thể là các bit nhị phân, một logo hay vài ký tự đặc biệt nào đó cùng với lưới 3D gốc sẽ là ngõ vào của quá trình đóng dấu được mô tả trong hình 5.

Giá trị tọa độ các đỉnh đại diện cho khoảng cách giữa mỗi đỉnh tới trọng tâm mô hình lưới 3D. Gọi $v_i^D = \{x_i, y_i, z_i\}$ là đỉnh thứ i trong hệ tọa độ Descartes và $v_i^S = \{\rho_i, \theta_i, \phi_i\}$ là đỉnh tương ứng trong hệ tọa độ cầu [12]. Mỗi quan hệ giữa v_i^D và v_i^S được mô tả bởi (6), (7) và hình 6.



Hình 6. Quan hệ giữa tọa độ cầu và tọa độ Descartes

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \\ \theta_i = \arctan \frac{y_i}{x_i} \\ \phi_i = \arccos \frac{z_i}{\rho_i} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó ρ_i (thành phần bán kính) được gọi là chuẩn đỉnh thứ i , và:

$$\begin{cases} x_i = \rho_i \cos \theta_i \sin \phi_i \\ y_i = \rho_i \sin \theta_i \sin \phi_i \\ z_i = \rho_i \cos \phi_i \end{cases} \quad (7)$$

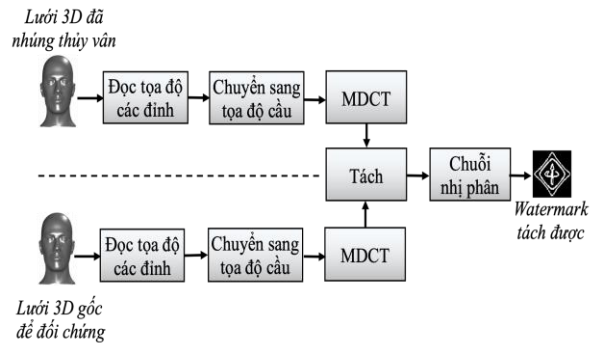
Thành phần bán kính ρ_i của các đỉnh lưới sau đó sẽ được chuyển qua miền tần số nhờ phép biến đổi MDCT và đưa vào khối nhúng. Thủy vân sau khi chuyển sang chuỗi nhị phân sẽ được nhúng lần lượt từng bit w_i vào các thành phần tần số thấp A_i của đỉnh lưới ở miền MDCT để tạo thành A'_i qua công thức (8). Vì mỗi bit thủy vân được nhúng vào một mẫu tần số thấp (sau khi biến đổi MDCT) của đỉnh lưới, mà thành phần tần số thấp này có số mẫu $\geq \frac{1}{2}$ số mẫu gốc nên lưới 3D ban đầu phải có số đỉnh lớn hơn hai lần số bit thủy vân.

$$A'_i = A_i + \alpha \cdot w_i \quad (8)$$

Hệ số nhúng α sử dụng để cân bằng tính trong suốt và bền vững của thuật toán. Trong khi tính trong suốt sẽ giữ cho mô hình 3D sau khi nhúng ít sai khác nhất so với mô hình gốc và giữ được độ tinh xảo trong các sản phẩm 3D thì tính bền vững sẽ đảm bảo quá trình xác minh luôn tách được thủy vân đúng trước những tấn công khác nhau lên mô hình. Giá trị α sẽ được lựa chọn tùy theo từng ứng dụng cụ thể, α càng tăng thì tính trong suốt càng tăng, tính bền vững càng giảm và ngược lại.

Các thành phần tần số thấp A'_i sau khi nhúng thủy vân sẽ được biến đổi IMDCT rồi chuyển sang tọa độ Descartes và phục hồi lại định dạng của lưới 3D. Như vậy ngõ ra của quy trình nhúng thủy vân sẽ là một mô hình lưới 3D đã nhúng thủy vân có rất ít sự sai khác so với mô hình ban đầu.

B. Xác minh



Hình 7. Quá trình tách thủy vân

Quá trình xác minh sẽ sử dụng mô hình lưới 3D chứa thủy vân cùng với lưới 3D gốc để đối chiếu và làm ngõ vào cho quá trình bóc tách thủy vân như được mô tả trong hình 7. Tương tự như quá trình đóng dấu, dữ liệu các đỉnh của cả hai lưới 3D này sẽ lần lượt chuyển sang tọa độ cầu và qua phép biến đổi MDCT rồi đưa vào khối tách thủy vân.

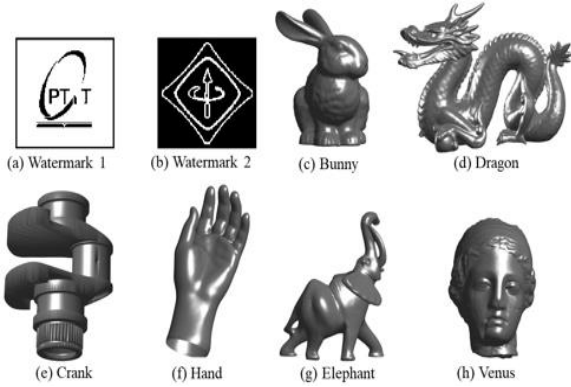
Các bit thủy vân w_i sẽ được tách từ A_i và A'_i lần lượt bằng công thức (9) với hệ số α giống với quá trình nhúng.

$$w'_i = \frac{A'_i - A_i}{\alpha} \quad (9)$$

Các bit thủy vân tách được w'_i sau đó sẽ được sắp xếp lại theo định dạng ban đầu để chứng thực bản quyền cho mô hình lưới 3D.

IV. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Các kết quả sau đây được thực hiện trên Matlab 2019a với thông tin thủy vân là hai logo nhị phân cùng kích thước 60 x 60 bit, các mô hình lưới 3D thí nghiệm lần lượt là “bunny” 34835 đỉnh, “dragon” 50.000 đỉnh, “crank” 50012 đỉnh, “hand” 36619 đỉnh, “elephant” 24955 đỉnh và “venus” 100759 đỉnh.



Hình 8. Thủy vân và lưới 3D sử dụng trong thí nghiệm

A. Đánh giá tính trong suốt

Để đánh giá chất lượng của các lưới 3D sau khi nhúng chúng tôi sử dụng thước đo độ biến dạng cấu trúc lưới MSDM (Mesh Structural Distortion Measure) được đề xuất bởi Lavoué [13]. Tham số này bằng 0 khi hai mô hình giống hệt nhau và tiến tới 1 khi hai mô hình rất khác nhau.

$$MSDM(A, B) = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n LMSDM(a_j, b_j) \right)^{\frac{1}{3}} \in [0, 1] \quad (10)$$

Với A và B là hai mô hình lưới cần so sánh; n là số đỉnh của mô hình; a_j, b_j là lưới cục bộ thứ j đang xét. Giá trị LMSDM được cho bởi:

$$LMSDM(a, b) = \left(0.4L(a, b)^3 + 0.4C(a, b)^3 + 0.2S(a, b)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Trong đó L, C và S tương ứng là hàm so sánh độ cong, độ tương phản và cấu trúc của hai lưới:

$$L(a, b) = \frac{\|\mu_x - \mu_y\|}{\max(\mu_x, \mu_y)} \quad (12)$$

$$C(a, b) = \frac{\|\sigma_x - \sigma_y\|}{\max(\sigma_x, \sigma_y)} \quad (13)$$

$$S(a, b) = \frac{\|\sigma_x \sigma_y - \sigma_{xy}\|}{\sigma_x \sigma_y} \quad (14)$$

Với μ_x, σ_x và $\sigma_x \sigma_y$ tương ứng là giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và hiệp phương sai của độ cong trên hai lưới cục bộ a, b . Theo [14] giá trị ngưỡng của MSDM ≤ 0.3 sẽ đảm bảo tính trong suốt cho mô hình đã nhúng thủy vân. Có nghĩa là khi thực hiện nhúng thủy vân vào các lưới 3D không gây ra quá nhiều sự biến dạng trên mô hình gốc.

Một thước đo khác là VSNR (Vertex Signal-to-Noise Ratio) [1], dùng để đánh giá chất lượng (tính trong suốt) của các thuật toán nhúng bằng cách kiểm tra sự khác biệt trực quan giữa mô hình đã thủy vân với nguyên bản của nó.

Gọi (X_i, Y_i, Z_i) và (X_i^*, Y_i^*, Z_i^*) lần lượt là tọa độ đỉnh V_i trước và sau khi nhúng thủy vân, VSNR được tính theo SNR từ công thức (15) và (16):

$$SNR = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2)}{\sum_{i=1}^N [(X_i - X_i^*)^2 + (Y_i - Y_i^*)^2 + (Z_i - Z_i^*)^2]} \quad (15)$$

$$VSNR = 20 \log_{10}(SNR) \quad (16)$$

Trong thí nghiệm này chúng tôi thực hiện nhúng lần lượt hai logo thủy vân vào sáu mô hình lưới 3D với nhiều hệ số nhúng khác nhau, sau đó ghi nhận độ biến dạng cấu trúc lưới MSDM. Hình 9 thể hiện sự thay đổi MSDM theo các hệ số nhúng khác nhau, theo đó chúng tôi thấy rằng với hệ số nhúng $\alpha \leq 0.005$, thuật toán thủy vân sẽ cho độ trong suốt mong muốn. Giá trị α này cũng chính là hệ số nhúng trong các thí nghiệm sau trong bài báo này.

Thí nghiệm 1: Đánh giá tính trong suốt

Ngõ vào: Lưới 3D gốc M , thủy vân gốc w , hệ số nhúng α

Ngõ ra: Lưới 3D đã nhúng M' , MSDM, VSNR.

Bước 1: Đọc lưới 3D gốc M lấy thành phần đỉnh V và mặt E ; chuyển V sang tọa độ cầu sẽ được bán kính ρ và hai góc θ, ϕ .

Bước 2: Biến đổi MDCT bán kính ρ để được thành phần xấp xỉ A và chi tiết D .

Bước 3: Chuyển w thành chuỗi bit nhị phân 3600 bit.

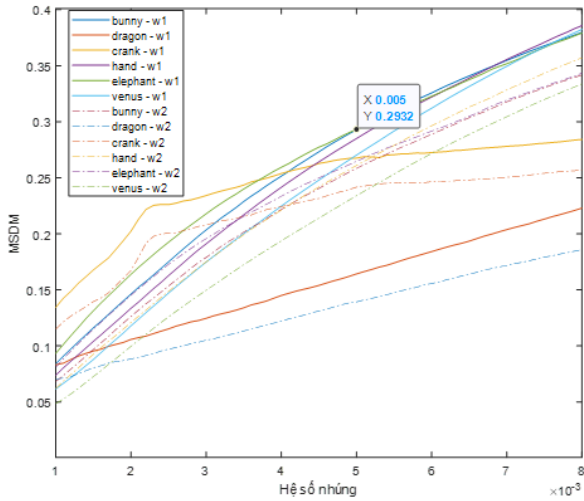
Bước 4: Nhúng lần lượt 3600 bit w_i vào 3600 mẫu A_i ($i=1 \div 3600$) theo công thức (8) với hệ số nhúng α tạo thành $A'i$.

Bước 5: Biến đổi IMDCT A' và D tạo thành ρ' .

Bước 6: Chuyển ρ', θ, ϕ sang tọa độ descartes được V' và xây dựng lại lưới 3D M' .

Bước 7: So sánh M và M' để tìm MSDM và VSNR.

Trả về: $M', MSDM$ và VSNR



Hình 9. Giá trị MSDM khi nhúng lần lượt hai thủy vân lên sáu mô hình với nhiều hệ số nhúng

Chúng tôi thực hiện thí nghiệm nhúng ngẫu nhiên 64 hoặc 128 bit vào các mô hình lưới 3D, sau đó ghi nhận sự khác biệt trực quan qua VSNR và so sánh với các nghiên cứu liên quan trong [1] và [15]. Theo kết quả như bảng I chúng ta có thể thấy rằng thuật toán thủy vân của chúng tôi đạt được giá trị VSNR cao nhất, hay nói cách khác, thuật toán thủy vân đã đạt được tính trong suốt cao.

Bảng I. So sánh tính trong suốt của các thuật toán nhúng qua tham số VSNR

Mô hình	Thuật toán [15]		Thuật toán [1]		Đề xuất	
	64 bit	128 bit	64 bit	128 bit	64 bit	128 bit
Bunny	106.37	104.56	141.86	135.93	144.25	136.52
Dragon	118.37	112.37	146.96	141.03	147.69	141.78
Crank	-	-	-	-	149.09	144.00
Hand	120.08	114.49	144.02	138.08	145.39	138.85
Elephant	-	-	-	-	130.68	125.96
Venus	135.53	129.69	157.37	151.43	158.37	152.67

B. Đánh giá tính bền vững

Tiêu chí quan trọng đối với các phương pháp thủy vân số là phải chứng minh thuật toán thủy vân mạnh mẽ đối với các cuộc tấn công. Trong các thí nghiệm tiếp theo, chúng tôi sẽ kiểm tra độ chắc chắn của phương pháp thủy vân đề xuất, chúng tôi thực hiện tấn công lên các đối tượng chứa thủy vân sau đó trích xuất thủy vân từ đó. Tính bền vững được đánh giá thông qua việc tính toán mối tương quan (*corr*) của thủy vân gốc *w* và thủy vân trích xuất *w'*.

$$corr = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})(w'_i - \bar{w}')}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})^2 \times \sum_{i=0}^{N-1} (w'_i - \bar{w}')^2}} \quad (17)$$

Một tham số khác cũng được dùng để so sánh giữa thủy vân gốc và thủy vân tách được là *NHS* (Normalized Hamming Similarity). Giá trị *NHS* sẽ nằm trong khoảng từ 0 (hai chuỗi khác nhau hoàn toàn) đến 1 (hai chuỗi giống hệt nhau).

$$NHS = 1 - \frac{HD(w, w')}{N.M} \quad (18)$$

$$HD(w, w') = \sum_i \sum_j xor(w(i, j), w'(i, j)) \quad (19)$$

Trong thí nghiệm tiếp theo chúng tôi thực hiện nhúng 64 bit ngẫu nhiên vào các lưới 3D, sau đó thực hiện tấn công bằng các phương pháp như đã được trình bày ở phần II-C với nhiều hệ số tấn công khác nhau. Các lưới 3D sau tấn công sẽ được trích xuất thủy vân rồi so sánh với thủy vân gốc để tìm mối tương quan *corr* và *NHS*.

Thí nghiệm 2: Đánh giá tính bền vững

Ngõ vào: Lưới 3D gốc *M*, loại nhiễu *N* và các hệ số tấn công.

Ngõ ra: *corr*, *NHS*.

Bước 1: Tạo chuỗi thủy vân *w* gồm 64 bit ngẫu nhiên.

Bước 2: Nhúng *w* vào lưới 3D gốc *M* (như trong thí nghiệm 1) với $\alpha = 0.005$ tạo thành *M'*.

Bước 3: Tác động nhiễu *N* lên *M'* tạo thành *M''*.

Bước 4: Tách thủy vân *w'* từ *M''* và *M* theo (9) như mô tả trong phần III-B.

Bước 5: So sánh *w* và *w'* tìm *corr* và *NHS*.

Trả về: *corr*, *NHS*.

Bảng II. Tham số *corr* của thủy vân tách được trên các mô hình bị tấn công so với thủy vân gốc

Tấn công	Thuật toán thủy vân		
	[16]	[17]	Đề xuất
Thêm nhiễu 0.01%	0.710	1	1
Thêm nhiễu 0.05%	0.695	0.986	1
Thêm nhiễu 0.2%	0.676	0.956	1
Làm mịn $N_{itr}=5$	0.643	0.883	1
Làm mịn $N_{itr}=10$	0.808	0.837	0.980
Làm mịn $N_{itr}=30$	0.532	0.716	0.794
Lượng tử hóa 10 bit	0.620	0.986	1
Lượng tử hóa 9 bit	0.565	0.971	1
Lượng tử hóa 8 bit	0.545	0.912	0.831
Chia nhỏ điểm giữa	0.535	0.986	1
Chia nhỏ $\sqrt{3}$	0.686	0.841	0.92
Chỉ nhỏ vòng lặp	0.696	0.896	0.725
Đơn giản hóa 10%	0.494	0.597	0.476
Đơn giản hóa 50%	0.326	0.543	0.150
Đơn giản hóa 70%	0.370	0.525	0.123
Cắt xén 1%	0.709	0.656	0.758
Cắt xén 5%	0.693	0.525	0.561
Cắt xén 10%	0.511	0.508	0.617
Cắt xén 20%	0.210	0.516	0.516

Giá trị trung bình $corr$ của thủy vân tách được từ các mô hình nhiễu khác nhau (so với thủy vân gốc) được ghi nhận và so sánh với các thuật toán liên quan trong [16], [17]. Trình bày kết quả so sánh giá trị trung bình $corr$ của phương pháp thủy vân đề xuất so với các nghiên cứu liên quan. Theo đó chúng ta có thể thấy rằng thuật toán thủy vân đề xuất bền vững hơn các thuật toán liên quan trong [16], [17] đối với các loại tấn công: “Thêm nhiễu”, “Lượng tử hóa”, “Làm mịn” và “Chia nhỏ”. Đối với các loại tấn công khác, thuật toán đề xuất không cho thấy quá nhiều sự khác biệt.

Bảng IV. trình bày kết quả so sánh tính bền vững của thủy vân trong phương pháp đề xuất với nghiên cứu liên quan [3] qua tham số NHS . Hai mô hình sử dụng trong thí nghiệm này là “bunny” và “crank” với các loại tấn công khác nhau. Theo đó chúng ta có thể thấy rằng thuật toán đề xuất trong bài báo này hiệu quả hơn [3] trong hầu hết các loại tấn công ngoại trừ tấn công cắt xén.

Bảng III. So sánh tính bền vững của thuật toán thủy vân đề xuất với [3] qua tham số NSH

Loại tấn công	Thuật toán [3] ($k=9$)		Đề xuất ($\alpha = 0.005$)	
	Bunny	Crank	Bunny	Crank
Chưa tấn công	1	1	1	1
Chia nhỏ	1	1	1	1
Cắt xén 30%	0.7253	1	0.6823	0.8698
Đơn giản hóa	0.7253	0.7486	0.6094	1
Lượng tử	1	0.9983	1	1
Làm mịn	0.7858	0.7311	1	1
Nhiều 0.25%	1	1	1	1
Biến đổi đồng dạng	0.5108	0.5092	0.6094	0.6094

Bảng IV và V so sánh tính bền vững của thủy vân trong phương pháp đề xuất với các nghiên cứu liên quan trong [1], [15] trên từng mô hình nhúng. Phương pháp tấn công lần lượt là thêm nhiễu và làm mịn, tham số so sánh là $corr$.

Bảng IV. Đánh giá tính bền vững với các tấn công thêm nhiễu qua tham số $corr$

Lưới 3D	Hệ số tấn công	Thuật toán thủy vân		
		[15]	[1]	Đề xuất
Bunny	0.1%	0.774	0.945	1
	0.3%	0.770	0.803	1
	0.5%	0.506	0.527	0.9333
Hand	0.1%	0.864	0.969	1
	0.3%	0.859	0.848	1
	0.5%	0.688	0.703	0.9675
Dragon	0.1%	0.949	0.968	1
	0.3%	0.927	0.842	1
	0.5%	0.726	0.771	0.9333
Venus	0.1%	0.964	0.978	1
	0.3%	0.941	0.867	1
	0.5%	0.715	0.737	0.8008

Bảng V. Đánh giá tính bền vững với tấn công làm mịn qua tham số $corr$

Lưới 3D	Hệ số tấn công	Thuật toán thủy vân		
		[15]	[1]	Đề xuất
Bunny	$N_{itr} = 5$	0.968	0.940	1
Hand	$N_{itr} = 5$	0.939	0.951	1
Dragon	$N_{itr} = 5$	0.910	0.929	1
Venus	$N_{itr} = 5$	0.910	0.947	1

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này chúng tôi giới thiệu một thuật toán thủy vân trên mô hình lưới 3D, từ đó có thể áp dụng trong việc bảo vệ bản quyền cho các mô hình lưới 3D. Thủy vân được nhúng vào mô hình trên miền tần số qua phép biến đổi MDCT với hệ số nhúng α có thể thay đổi được để tăng tính bền vững cho thủy vân trong khi vẫn đảm bảo độ trong suốt của mô hình.

Để đánh giá tính bền vững, chúng tôi cũng đã thực hiện nhiều loại tấn công với nhiều hệ số khác nhau lên các mô hình đã nhúng, sau đó tiến hành tách thủy vân để kiểm tra và so sánh với các nghiên cứu liên quan. Kết quả cho thấy thuật toán thủy vân đề xuất rất hiệu quả khi chống lại các tấn công: “Thêm nhiễu”, “Lượng tử hóa”, “Làm mịn”, “Chia nhỏ” và chưa hiệu quả với loại tấn công “Đơn giản hóa” hay “Cắt xén”.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở tại Thành phố Hồ Chí Minh trong Đề tài có mã số 10-HV-2021-RD_ĐT2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ola m. el zein, Llamiaa m. el bakrawy, Neveen i. Ghali, “A non-blind robust watermarking approach for 3d mesh models”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2016. V83. No3, pp 353-359.
- [2] K. Wanga, G. Lavouea, F. Denisb and A. Baskurta, "A Comprehensive Survey On Three Dimensional Mesh Watermarkin", IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 10, December 2008, pp. 1513-1527.
- [3] Nguyễn Lương Nhật, Đào Duy Liêm, Lương Xuân Dẫn, “Thủy vân trên mô hình 3D”, Kỷ yếu hội thảo Quốc gia về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ thông tin 2015, ISBN: 978-604-67-0635-9, pp 41-44.
- [4] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, and A. Baskurt, “Blind Watermarking of Three-Dimensional Meshes Review: Recent Advances and Future Opportunities”, 2010.
- [5] Princen, J., and A. Bradley. "Analysis/Synthesis Filter Bank Design Based on Time Domain Aliasing Cancellation." *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Vol. 34, Issue 5, 1986, pp. 1153–1161.
- [6] Princen, J., A. Johnson, and A. Bradley. "Subband/Transform Coding Using Filter Bank Designs Based on Time Domain Aliasing Cancellation." *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 1987, pp. 2161–2164.
- [7] D. Zorin and P. Schroder, “Subdivision for modeling and animation,” in Proc. of the ACM Siggraph Course Notes, 2000.
- [8] P. Lindstrom and G. Turk, “Fast and memory efficient polygonal simplification,” in Proc. of the IEEE Visualization, 1998, pp 279-286.
- [9] G. Taubin, “Geometric signal processing on polygonal meshes,” in Proc. of the Eurographics State-of-the-art Reports, 2000, pp. 81-96.

- [10] C. Zhang and T. Chen, "Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation," in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Process., 2001, pp. 935-938.
- [11] K. Wang, G. Lavoue, F. Denis, and A. Baskurt, "Robust and blind watermarking of polygonal meshes based on volume moments," Tech. Rep., LIRIS Laboratory, 2009, available at <http://liris.cnrs.fr/Documents/Liris-3713.pdf>.
- [12] Mohsen Ashourian, Reza Enteshari, Jeonghee Jeon, "Digital Watermarking of Three-dimensional Polygonal Models in the Spherical Coordinate System", Proceedings of the Computer Graphics International (CGI'04), IEEE 2004, pp. 590-593.
- [13] G. Lavoué, E. D. Gelasca, F. Dupont, A. Baskurt, and T. Ebrahimi, "Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking," in Proc. of the SPIE Electronic Imaging, 2006, vol. 6312, pp. 63120L.1–63120L.12.
- [14] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, and A. Baskurt (2010), "A benchmark for 3D mesh watermarking", IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI) 2010, pp. 231-235, Aug. 2010.
- [15] M.M. Soliman, A.E. Hassanien and H.M. Onsi, "A blind 3D watermarking approach for 3D Mesh using Clustering Based Methods", International Journal of Computer Vision and Image Processing, Vol. 3, No. 2, April-June 2013, pp. 43- 53.
- [16] J. Hou, D. Kim and H. Lee, "Blind 3D Mesh Watermarking for 3D Printed Model by Analyzing Layering Artifact," in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 12, no. 11, pp. 2712-2725, Nov. 2017, doi: 10.1109/TIFS.2017.2718482.
- [17] J.-W. Cho, R. Prost, and H.-Y. Jung, "An oblivious watermarking for 3-d polygonal meshes using distribution of vertex norms." IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 55, no. 1, pp. 142–155, 2007.

A ROBUST WATERMARKING APPROACH FOR 3D MESH MODEL

Abstract: Robust 3D mesh watermarking is a basic research topic in computer graphics, which provides an efficient solution to the copyright protection for 3D meshes. This paper presents a non-blind and robust watermarking approach for 3D mesh models. The idea of this method is to embed watermarks into 3D meshes by changing the distribution of vertices at the transform domain. The test results show that the watermark is highly transparent and robust to different geometrical attacks.

Keywords: 3D Mesh Models, Copyright Protection, Robust Watermarking, Spherical Coordinates.



Nguyễn Lương Nhật, Nhận học vị Tiến sĩ năm 1998 tại Moscow, nước Nga. Hiện là Trưởng khoa Kỹ thuật Điện tử 2, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh. Lĩnh vực nghiên cứu: Xử lý tín hiệu, trí tuệ nhân tạo, an toàn thông tin.



Đào Duy Liêm, Tốt nghiệp Thạc sĩ Kỹ thuật Viễn thông năm 2014 tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hiện là giảng viên khoa Điện Điện tử trường Đại học Công Nghệ Sài Gòn. Lĩnh vực nghiên cứu: Xử lý tín hiệu, mật mã, kỹ thuật y sinh, hệ thống nhúng.