



DOI:10.22144/ctujos.2024.446

SỐ HÓA CỔ VẬT BẰNG CÔNG NGHỆ SCAN 3D KẾT HỢP THỰC TẾ ẢO TĂNG CƯỜNG: NGHIÊN CỨU TẠI KHU VỰC ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Huỳnh Ngọc Thái Anh* và Thái Diệp Tân Đạt

Trường Công nghệ Thông tin và Truyền thông, Trường Đại học Cần Thơ

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): hntanh@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 04/04/2024

Sửa bài (Revised): 06/06/2024

Duyệt đăng (Accepted): 09/08/2024

Title: Digitizing Artifacts using 3D Scan Technology Combined with Augmented Reality: A Study in the Mekong Delta region

Author(s): Huỳnh Ngọc Thái Anh* and Thái Diệp Tân Đạt

Affiliation(s): The College of Information and Communication Technology, Can Tho University

TÓM TẮT

Đồng bằng sông Cửu Long có nhiều cổ vật phong phú và đặc sắc, các cổ vật này thuộc nhiều thể loại khác nhau như: văn hóa, lịch sử, nghệ thuật, tôn giáo, dân gian, ... Hiện nay, các cổ vật này đã được số hóa trên các website, các ứng dụng mô phỏng để mọi người dễ dàng tiếp cận. Tuy nhiên, số lượng ứng dụng này còn ít so với số lượng lớn cổ vật mà các bảo tàng ở đồng bằng sông Cửu Long đang lưu trữ. Nghiên cứu này có mục tiêu xây dựng giải pháp công nghệ dựng hình 3D cổ vật bằng kỹ thuật Scan 3D với cảm biến LiDAR trên thiết bị di động, sau đó hiển thị 3D cổ vật trên website và smartphone bằng AR Vuforia. Nghiên cứu này cũng đánh giá ảnh hưởng của vật liệu cổ vật đến quá trình scan 3D và đề xuất giải pháp giảm kích thước 3D cổ vật từ 60% đến 80% bằng Error Quadrics mà vẫn đảm bảo chất lượng hiển thị trên các website. Hướng tiếp cận này mở ra các hướng xây dựng bảo tàng online cho khu vực cũng như toàn Việt Nam.

Từ khóa: AR Vuforia, cổ vật Việt Nam, đồng bằng sông Cửu Long, Error Quadrics, Scan 3D LiDAR

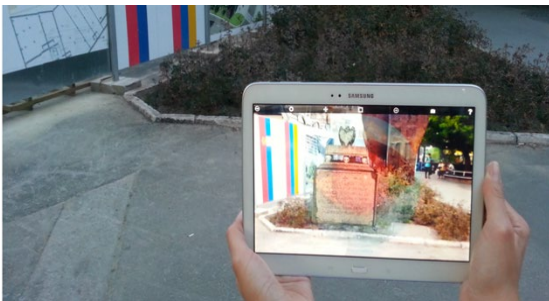
ABSTRACT

The Mekong Delta region is home to a rich and unique collection of artefacts, encompassing a wide variety of categories such as culture, history, art, religion, folklore, and more. Currently, these artefacts have been digitized on websites and in simulation applications to facilitate easy access. However, the number of such applications is small compared to the vast quantity of artefacts and artefacts stored in museums throughout the Mekong Delta. This study aims to develop a technological solution for constructing 3D models of artefacts using 3D scanning techniques with LiDAR sensors on mobile devices, followed by the display of these artefacts on websites and smartphones through AR Vuforia. Additionally, this research evaluates the impact of the artefact materials on the 3D scanning process. It proposes a solution to reduce the 3D artefact size by 60% to 80% using Error Quadrics while still ensuring quality display on websites. This approach opens new avenues for constructing online museums for the region as well as for the whole of Vietnam.

Keywords: AR Vuforia, Error Quadrics, Mekong Delta, Vietnam artefacts, 3D Scan by LiDAR

1. TỔNG QUAN

Trong thời đại công nghệ số ngày nay, việc ứng dụng công nghệ mới trong bảo tồn và giới thiệu di sản văn hóa đang ngày càng trở nên quan trọng. Số hóa cổ vật không chỉ giúp bảo tồn các di sản văn hóa mà còn mở ra cơ hội để công chúng tiếp cận và hiểu biết về chúng một cách sâu sắc hơn. Mặc dù đã có nhiều nỗ lực trong việc số hóa cổ vật, nhưng số lượng ứng dụng và trang web trình bày cổ vật ở dạng số vẫn còn hạn chế so với số lượng lớn cổ vật mà các bảo tàng tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đang lưu trữ. Việc áp dụng công nghệ Scan 3D và Thực tế ảo tăng cường (AR) vào việc số hóa cổ vật là một bước tiến đột phá, mang tính cách mạng trong việc bảo tồn và phát huy giá trị di sản văn hóa. Công nghệ Scan 3D và AR đã được nhiều nghiên cứu quốc tế chứng minh là có tiềm năng lớn trong việc bảo tồn và truyền bá di sản văn hóa. Việc áp dụng các kỹ thuật số hóa 3D (3D digitization) vào các di sản văn hóa thông qua các công nghệ như AR, VR và in 3D được cho là sẽ tạo nên những tác động tích cực trong bảo tồn di sản văn hóa (Malik et al., 2021). Đồng thời việc kết hợp các phương pháp dựng mô hình 3D bằng ảnh chụp photogrammetry và AR được nhấn mạnh đem lại trải nghiệm hình ảnh các di sản chân thực cho người dùng (Đurić et al., 2018) (Hình 1).



Hình 1. Ứng dụng AR để tái hiện mô hình 3D[2]

Từ những tiềm năng kể trên, nghiên cứu này hướng tới xây dựng một giải pháp phù hợp để mô phỏng 3D các cổ vật Việt Nam. Tính mới của nghiên cứu này nằm ở việc tìm hiểu ảnh hưởng của thuộc tính bề mặt của các loại vật liệu cổ vật phổ biến đến quá trình scan 3D và khả năng ứng dụng công nghệ AR Vuforia trong việc hiển thị 3D cổ vật trên các nền tảng số. Đồng thời nghiên cứu này đề xuất các giải pháp giảm kích thước mô hình 3D cổ vật bằng Error Quadratics (hay Đa thức sai số bậc hai) mà vẫn đảm bảo chất lượng hiển thị.

Điểm khác biệt chính của nghiên cứu này với các đề tài trước đó là xây dựng một giải pháp công nghệ chi phí thấp để dựng và tối ưu mô hình 3D cổ vật

bằng cảm biến LiDAR trên thiết bị di động thay vì sử dụng các thiết bị scan chuyên dụng. Sau đó đề xuất hướng xây dựng ứng dụng hiển thị 3D cổ vật trên website và trên các thiết bị di động thông qua thư viện AR Vuforia.

1.1. Bối cảnh nghiên cứu

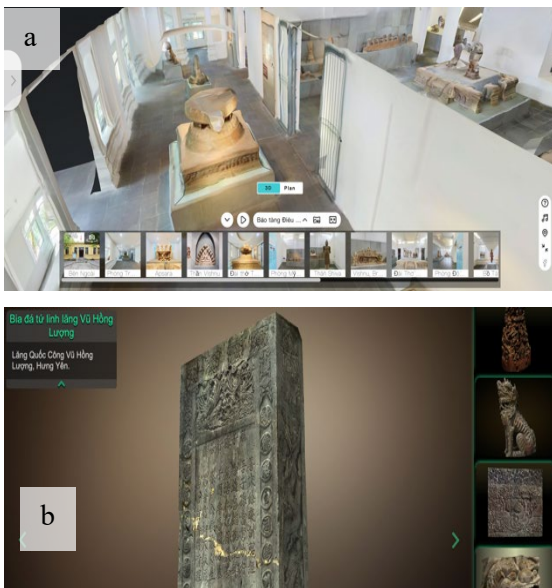
Tiềm năng của việc mô phỏng các cổ vật trong không gian ảo VR đã sớm được nghiên cứu với mục tiêu xây dựng các hệ thống chi phí thấp nhưng đem lại khả năng tiếp cận mở rộng và nhiều tương tác cho các mô hình 3D di sản (Herrmann et al., 2014). Một nghiên cứu về phát triển các ứng dụng bảo tồn di sản kiến trúc truyền thống Trung Quốc vào năm 2014 đã chứng minh rằng việc sử dụng cơ sở dữ liệu kỹ thuật số và mô phỏng 3D giúp tăng cường hiểu biết của cộng đồng về loại hình di sản kiến trúc (Yen et al., 2014). Một nền tảng tên là Qatar Historic Buildings Information Modeling (Q-HBIM) đã được phát triển vào năm 2019 nhằm cung cấp khả năng hiển thị các mô hình 3D của tòa nhà kèm theo thông tin lịch sử. Q-HBIM có mục tiêu bảo tồn và chia sẻ thông tin di sản kiến trúc một cách hiệu quả đến cộng đồng (Fadli & Alsaed, 2019). Nghiên cứu vào năm 2020 về các kho dữ liệu 3D và phân tích chức năng của các nền tảng hỗ trợ dựng mô hình 3D trong việc mô phỏng và quảng bá di sản văn hóa đã mở ra những hướng tiếp cận trong việc trình bày các mô hình 3D trên nền tảng website (Champion & Rahaman, 2020).

Những nghiên cứu này cho thấy sự tiến bộ trong việc ứng dụng công nghệ 3D và AR để bảo tồn và giới thiệu di sản văn hóa. Hướng phát triển chung của các nghiên cứu này là thường xuyên cập nhật và ứng dụng các kỹ thuật mới, đồng thời tìm ra cách tối ưu hóa công nghệ hiện có để phục vụ mục đích bảo tồn di sản một cách tốt nhất.

1.2. Các nghiên cứu trong nước

Theo quy định của Luật Di sản văn hóa Việt Nam thì "Cổ vật" được định nghĩa là hiện vật lịch sử, văn hóa, khoa học từ 100 năm tuổi trở lên, phản ánh được giá trị qua từng giai đoạn lịch sử và có sự phân bố địa lý đa dạng. Việt Nam với bề dày lịch sử và văn hóa đang sở hữu một kho tàng cổ vật phong phú được làm từ nhiều chất liệu khác nhau như đồng, gỗ, giấy, đá, gốm sứ và bao gồm cả những chất liệu quý hiếm như vàng, bạc, đá quý. Công tác nghiên cứu và số hóa cổ vật cùng với di tích lịch sử đang được tiến hành mạnh mẽ tại các trường đại học và bảo tàng trong từng khu vực. Một trong những nghiên cứu nổi bật là "Xây dựng hệ thống thông tin về di tích thành cổ Quảng Trị", sử dụng công nghệ GIS cùng với GPS, UAV và 3D scan để tích hợp dữ

liệu lịch sử – văn hóa vào bản đồ địa lý (Lợi et al., 2018). Ứng dụng này không chỉ giúp người dùng và du khách có trải nghiệm mới mẻ qua mô hình 3D mà còn hỗ trợ bảo tồn di sản kỹ thuật số thông qua việc thu thập, xử lý, lưu trữ và truy cập dữ liệu mở. Bảo tàng Điều khắc Chăm Đà Nẵng đã thành công trong việc ứng dụng công nghệ scan 3D và ảnh VR360 để tái hiện không gian bảo tàng và các cổ vật, cho phép người xem trải nghiệm và tìm hiểu về các di sản văn hóa một cách sinh động trên website của bảo tàng. Cách tiếp cận này không chỉ mang lại trải nghiệm chân thực cho người xem mà còn cho phép truy cập thông tin cổ vật một cách tiện lợi trên hai ngôn ngữ là tiếng Việt và tiếng Anh. Nền tảng số hóa VR3D.vn hướng tới mục tiêu quản lý, bảo tồn, quảng bá di sản trên website và cung cấp dịch vụ scan 3D cho cả cổ vật kích thước nhỏ lẫn các công trình kiến trúc lớn. Điểm nổi bật của các mô hình hiển thị trên website VR3D là tốc độ hiển thị nhanh, mức độ chi tiết cao và đa dạng loại tương tác điều khiển như xoay lật, thu phóng, kéo thả, chọn các thành phần để xem thông tin và hiển thị mô hình ở dạng VR/AR (VR3D, 2024). Một số mô hình kiến trúc lớn còn được tích hợp cơ chế camera di chuyển tự động và hiệu ứng mô hình chuyển động kết hợp với âm thanh thuyết minh, tăng cường trải nghiệm nội dung cho người dùng, qua đó mở rộng khả năng tiếp cận và hiểu biết về di sản văn hóa Việt Nam (Hình 2).



Hình 2. Không gian ảo của Bảo tàng điều khắc Chăm (a) và các cổ vật được số hóa bởi VR3D (b)

1.3. Phân loại cổ vật tại khu vực ĐBSCL

Các di tích khảo cổ ở ĐBSCL phân bố với mật độ cao ở An Giang, Kiên Giang, Đồng Tháp và Cần Thơ (Nguyễn, 2018). Các cổ vật đại diện cho nhiều thời kỳ từ tiền sử đến phong kiến và rất đa dạng từ đồ gốm sứ, đồ đồng, trang sức đến bia mộ,... Chúng được phân loại theo kích thước, niên đại và phong cách nghệ thuật, mỗi loại mang giá trị lịch sử và văn hóa sâu sắc giúp làm sáng tỏ quá trình phát triển của ĐBSCL (Nguyễn, 2018). Với nhiều loại cổ vật đặc sắc cũng tạo nên nhu cầu cao về việc số hóa 3D các cổ vật để mở rộng khả năng tiếp cận và hiểu biết đến đại đa số người dân trong cộng đồng.

Cổ vật trong nghiên cứu này được phân loại theo ba kích thước chính: lớn, trung bình và nhỏ. Các cổ vật lớn thường liên quan đến kiến trúc và nghệ thuật trong khi cổ vật trung bình và nhỏ mang lại cái nhìn về đời sống hàng ngày và tinh thần cộng đồng. Qua quá trình thử nghiệm thì nhóm nghiên cứu đánh giá rằng cổ vật kích thước trung bình là lý tưởng cho việc quét và tạo mô hình 3D sử dụng cảm biến LiDAR. Các cổ vật lớn gặp thách thức trong việc quét 3D vì góc quét và khả năng tái tạo hạn chế, trong khi cổ vật nhỏ với độ chi tiết cao và kích thước nhỏ khó nhận diện bởi cảm biến (Hình 3). Thử nghiệm chỉ ra khoảng cách quét từ 1 m đến 2 m, dưới điều kiện ánh sáng tốt và cổ vật được đặt độc lập cho phép quét 360 độ sẽ đem lại kết quả chính xác nhất về tái tạo mô hình và chất liệu.



Hình 3. Mô hình trống đồng kích thước trung bình hiển thị tốt (a) và mô hình xe tăng bị lỗi mặt phẳng vì kích thước lớn (b)

Các loại vật liệu của cổ vật phổ biến nhất được trưng bày tại các bảo tàng ở ĐBSCL bao gồm đất nung, kim loại, đá cho đến vật liệu khác như gỗ, tre, xương. Mỗi loại vật liệu phản ánh trình độ kỹ thuật và công nghệ của từng thời kỳ và giai đoạn khác nhau. Hầu các loại vật liệu nhám như gỗ, đá, đất nung đều có thể được tái tạo thành các ảnh vật liệu (texture) rất tốt khi dựng mô hình 3D, nhưng các vật liệu có bề mặt nhẵn bóng sẽ bị phản xạ tạo thành các bóng sáng khi tái tạo. Đặc biệt là các cổ vật bằng kính, thủy tinh không phù hợp để quét 3D bằng cảm biến LiDAR vì tính trong suốt nên khúc xạ, phản xạ bề mặt làm mặt phẳng khó tái tạo (Hình 4).



Hình 4. Vật liệu cổ vật bằng gốm được tái tạo tốt (a) và mặt kính trên một cửa tủ cổ bị xuyên thấu và không thể tái tạo chi tiết (b)

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Quy trình thực hiện

Nghiên cứu này tập trung mô phỏng và tối ưu hóa các cổ vật trưng bày từ Bảo tàng tỉnh Vĩnh Long, Bảo tàng thành phố Cần Thơ và Bảo tàng văn hóa Chăm, Đà Nẵng bằng công nghệ scan 3D. Các cổ vật được lựa chọn với tiêu chí là kích thước từ 0,5 m đến 2 m, đây là phạm vi quét tốt nhất của cảm biến LiDAR trên di động. Đồng thời ưu tiên chọn cổ vật được trưng bày ở vị trí có thể quan sát toàn bộ các góc cạnh. Sau quá trình đánh giá thì nhóm nghiên cứu chọn ra 7 loại vật liệu thường thấy trên các cổ vật gồm: kim loại, các loại đá, gỗ, giấy, vải - lụa, chất liệu từ động vật và thủy tinh. Sau đó tiến hành đánh giá và chọn ra mỗi loại 2 cổ vật đại diện theo từng loại vật liệu. Kết quả có 14 mẫu cổ vật được tạo thành mô hình 3D bao gồm:

1. Kim loại: Trống đồng, tượng kỳ lân.
2. Đá: 2 tượng văn hóa Chăm.
3. Gỗ: tủ gỗ xà cừ và hộp gỗ phát nhạc.
4. Giấy: 2 mặt nạ giấy Rô Bâm.
5. Vải - lụa: 2 trang phục dân tộc Hoa.
6. Chất liệu từ động vật: sừng voi và da cá sấu
7. Thủy tinh: Tủ gỗ mặt kính, trụ đồng hồ cổ

Các mô hình 3D sau khi tạo sẽ được tối giản mặt lưới bằng phương pháp Error Quadrics với mục tiêu xác định mức độ tối ưu phù hợp đáp ứng được tiêu chí giảm được dung lượng mô hình mà vẫn giữ được độ chi tiết và chất lượng hiển thị. Tiếp theo là phát triển website và ứng dụng di động sử dụng các mô hình 3D đã tối ưu, cho phép hiển thị và tương tác phù hợp với người dùng. Cuối cùng là kiểm thử và thu thập phản hồi từ người dùng để cải thiện hệ thống và đảm bảo mô hình 3D hiển thị tốt trên website và di động.

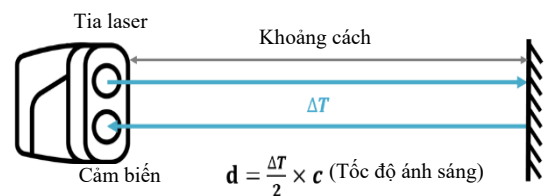
2.2. Đánh giá các giải pháp dựng mô hình 3D cổ vật

Trong quá trình tạo mô hình 3D, hai phương pháp được sử dụng kết hợp để tạo mô hình là quét 3D và dựng 3D. Dưới đây là so sánh giữa hai phương pháp này:

- **Tái tạo chi tiết:** Quét 3D cung cấp hình dạng, họa tiết và chất liệu gần với thực tế trong khi Dựng 3D tái tạo hình dạng chính xác nhưng chi tiết và chất liệu kém chân thực hơn.
- **Khả năng tùy biến:** Quét 3D khó khăn trong việc chỉnh sửa cấu trúc, yêu cầu thời gian và công sức lớn; Dựng 3D dễ dàng tùy chỉnh hình dạng, cấu trúc và hỗ trợ tùy biến cao.
- **Mục tiêu sử dụng:** Quét 3D thường được áp dụng để thu thập và lưu trữ cổ vật ở di tích và bảo tàng; Dựng 3D phù hợp với ngành game và hoạt hình nơi cần đến sự sáng tạo và khả năng tùy chỉnh.

Nhóm nghiên cứu lựa chọn quét 3D là phương pháp chính để thu thập mô hình 3D của các cổ vật vì đáp ứng mục tiêu về độ chính xác, tái tạo đặc trưng và chi tiết của cổ vật tốt.

Để chọn ra công cụ quét 3D tối ưu, nhóm nghiên cứu đã tiến hành đánh giá và so sánh nhiều thiết bị máy quét trên thị trường, trong đó máy quét laser và máy quét CT được xem xét kỹ lưỡng về cơ chế hoạt động và khả năng tạo mô hình chính xác. Máy quét laser thu thập dữ liệu dựa trên phản xạ tia laser, trong khi máy quét CT sử dụng tia X để chụp ảnh 2D và sau đó tái tạo thành hình ảnh 3D từ các mặt cắt. Tuy nhiên, vấn đề chi phí cao và kích thước lớn của những máy này nên giải pháp sử dụng cảm biến LiDAR trên iPhone kết hợp với ứng dụng Polycam đã được chọn lựa. Giải pháp này có ưu điểm về sự tiện lợi và khả năng xử lý nhanh của thiết bị di động. Cảm biến LiDAR với phương pháp Time-of-flight (ToF) với khả năng xác định khoảng cách dựa trên thời gian phản hồi của tia laser (lady, 2023), mang lại khả năng đo lường khoảng cách xa và độ chính xác cao ngay cả trong điều kiện ánh sáng môi trường mạnh. Các đặc điểm trên làm cho LiDAR trở thành công cụ lý tưởng trong việc số hóa cổ vật.



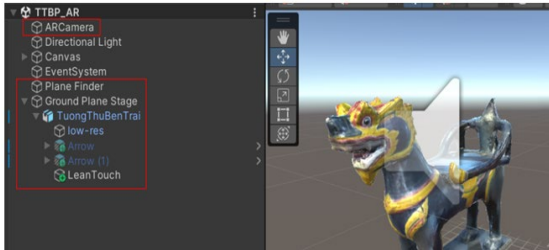
Hình 5. Nguyên lý hoạt động và công thức tính khoảng cách của cảm biến LiDAR

Trong quá trình thử nghiệm và đánh giá phần mềm hậu kỳ cho việc chỉnh sửa mô hình 3D thì Blender được sử dụng nhờ sự đa dạng trong công cụ chỉnh sửa, từ tạo mô hình mới, điều chỉnh, đến ánh xạ texture và hiệu chỉnh material, đặc biệt phù hợp với việc tiền xử lý mô hình quét 3D. Mặc dù Maya và 3D Max mang lại ưu điểm trong các lĩnh vực

chuyên biệt và SketchUp cung cấp cách hiển thị mô hình dễ dàng, nhưng Blender nổi bật với giao diện thân thiện và khả năng tương thích cao khi xử lý các mô hình 3D có mặt lưới tam giác tạo bởi quét 3D.

2.3. Áp dụng AR vào mô hình

Nghiên cứu này khám phá việc sử dụng thực tế tăng cường (AR) và nền tảng phát triển ứng dụng AR như AR Foundation và Vuforia để hiển thị mô hình cổ vật sinh động và đa tương tác. Mục tiêu chính là mang đến trải nghiệm chân thực về cổ vật cho người dùng mà họ không cần đến trực tiếp nơi trưng bày. AR Foundation hỗ trợ cả ARCore (Android) và ARKit (iOS) đồng thời cung cấp khả năng nhận diện mặt phẳng và tương tác dựa trên hình ảnh 2D. Vuforia với chức năng Model Target cho phép phát hiện mô hình thật và gắn các nội dung ảo lên đối tượng nên nổi bật trong việc phát triển ứng dụng AR chất lượng cao và dễ dàng tích hợp nền tảng phát triển ứng dụng Unity (Hình 6). Sau đánh giá tính tương thích và hiệu suất trên nhiều thiết bị, Vuforia được chọn vì khả năng phát hiện bề mặt nhanh, tương thích rộng rãi và thuận lợi trong phát triển ứng dụng di động bằng Unity.

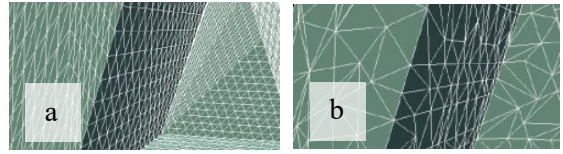


Hình 6. Mô hình 3D cổ vật xử lý trên Unity

2.4. Phương pháp Mesh Simplification

Để mô hình 3D hiển thị tốt và nhanh trên nền tảng web và di động việc giảm dung lượng mô hình là yếu tố quan trọng. Quá trình quét 3D thường tạo ra mô hình với số lượng lớn mặt lưới và bao gồm cả mặt phẳng không cần thiết làm tăng kích thước mô hình. Bên cạnh việc sử dụng phần mềm chỉnh sửa 3D để loại bỏ các mặt dư và bổ sung các mặt thiếu một cách thủ công, việc áp dụng các phương pháp giảm mật lưới toàn cục như Mesh Simplification cũng là bước quan trọng để giảm số mặt phẳng và kích thước tổng thể của mô hình đồng thời giữ được chất lượng và chi tiết của texture. Các phương pháp như Error Quadrics, Fast Quadric, Average Vertex Position và Median Vertex Position đều được đánh giá, mỗi phương pháp đều có ưu và nhược điểm riêng. Error Quadrics phát triển bởi Michael Garland và Paul S. Heckbert được chọn vì khả năng cân bằng hiệu quả giữa việc giảm kích thước và bảo toàn đặc điểm đặc trưng của cổ vật, giúp đảm bảo

mô hình 3D sau khi được tối ưu vẫn giữ được độ chính xác cao và tương tự với bản gốc (Garland & Heckbert, 1997) (Hình 7).



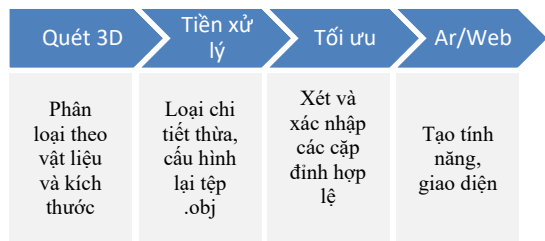
Hình 7. Mô hình trước (a) và sau khi áp dụng phương pháp giảm mật lưới Error Quadrics (b)

3. THIẾT KẾ VÀ CÀI ĐẶT

Quá trình nghiên cứu này bao gồm 4 giai đoạn được trình bày trong hình 8 bao gồm:

1. *Quét 3D cổ vật*: Thử nghiệm quét trên các kích cỡ và vật liệu của các cổ vật khác nhau.
2. *Tiền xử lý dữ liệu*: Loại bỏ chi tiết không cần thiết từ quá trình quét 3D sau đó định dạng lại tệp mô hình .obj
3. *Tối ưu hóa mô hình*: Áp dụng phương pháp Error Quadrics để đơn giản hóa lưới đa giác
4. *Phát triển ứng dụng*: Xây dựng website hiển thị mô hình 3D cổ vật và ứng dụng hiển thị AR

Mục tiêu cuối cùng là cung cấp trải nghiệm tương tác đa chiều với cổ vật thông qua công nghệ 3D và AR, từ đó mở rộng khả năng tiếp cận và hiểu biết về cổ vật. Các mô hình sau khi tối ưu phải đảm bảo được hình dáng và tỉ lệ không bị thay đổi ở mức sai khác với cổ vật gốc. Bề mặt vật liệu được tái hiệu đúng ở mức độ chi tiết phù hợp và quan trọng nhất là tốc độ hiển thị mô hình tốt và có thể tương tác mượt mà trên 2 nền tảng web và di động.

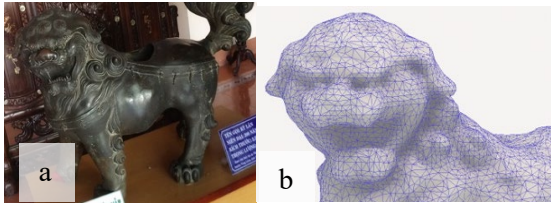


Hình 8. Quy trình phát triển ứng dụng

3.1. Quét mô hình 3D

Quá trình quét 3D các cổ vật được thực hiện bằng cảm biến LiDAR sử dụng ứng dụng Polycam. Để hiệu quả quét cao thì kỹ thuật viên phải di chuyển cảm biến quanh cổ vật với tốc độ phù hợp, giữ khoảng cách 1 m đến 2 m và đảm bảo quét đầy đủ 360 độ bao quanh cổ vật bao gồm cả mặt trên, mặt dưới và các góc khuất của vật. Quá trình quét chậm và ổn định sẽ tái tạo chi tiết một cách tốt nhất (Hình

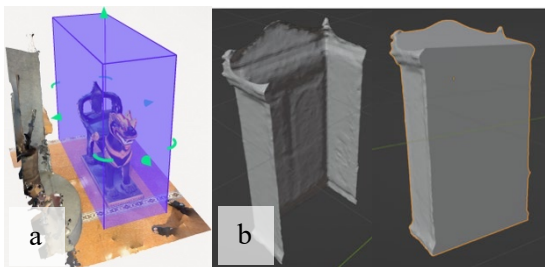
9). Điều kiện ánh sáng tốt cũng là yếu tố quan trọng giúp tái tạo bề mặt vật liệu một cách chính xác nhất đặc biệt là với vật liệu nhám có độ tán xạ ánh sáng cao. Tuy nhiên các bề mặt nhẵn và bóng có thể tạo ra hiện tượng bóng sáng làm giảm chất lượng của mô hình 3D. Đối với các vật liệu trong suốt như kính và mặt gương khi quét 3D thường gặp lỗi, một giải pháp được áp dụng là dựng lại mặt phẳng của chúng và áp dụng texture giả lập tính chất tương tự của vật liệu để giải quyết vấn đề.



Hình 9. Mô hình cổ vật trong thực tế (a) và lưới mô hình 3D sau khi quét (b)

3.2. Tiền xử lý mô hình

14 mô hình cổ vật sau khi được tạo bởi ứng dụng Polycam được xuất thành định dạng 3D là obj để có thông tin của vật liệu đi kèm với các bề mặt. Các file mô hình này được đưa vào phần mềm Blender để thực hiện tiền xử lý gồm 2 công đoạn chính. Đầu tiên là xóa đi các mặt phẳng thừa thường là mặt đất và đối tượng khác xuất hiện quanh cổ vật, sau đó đưa mô hình về tâm của không gian hiển thị. Cuối cùng là sửa lại các mặt phẳng bị lỗi cũng như tạo mới các mặt phẳng cho các mặt bị khuyết (Hình 10).



Hình 10. Quá trình cắt xén mặt phẳng dư (a) và thêm vào mặt phẳng bị khuyết (b)

Lưới đa giác sau khi được xử lý sẽ gồm nhiều thông tin các mặt phẳng có định dạng “f v1 v2 v3”. Trong đó v1, v2 và v3 là các thành phần của một đỉnh (vertex) trong mô hình 3D. Mỗi đỉnh đại diện cho một điểm trong không gian 3D và được xác định bởi ba giá trị: v1: Hoành độ (x); v2: Tung độ (y) và v3: Cao độ (z). Ngoài ra tệp mô hình 3D được sử dụng là .obj cũng có 2 thành phần phía sau mô tả thông tin về đỉnh lần lượt là:

- vt: Tọa độ kết cấu (texture coordinate) - xác định vị trí của đỉnh trên ảnh kết cấu.
- vn: Pháp tuyến (normal vector) - xác định hướng của mặt tại đỉnh.

Error Quadrics thực hiện với các thông tin của 3 tọa độ v của một đỉnh mà không cần sử dụng giá trị vt và vn. Một chương trình Python được phát triển để xóa đi 2 thuộc tính này của một đỉnh đồng thời cũng chia lại các mặt phẳng nhiều hơn 3 đỉnh thành các mặt phẳng tam giác. Kết quả là tệp obj mới đã được tối ưu hóa mà không làm mất chi tiết ban đầu (Hình 11).



Hình 11. Thông tin các đỉnh sau khi được tối ưu

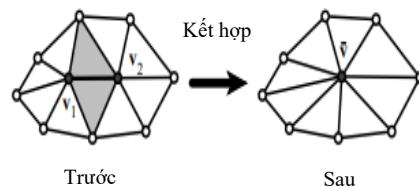
3.3. Tối ưu tệp 3D bằng phương pháp Error Quadrics

3.3.1. Xác định các cặp đỉnh hợp lệ

Các tiêu chí để xác định tính hợp lệ của việc ghép cặp hai đỉnh v_i và v_j trong mô hình lưới đa giác được triển khai, cụ thể là trên lưới tam giác. Định nghĩa về cặp đỉnh hợp lệ dựa trên hai tiêu chí: thứ nhất, v_i và v_j phải tạo thành một cạnh trên lưới đa giác; thứ hai, khoảng cách Euclid giữa chúng phải nhỏ hơn một ngưỡng t cho trước. Khoảng cách Euclid giữa hai điểm trong không gian ba chiều được tính bằng công thức (1):

$$t = \sqrt{(x_{v_i} - x_{v_j})^2 + (y_{v_i} - y_{v_j})^2 + (z_{v_i} - z_{v_j})^2} \quad (1)$$

Việc sáp nhập hai đỉnh thành một yêu cầu rằng cặp đỉnh này phải thỏa mãn các điều kiện nêu trên. Trường hợp hai đỉnh không đáp ứng được tiêu chí sẽ không được xem xét để sáp nhập (Hình 12).



Hình 12. Nhập cặp đỉnh hợp lệ thành đỉnh mới

Sau khi xác định được các cặp đỉnh hợp lệ, nhiệm vụ tiếp theo là tìm kiếm cặp đỉnh khi được sáp nhập có thể tạo ra sai số tối thiểu. Đầu tiên, quá trình này đòi hỏi việc tìm ra ma trận Q cho mỗi đỉnh v_i được xác định bằng công thức (2):

$$v_i = [x_{v_i}, y_{v_i}, z_{v_i}, 1]^T \quad (2)$$

Ở đây, mỗi đỉnh v_i được xem là điểm chung của nhiều mặt phẳng $planes(v_i)$, với mỗi mặt phẳng p được biểu diễn bởi vector theo công thức (3):

$$p = [a, b, c, d]^T \quad (3)$$

Vector p mô tả một mặt phẳng trong không gian ba chiều và tuân thủ phương trình $ax + by + cz + d = 0$ với điều kiện chuẩn hóa $a^2 + b^2 + c^2 = 1$.

Ma trận lỗi Q_i của mỗi v_i được xác định bởi công thức tổng quát (4):

$$Q_i = \sum_{p \in planes(v_i)} pp^T \quad (4)$$

Sau đó, ma trận lỗi tối ưu Q_{opt} được tính bằng cách cộng hai ma trận lỗi Q_i và Q_j từ cặp đỉnh hợp lệ v_i và v_j để tạo ra ma trận 4×4 Q_{opt} . Chỉ số lỗi tối thiểu $cost_{ij}$ được xác định qua công thức (5):

$$cost_{ij} = v^T Q_{opt} v \quad (5)$$

Điều này quyết định vị trí của đỉnh mới v_{opt} để sắp nhập cặp đỉnh, nhằm giảm thiểu sai số. Trong trường hợp ma trận Q_{opt} không thể nghịch đảo do định thức bằng không, đỉnh tối ưu v_{opt} được chọn dựa trên việc xác định trung điểm hoặc chọn v_i và v_j sao cho $cost_{ij}$ là nhỏ nhất.

Các cặp đỉnh được sắp xếp dựa trên chỉ số $cost_{ij}$, với cặp đỉnh có sai số nhỏ nhất được ưu tiên đầu tiên. Cặp đỉnh với $cost_{ij}$ nhỏ nhất sẽ bị loại và sắp nhập thành đỉnh mới v_{opt} . Sau đó cập nhật chỉ số $cost_{ij}$ cho tất cả các cặp liên quan, quá trình lặp lại cho đến khi đạt được giá trị tối ưu đã đặt ra. Qua quy trình này, mô hình 3D được đơn giản hóa ở các mức giá trị cho trước, đó đánh giá các mô hình ở từng giá trị tối ưu để chọn lựa. Tiêu chí chọn lựa là kích thước mô hình giảm nhưng vẫn giữ được mức độ chi tiết phù hợp và không biến dạng sau khi đơn giản mô hình.

3.4. Xây dựng website hiển thị mô hình 3D

Quá trình xây dựng website trưng bày mô hình 3D của các cổ vật gồm hai giai đoạn chính. Đầu tiên, tải lên và hiệu chỉnh mô hình 3D trên Sketchfab để đảm bảo chúng phản ánh chính xác họa tiết, màu sắc và chất liệu của cổ vật. Công cụ chỉnh sửa ánh sáng trên Sketchfab được sử dụng để làm mô hình nổi bật và sinh động hơn. Thứ hai, sử dụng nền tảng Wix để thiết kế và phát triển website, nhúng mã từ Sketchfab để hiển thị mô hình 3D (Hình 13). Website này bao gồm Header, Body, và Footer, với phần Body chứa Gallery hiển thị hình ảnh các cổ vật.

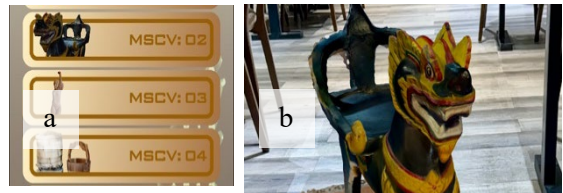
Mỗi hình ảnh trong Gallery dẫn đến trang thông tin chi tiết, nơi người xem có thể tương tác trực tiếp với mô hình 3D.



Hình 13. Mô hình 3D hiển thị trên website

3.5. Xây dựng ứng dụng bảo tàng AR

Quá trình này bắt đầu bằng việc tích hợp Vuforia vào Unity thông qua việc nhập App License Key từ Vuforia, cho phép nhận dạng và hiển thị AR. Mỗi Scene trong Unity chứa một mô hình cổ vật 3D, với ARCamera thay thế camera mặc định để hỗ trợ nhận dạng AR. Tính năng Ground Plane của Vuforia được thiết lập qua Plane Finder và Ground Plane Stage, cho phép mô hình 3D cổ vật xuất hiện trên các bề mặt phẳng thực tế kết hợp thao tác thu phóng và xoay để tăng tính tương tác (hình 14). Bên cạnh đó, chức năng Image Targets được phát triển để cung cấp khả năng nhận diện hình ảnh 2D và hiển thị mô hình AR tương ứng trên một tấm ảnh. Giao diện được thêm vào với các nút điều khiển và chức năng như Play và Pause để điều khiển âm thanh thuyết minh theo từng bộ phận hiển thị trên mô hình.



Hình 14. Giao diện ứng dụng (a) và mô hình hiển thị dạng AR (b)

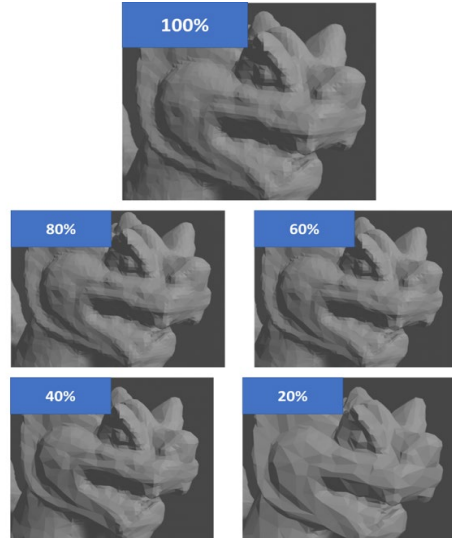
3.6. Kiểm thử

Hiệu quả của việc tối ưu mô hình 3D được đánh giá thông qua 2 tiêu chí là chất lượng hiển thị mô hình quan sát được sau khi tối ưu và tốc độ hiển thị mô hình trên nền tảng website và AR trên điện thoại.

Thiết bị di động dùng để kiểm thử là Google Pixel 6 sử dụng chip Tensor, RAM 8GB, ROM 128GB, được hỗ trợ ARCore. Đánh giá tốc độ load trên nền tảng Sketchfab.com. Cấu hình máy tính thử nghiệm là CPU AMD Ryzen R5600H, card màn hình RTX 3050 Ti, RAM 8GB 3200MHz. Tốc độ mạng ổn định ở 16.07 Mbps, idle latency ở mức 53 và download latency ở 109.

14 mô hình được thực hiện tối ưu ở các mức độ khác nhau, trong đó mức 100% là ở trạng thái nguyên bản sau khi quét. Tiến hành áp dụng giải thuật Error Quadrics để giảm dần số đỉnh giữ lại ở các mức 80%, 60%, 40% và 20% (Hình 15). Dung lượng file trung bình được trình bày tại Bảng 1.

Ở mức độ 20% thì dung lượng mô hình giảm trong khoảng 62% đến 84%, những chi tiết nhỏ bị mất đi không đáng kể và tổng thể mô hình không khác biệt với mô hình gốc. Dung lượng trung bình của các file 3D trung bình khoảng 1,14 Mb và nhẹ nhất có trường hợp chỉ khoảng 0,56 Mb. Chính vì vậy mức độ 20% được chọn cho việc tối ưu mô hình. Sau đó các mô hình 3D ở 100% và 20% đỉnh sẽ được đo tốc độ load hoàn thiện trên website Sketchfab (xác định dựa trên thanh time loading) và trên ứng dụng AR trên điện thoại (xác định dựa trên mô hình AR xuất hiện thành công trên bề mặt) (Bảng 1).



Hình 15. Các mức độ giảm số đỉnh của mô hình

Bảng 1. Trung bình dung lượng file và độ chi tiết của 14 mô hình ở mỗi mức độ giảm

Độ giảm	100%	80%	60%	40%	20%
Kích thước (Mb)	3,73	2,96	2,24	1,57	1,14
Độ chi tiết	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt

Bảng 2. So sánh tốc độ hiển thị mô hình sau 30 lần thử nghiệm

Thời gian hiển thị	Website	Di động
Mô hình 20% đỉnh	2,5 giây	1 giây
Mô hình 100% đỉnh	4,6 giây	1,7 giây

Với nền tảng website thì mô hình 3D 20% đỉnh đem lại tốc độ load thành công nhanh hơn khoảng 46,81%. Với phần hiển thị AR trên di động thì thời gian load gần như là lập tức, nhưng với các mô hình 100% đỉnh và có dung lượng lớn vào khoảng trên 10 M thì thời gian load thành công có trường hợp lên đến hơn 5s. Các mô hình này sau khi tối ưu ở 20% đỉnh thì đạt được tốc độ hiển thị lập tức và không còn tình trạng giật lag khi tương tác với mô hình.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã mở ra một hướng tiếp cận mới trong việc số hóa và hiển thị cổ vật qua việc tích hợp công nghệ quét 3D và thực tế tăng cường, đặc biệt tại ĐBSCL. Sử dụng cảm biến LiDAR trên thiết

bị di động và ứng dụng AR Vuforia, nghiên cứu đã phát triển một phương pháp hiệu quả để tái tạo và hiển thị cổ vật với độ chính xác cao về hình dạng, màu sắc và chất liệu. Qua việc áp dụng phương pháp Error Quadrics, nghiên cứu đã chứng minh khả năng giảm kích thước file mô hình 3D từ 60% đến 80% mà vẫn bảo toàn được chất lượng hiển thị qua quan sát, góp phần tăng tốc độ xử lý và giảm dung lượng lưu trữ đáng kể. Điều này không chỉ cải thiện trải nghiệm người dùng trên các nền tảng số mà còn mở ra cơ hội bảo tồn và phổ biến di sản văn hóa một cách rộng rãi và hiệu quả. Hướng phát triển tiếp theo của đề tài bao gồm việc nghiên cứu các kỹ thuật quét nâng cao chất lượng mô hình 3D; mở rộng ứng dụng công nghệ cho các bảo tàng và di sản văn hóa khác; nghiên cứu và áp dụng các độ đo như Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), và Hausdorff Distance để đo lường độ sai số của mô hình tối ưu và mô hình ban đầu. Cuối cùng là khuyến khích sự tham gia và hiểu biết sâu rộng về di sản văn hóa tại ĐBSCL nói riêng và cả nước nói chung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Champion, E., & Rahaman, H. (2020). Survey of 3D digital heritage repositories and platforms. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), 1-15. <https://doi.org/10.4995/var.2020.13226>

Đurić, I., Obradović, R., & Ralević, N. (2018). A review of augmented reality for architecture and cultural heritage visualization. *Boletim da Aproved*, 34, 65-72.

- https://doi.org/10.24840/2184-4933_2018-0034_0009
- Fadli, F., & Alsaeed, M. (2019). Digitizing vanishing architectural heritage; The design and development of Qatar historic buildings information modelling [Q-HBIM] platform. *Sustainability*, 11(9), 2501.
- Garland, M., & Heckbert, P. S. (1997). Surface simplification using quadric error metrics. *In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 209-216. <https://doi.org/10.1145/258734.258849>
- Hành, N. (2018). *Trung bày gần 1.000 hiện vật Gốm Óc Eo Nam Bộ*. <https://dantri.com.vn/van-hoa/trung-bay-gan-1000-hien-vat-gom-oc-eo-nam-bo-20170930230437034.htm>
- Herrmann, H., & Pastorelli, E. (2014). Virtual reality visualization for photogrammetric 3D reconstructions of cultural heritage. *In Augmented and Virtual Reality: First International Conference, AVR 2014, Lecce, Italy, September 17-20, 2014, Revised Selected Papers 1* (pp. 283-295). Springer International Publishing.
- Iadiy. (19). *LiDAR Sensor, laser scanner*. <https://www.iadiy.com/LIDAR-Scanner>
- Lợi, P. T. H., & Thanh, L. M. (2018). Xây dựng hệ thống thông tin về di tích thành cổ Quảng Trị dựa trên nền GIS và công nghệ 3D. *Hue University Journal of Science: Techniques and Technology*, 127(2A), 83-94. <https://doi.org/10.26459/hueuni-jtt.v127i2A.4970>
- Malik, U., Tissen, L. N. M., & Vermeeren, A. P. O. S. (2021). 3D reproductions of cultural heritage artifacts: Evaluation of significance and experience. *Studies in Digital Heritage*, 5(1), 1-29.
- Văn phòng Quốc hội. (2021). *Luật Di sản văn hóa* (số 28/2001/QH10). <https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?pageid=27160&docid=80239>
- VR3D.vn (2024). *Bảo Tàng Số Chămpa, Phù nam, Khmer... trong Nền Tảng Dữ Liệu 3D*. <https://vr3d.vn/trienlam/hoi-quan-champa>
- Yen, Y.-N., Wung, K.-H., & Huang. (2014). The conservation of traditional Chinese architectural heritage 3D modeling and metadata representation. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(2), 335-353. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.2.335>