RESEARCH AND APPLY PHOTOGRAMMETRY TECHNOLOGY TO RECONSTRUCT HISTORICAL ARTIFACTS AT MY SON'S MUSEUM IN THREE DIMENSIONS

Dang Truong Thinh
[1]*Van Lang University,* [2]*Arena Multi-media*

ARTICLE INFO

Received: 06/5/2024
Revised: 10/6/2024
Published: 11/6/2024

KEYWORDS

My Son's Museum
Photogrammetry
My Son 3D historical artifact
3D Scan
Images Analysis

ABSTRACT

This research aims to evaluate the applicability of the photogrammetry method in recreating historical artifacts at the My Son Museum in 3D models. By implementing photogrammetry theory, collecting and analyzing images, as well as conducting experiments, the research aims to refine the process of applying this technology in the field of cultural heritage preservation. The research results provide in-depth knowledge about photogrammetry and highlight the advantages of this technology in recreating historical artifacts. Additionally, the 3D models can be used to study, analyze, and effectively promote cultural heritage. The research then proposes a practical process for applying photogrammetry in recreating historical artifacts at the My Son Museum. This process includes steps such as image data collection, data processing and integration, 3D model creation, and model publishing. This process contributes to providing an effective solution for preserving and promoting cultural heritage, meeting the research, learning, and historical exploration needs of scientists, scholars, and the public.

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ PHOTOGRAMMETRY TÁI HIỆN CÁC HIỆN VẬT LỊCH SỬ TẠI BẢO TÀNG MỸ SƠN TRONG KHÔNG GIAN BA CHIỀU

Đặng Trường Thịnh
[1]*Trường Đại học Văn Lang,* [2]*Trường Mỹ thuật đa phương tiện Arena Multi-media*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 06/5/2024
Ngày hoàn thiện: 10/6/2024
Ngày đăng: 11/6/2024

TỪ KHÓA

Bảo tàng Mỹ Sơn
Photogrammetry
Di vật lịch sử ở Mỹ Sơn
Phép chiếu đa chiều
Phân tích ảnh

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm đánh giá tính ứng dụng của phương pháp photogrammetry trong việc tái hiện các hiện vật lịch sử tại bảo tàng Mỹ Sơn dưới dạng mô hình 3D. Bằng cách triển khai lý thuyết photogrammetry, thu thập và phân tích hình ảnh, cũng như tiến hành thực nghiệm, nghiên cứu nhằm hoàn thiện quy trình ứng dụng công nghệ này trong lĩnh vực bảo tồn di sản văn hóa. Kết quả nghiên cứu cung cấp kiến thức sâu rộng về photogrammetry và chỉ ra những ưu điểm của công nghệ này trong việc tái hiện các hiện vật lịch sử. Ngoài ra, mô hình 3D cũng có thể được sử dụng để nghiên cứu, phân tích và truyền bá di sản văn hóa một cách hiệu quả. Từ đó, nghiên cứu đề xuất một quy trình thực tiễn để áp dụng photogrammetry trong việc tái tạo các hiện vật lịch sử tại bảo tàng Mỹ Sơn. Quy trình này bao gồm các bước như thu thập dữ liệu hình ảnh, xử lý và tích hợp dữ liệu, tạo mô hình 3D, và xuất bản mô hình. Quy trình này góp phần cung cấp một giải pháp hiệu quả để bảo tồn và truyền bá di sản văn hóa, đáp ứng nhu cầu nghiên cứu, học tập và tìm hiểu về lịch sử của các nhà khoa học, học giả và công chúng.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10296

Email: ares.dang96@gmail.com

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh công nghệ số phát triển mạnh mẽ, việc ứng dụng công nghệ hiện đại để bảo tồn và quảng bá các giá trị di sản văn hóa là vấn đề đang được nhiều cơ sở bảo tàng quan tâm. Tại Việt Nam, Bảo tàng Mỹ Sơn là một trong những nơi lưu giữ hàng ngàn hiện vật, cổ vật quý giá của nền văn minh cổ Chăm Pa. Vì thế, việc ứng dụng phương pháp Photogrammetry để số hóa, tái hiện 3D các hiện vật tại Bảo tàng Mỹ Sơn là hết sức cấp thiết. Thông qua kết quả nghiên cứu [1], [2] của nhóm Loganatharaj và nhóm Falquet cho thấy việc ứng dụng photogrammetry trong tái hiện các kiến trúc lịch sử là hoàn toàn có khả năng đối với các trình tại nơi có ánh sáng mạnh và nhiệt độ cao tuy nhiên kế hoạch và quy trình thực hiện rất phức tạp đồng thời chi phí lớn chính là vấn đề. Trong một vài nghiên cứu khác [3] - [5] của nhóm Gonizzi Barsanti, Adhikari, Demirel việc ứng dụng photogrammetry lại gặp các vấn đề trong việc xử lí chất lượng hình ảnh và hạn chế ánh sáng, nghiên cứu [6], [7] của nhóm Carini và Chiabrando lại cho thấy những vấn đề và thách thức lớn do bóng râm gây ra trong quá trình thực hiện photogrammetry. Trong bài viết này ngoài cung cấp thông tin về khái niệm photogrammetry còn đề xuất ra quy trình thực nghiệm đơn giản hóa nhằm xử lý hình ảnh để tái tạo lại các đối tượng, vật thể ở dạng 3D, cung cấp giải pháp xử lí bóng râm bằng phần mềm thay vì phương pháp thủ công truyền thống. Đánh giá và cung cấp giá trị thực nghiệm trong việc ứng dụng phương pháp photogrammetry để tái hiện các hiện vật lịch sử tại bảo tàng Mỹ Sơn.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trước khi nghiên cứu thực nghiệm, tác giả tìm hiểu và vận dụng các khái niệm, lý thuyết liên quan đến photogrammetry để phân tích, tổng hợp quy trình cơ bản. Tác giả tiến hành khảo sát, thu thập thông tin về địa điểm nghiên cứu là Bảo tàng Mỹ Sơn trước khi triển khai thực nghiệm thực tế. Dựa trên thông tin thu thập được tác giả lên kế hoạch chi tiết cho việc khảo sát thực địa, chụp ảnh và phân tích các hiện vật tại bảo tàng Mỹ Sơn. Quá trình lấy mẫu ảnh được tiến hành cẩn thận để phục vụ cho nghiên cứu. Sau khi thu thập thông tin, dữ liệu ta tiến hành xử lí và phân tích hình ảnh nhằm khắc phục các vấn đề về chất lượng ảnh. Các phần mềm chuyên dụng được sử dụng để tác động lên đối tượng nghiên cứu nhằm đạt được kết quả tối ưu và chính xác nhất. Bên cạnh đó, trong quá trình nghiên cứu, tác giả đã sử dụng phương pháp phân tích tổng hợp để mô tả quy trình thực hiện dựa trên kết quả nghiên cứu và thực nghiệm. Cuối cùng, tác giả đưa ra kết luận và nhận xét về nghiên cứu của mình.

2.1. Kiến thức tổng quát về công nghệ photogrammetry

Khái niệm về photogrammetry đã được McGlone trình bày như sau: "Photogrammetry là phương pháp xác định hình dạng, kích thước và vị trí của các đối tượng bằng cách đo đạc và phân tích các bức ảnh chụp từ nhiều góc độ khác nhau. Phương pháp này dựa trên nguyên lý cơ bản của thị giác con người để tính toán vị trí và kích thước các đối tượng từ ảnh, từ đó tái tạo lại mô hình 3D chính xác" [8].

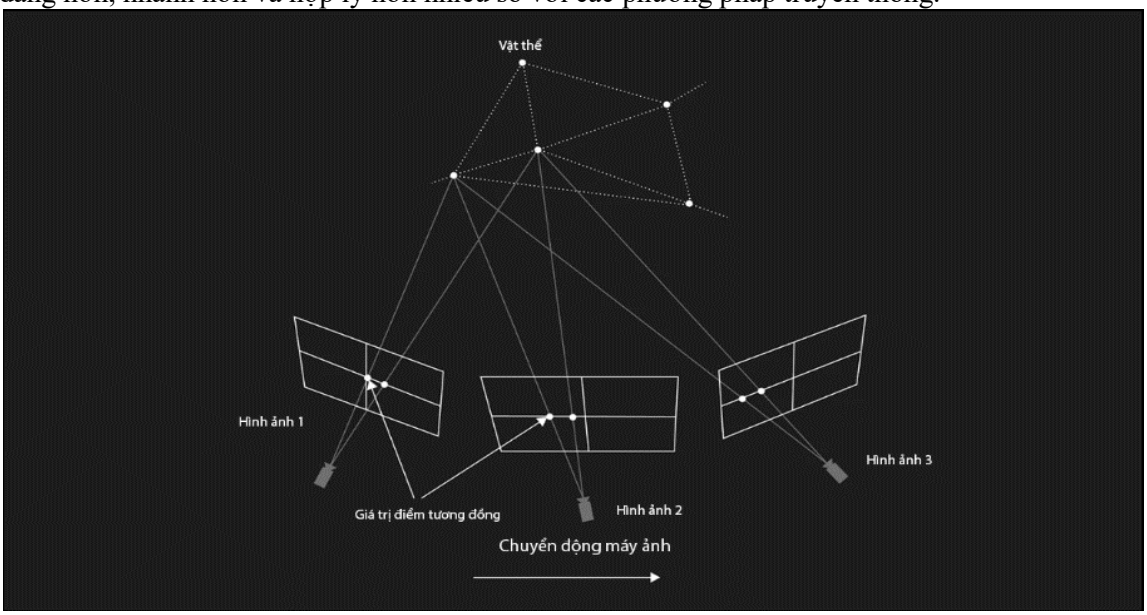
Ngoài ra thuật ngữ photogrammetry cũng được trình bày cụ thể như sau: "Photogrammetry là một kỹ thuật để lấy thông tin về các đối tượng vật lý và môi trường bằng cách ghi lại, đo đạc và diễn giải hình ảnh" bởi Paul Wolf [9].

Kỹ thuật này ra đời từ thế kỷ 19 với mục đích lập bản đồ và khảo sát địa hình. Tuy nhiên, sự phát triển vũ bão của công nghệ máy tính và kỹ thuật số đã mở rộng phạm vi ứng dụng của photogrammetry. Ngày nay, photogrammetry được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp, kiến trúc, bảo tồn di sản văn hóa, khảo cổ học, y tế. Thế mạnh của kỹ thuật này là khả năng chuyển đổi các bức ảnh 2D thành mô hình 3D chính xác mà không cần tiếp xúc trực tiếp với đối tượng. Điều này giúp lưu giữ và bảo tồn các hiện vật, di tích lịch sử như tượng đài, đền đài, mộ mả... một cách khoa học. Ngoài ra, photogrammetry còn rất tiện lợi, nhanh chóng và chi phí thấp so với các công nghệ khác như quét laser 3D. Nhìn chung, việc ứng dụng công nghệ

photogrammetry sẽ còn phát triển mạnh mẽ trong tương lai, góp phần quan trọng trong việc bảo tồn và phục dựng các di sản văn hóa thế giới. Đồng thời, nó cũng mở ra nhiều cơ hội nghiên cứu và khám phá mới trong nhiều lĩnh vực khoa học khác.

Phần mềm kỹ thuật hoạt động bằng cách chụp các ảnh chồng lên nhau được minh họa ở Hình 1 và xử lí các thông tin trên từng tấm ảnh nhận được, sau đó trích xuất thông tin từ ảnh về phong cảnh và vật thể, đồng thời sử dụng thông tin đó để căn chỉnh, kết cấu và chia lưới hình ảnh để tạo mô hình 3D bao gồm cả màu sắc và hình dạng

Mặc dù phép chụp ảnh có một số hạn chế nhỏ, nhưng nó có khả năng tạo ra dữ liệu có độ chính xác cao như các mô hình 3D và bản ghi thực tế về phong cảnh hoặc đối tượng theo cách dễ dàng hơn, nhanh hơn và hợp lý hơn nhiều so với các phương pháp truyền thống.



Hình 1. *Nguyên lí hoạt động của Photogrammey*

2.2. Khảo sát thực địa, thông tin về bảo tàng Mỹ Sơn

2.2.1. Về bảo tàng Mỹ Sơn

Nằm kề bên di tích Khu đền tháp Mỹ Sơn được UNESCO công nhận là Di sản văn hóa thế giới, Bảo tàng Mỹ Sơn là nơi lưu giữ, bảo tồn và giới thiệu những giá trị lịch sử, văn hóa độc đáo của nền văn minh cổ Chăm Pa. Bảo tàng Mỹ Sơn được xây dựng tại khe núi Khẽ, cách khu di tích Mỹ Sơn khoảng 2 km, là tòa nhà 2 tầng với kiến trúc hài hòa cảnh quan. Khởi công xây dựng từ năm 1994 và hoàn thành vào năm 2003 với tổng kinh phí đầu tư gần 35 tỷ đồng. Bảo tàng gồm khu vực trưng bày ngoài trời và trong nhà với tổng diện tích trên 2000 m^2. Khu vực trưng bày ngoài trời là các mô hình kiến trúc tái hiện các đền, tháp điêu khắc đặc trưng của Mỹ Sơn như tháp B1, tháp B5, đền D1... ở tỷ lệ 1/10, giúp du khách hình dung rõ nét kiến trúc nghệ thuật tinh xảo của người Chăm xưa.

Bên trong bảo tàng là các phòng trưng bày chủ đề với hàng ngàn hiện vật, cổ vật quý giá được khai quật tại di tích Mỹ Sơn như đồ gốm, đồ đồng, vàng bạc, đá quý, tượng thần... Các hiện vật được sắp xếp khoa học, có hệ thống, phản ánh mọi mặt đời sống vật chất và tinh thần của người Chăm cổ đại.

2.2.2. Khảo sát thực địa phân tích mẫu và chia các nhóm di vật lịch sử

Để quá trình thực hiện được diễn ra thuận lợi và phù hợp với từng đối tượng đề xuất phân chia các nhóm hiện vật sau để ứng dụng công nghệ photogrammetry một cách hiệu quả:

Nhóm kiến trúc: Bao gồm các mô hình và hiện vật kiến trúc điêu khắc đá như cột, tượng, bia ký, mảng chạm... của các ngôi đền tháp Mỹ Sơn. Đây là nhóm hiện vật lớn, cần độ chi tiết và chính xác cao khi tái tạo 3D. Đối với nhóm này cần đặc biệt sử dụng máy bay không người lái (drone) bay xung quanh các mô hình kiến trúc, chụp ảnh 360 độ. Sau đó xử lý bằng phần mềm photogrammetry để tái tạo 3D chi tiết.

Nhóm đồ thờ tự: Gồm các hiện vật nhỏ hơn như đồ đựng hương, chuông, khánh, ấn tín... dùng trong các nghi lễ thờ cúng. Nhóm này cần độ chính xác cao để thể hiện các họa tiết trang trí.

Nhóm đồ gốm: Bao gồm các hiện vật gốm vẽ, gốm hoa nâu thời Chăm pa như bình, đĩa, ấm chén, thạp... Đây là các hiện vật nhỏ, cần tái tạo chi tiết bề mặt.

Nhóm vũ khí: Gồm các mũi tên, ngọn giáo, kiếm, khiên... bằng đồng hoặc sắt của thời Chăm pa. Nhóm hiện vật này nhỏ gọn, cần độ chính xác cao. Nhóm trang sức: Là các hiện vật trang sức bằng vàng, bạc, đá quý như nhẫn, lắc tay, vòng đeo cổ, bông tai... của các tầng lớp quý tộc Chăm pa. Cần tái tạo chi tiết các họa tiết trang trí tinh xảo.

Ngoại trừ nhóm kiến trúc và điêu khắc thì các nhóm còn lại với kích thước nhỏ, hầu hết chúng ta sẽ đề xuất dùng máy ảnh chuyên dụng chụp nhiều góc độ khác nhau xung quanh hiện vật. Xử lý bằng phần mềm (Reality capture) để tạo mô hình 3D.

2.3. Phân tích mẫu xử lí và đưa ra quy trình cách thức tiến hành thực nghiệm

Đầu tiên, chúng ta cần chụp một bức ảnh tổng thể của đối tượng để đảm bảo không bỏ sót chi tiết nào khi ghép các bức ảnh lại với nhau, và giảm thiểu việc phải sắp xếp thủ công. Sau đó, chúng ta sẽ chụp sát từng chi tiết càng nhiều càng tốt, thậm chí cần chụp thêm một lượt nữa để thu được chi tiết từ nhiều góc nhìn nhỏ. Để mục đích số hóa các đối tượng vật lý, phép chụp ảnh cần ghi lại hai thuộc tính. Thứ nhất, cần đo vị trí của từng điểm trên bề mặt đối tượng. Thứ hai, bản chất của mỗi điểm (ví dụ: màu sắc, độ trong suốt, độ phản chiếu) cần được xác định. Để thu thập thông tin không gian, chúng ta cần có một loạt ảnh (ít nhất 2 nhưng thường hàng chục đến hàng trăm) chụp từ nhiều góc độ. Các thuật toán sẽ so sánh các phân đoạn hình ảnh và sự chuyển động tương đối của chúng giữa các bức ảnh. Quá trình này tương tự cách mà con người nhận biết độ sâu thông qua thị sai chuyển động, cho phép đánh giá khoảng cách dựa trên tốc độ chuyển động của các đối tượng trong tầm nhìn. Từ đó, vị trí tương đối của mỗi bức ảnh và thông số máy ảnh được ước tính. Quy trình này cho phép chụp, số hóa các hiện vật lịch sử phục vụ mục đích giáo dục và bảo tàng. Trong trường hợp có bóng, cần dùng một màn lọc làm giảm cường độ ánh sáng khi chụp. Sau đó vẫn cần xử lý thêm để giảm bóng. Để chụp thuận lợi, cần di chuyển máy sau mỗi lần chụp thay vì giữ cố định trên chân máy. Việc chỉ xê dịch hoặc xoay máy có thể dẫn đến trùng lặp góc nhìn và chi tiết trong các bức ảnh. Cần tránh ghép góc chụp như Hình 1. Nền cần có đủ độ tương phản về màu sắc so với đối tượng. Cần tối thiểu 150-200 bức ảnh để tổng hợp và phân tích, tuy nhiên chụp càng nhiều càng tốt để xử lý và tạo mô hình 3D dễ dàng hơn. Lưu ý không được di chuyển vị trí vật trong suốt quá trình chụp.

Sau khi hoàn thành mô hình wireframe ban đầu, đến lúc xây dựng chi tiết cho mô hình 3D. Các kỹ thuật như texture mapping sẽ được áp dụng để tạo ra bề mặt giống thực tế nhất có thể, với màu sắc và kết cấu chính xác. Mỗi đường nét, hoa văn hay chi tiết nhỏ nhất trên hiện vật đều cần được tái hiện một cách tỉ mỉ và trung thực Quá trình này đòi hỏi sự kiên nhẫn và tỉ mỉ cao độ không ngừng điều chỉnh và cải thiện mô hình để đạt được độ phân giải và độ chi tiết mong muốn.

Việc so sánh liên tục với hiện vật thật là bắt buộc để đảm bảo tính chính xác tuyệt đối của mô hình 3D.

Cuối cùng, khi mô hình 3D đạt yêu cầu về mặt chất lượng, nó sẽ được xuất bản sang định dạng phù hợp và tích hợp vào các ứng dụng như nghiên cứu, trưng bày thực tế ảo hay các nền tảng giáo dục. Những mô hình 3D chi tiết này sẽ trở thành tài nguyên quý giá, giúp thu hút khách tham quan tìm hiểu về lịch sử và văn hóa một cách sinh động, trực quan hơn bao giờ hết.

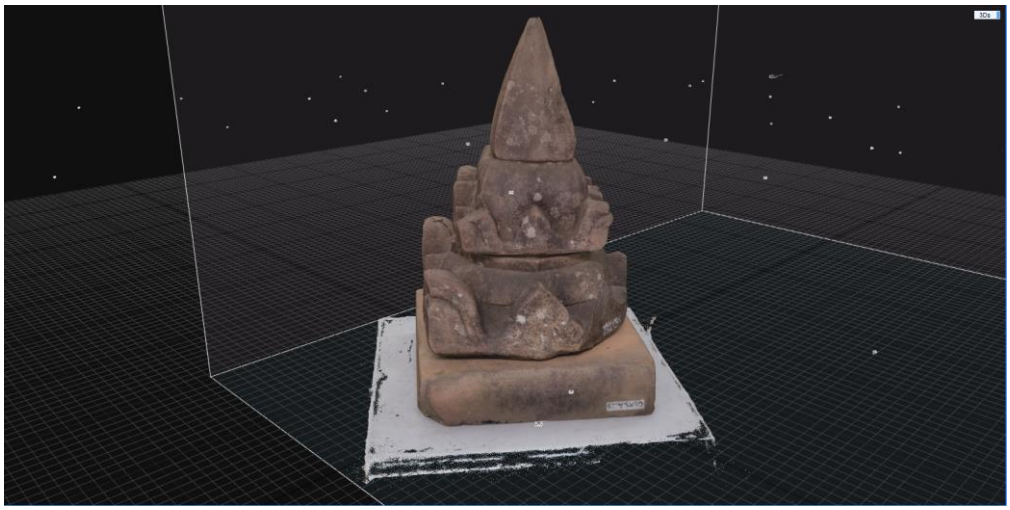
3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Kết quả thực nghiệm

Sau khi thực nghiệm và xử lí kết quả đạt được cho thấy. Hoàn toàn có thể tạo ra mô hình 3D của hiện vật lịch sử với độ chi tiết cao mà không phụ thuộc vào vấn đề ánh sáng. Bằng cách xử lí bóng của vật thể bằng phần mềm chuyên dụng, thực nghiệm đã cho ra mô hình có chất lượng rất cao sau khi xử lí bóng vật thể do quá trình chụp gây ra bằng cách thực hiện phân tách bóng bằng "Delighter". Hình 2 thể hiện một vật thực nghiệm khác trước và sau khi xử lí phân tách bóng và ánh sáng từ đó cho thấy mức độ khả thi trong việc khắc phục các nhược điểm về ánh sáng và bóng của vật qua thực nghiệm.

Hình 2. *Kết quả xử lí phân tách bóng và ánh sáng được thực hiện bởi tác giả*

Việc tạo ra vật thể có chi tiết và chất lượng cao còn phụ thuộc vào tay nghề và phương pháp xử lý như: Sử dụng phần mềm phụ trợ, tăng thêm một số nguồn sáng phụ, chọn thời điểm thu thập hình ảnh hợp lí (trời nắng không gắt, không mưa,...). Hoàn thiện và xây dựng một quy trình cụ thể chính xác trong việc tái hiện các hiện vật lịch sử trong không gian ba chiều thể hiện như Hình 3 và Hình 4.



Hình 3. *Tượng sinh thực khí 1300 năm tuổi tại bảo tàng Mỹ Sơn đã qua xử lí bởi tác giả*

Hình 4. *Mô hình được tạo và xử lí bởi tác giả trong không gian ba chiều*

3.2. Nhận định

Việc ứng dụng công nghệ Photogrammetry để tạo ra các hình ảnh 3D chi tiết của các hiện vật lịch sử tại Bảo tàng Mỹ Sơn mang lại nhiều lợi ích to lớn trong việc bảo tồn, trưng bày và giới thiệu các giá trị văn hóa đến công chúng. Với khả năng mô phỏng lại các hiện vật ở dạng 3D chân thực, các hình ảnh này có thể được sử dụng hiệu quả để xây dựng các trưng bày thực tế ảo, giúp du khách có thể chiêm ngưỡng và tìm hiểu các hiện vật một cách trực quan, sinh động, thay vì chỉ quan sát qua hình ảnh 2D truyền thống.

Các mô hình 3D có thể được xoay, phóng to thu nhỏ, quan sát từ nhiều góc độ khác nhau, giúp du khách dễ dàng nhận biết các chi tiết tinh tế về hình dạng, kết cấu, hoa văn trang trí của từng hiện vật. Bên cạnh đó, công nghệ thực tế ảo (VR) có thể được kết hợp để tạo ra các trải nghiệm tham quan ảo cho du khách. Du khách có thể được đưa vào một thế giới ảo 3D chi tiết của bảo tàng và các hiện vật, có cảm giác như đang đứng trước chính các hiện vật thật.

Bảo tàng có thể xây dựng các ứng dụng trên website, phần mềm dành cho thiết bị di động để du khách có thể tương tác với các mô hình 3D ngay cả khi không đến bảo tàng. Việc này giúp phổ biến rộng rãi hơn đến công chúng các giá trị văn hóa, thu hút sự quan tâm đến tham quan bảo tàng thực tế. Ngoài ra, các hình ảnh 3D còn được sử dụng trong các ấn phẩm quảng cáo, sách giới thiệu, poster, backdrop của bảo tàng để thu hút khách du lịch.

Bên cạnh việc sử dụng cho trưng bày, các mô hình 3D còn là tư liệu quý giá phục vụ công tác nghiên cứu, bảo tồn các hiện vật. Các nhà nghiên cứu có thể dựa vào đó để phân tích kỹ lưỡng từng chi tiết, so sánh với các tư liệu khảo cổ học khác mà không cần tiếp xúc trực tiếp với hiện vật thật, giúp giảm thiểu rủi ro hư hỏng.

4. Kết luận

Bằng cách triển khai lý thuyết photogrammetry và tiến hành thực nghiệm, xử lí các dữ liệu hình ảnh thu thập được cho ra kết quả rằng các mẫu di vật hoàn toàn có thể được tạo ra với chất lượng và chi tiết rất cao. Khắc phục các nhược điểm dẫn đến việc ảnh hưởng đến chất lượng và chi tiết của mẫu vật. Việc sử dụng các phần mềm xử lí phụ trợ đồng thời áp dụng một số nguyên

tắc trong quá trình thực hiện đã mang lại kết quả khả quan. Cuối cùng là việc chú trọng trong khâu xử lí ảnh hưởng cực kì cao đối với chất lượng của thành phẩm.

Ứng dụng công nghệ photogrammetry để tái hiện các hiện vật lịch sử trong không gian ba chiều tại Bảo tàng Mỹ Sơn đã đem lại nhiều lợi ích to lớn trong việc bảo tồn, trưng bày và phổ biến các giá trị văn hóa Chămpa đến công chúng. Với khả năng mô phỏng chân thực các hiện vật dưới dạng mô hình 3D chi tiết, công nghệ này mở ra cơ hội xây dựng những trải nghiệm tương tác, trực quan và sinh động hơn nhiều so với hình thức truyền thống.Các mô hình 3D có thể được tích hợp vào các không gian trưng bày thực tế ảo (VR), cho phép du khách được chiêm ngưỡng, khám phá từng chi tiết của hiện vật như đang đứng trước chính vật thể thật. Các thành tựu của nghiên cứu này sẽ là nguồn cảm hứng và định hướng cho các công trình nghiên cứu tiếp theo, góp phần phát triển hơn nữa ứng dụng khoa học kỹ thuật vào bảo tồn, trưng bày và giáo dục di sản văn hóa tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] R. Loganatharaj, A. M. Ganeshamoorthy, and A. Paramasivam, "Photogrammetric 3D Reconstruction of Tanjore Big Temple, India," *Heritage*, vol. 6, no. 1, pp. 275–293, Jan. 2023, doi: 10.3390/heritage6010015.

[2] A. Falquet, S. Yastikli, and Y. Arayici, "Integrating Photogrammetry with HBIM for Cultural Heritage Representation," *Sustainability*, vol. 14, no. 12, p. 7455, Jun. 2022, doi: 10.3390/su14127455.

[3] S. Gonizzi Barsanti, G. Caroti, N. Piemonte, and J. Teixidó Estudis, "Heritage3D: Photogrammetric Acquisition and 3D Reconstruction of Immovable Cultural Heritage," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 6, p. 1470, Mar. 2022, doi: 10.3390/rs14061470.

[4] R. S. Adhikari, H. Moreira, and J. F. C. A. Oliveira, "Digital photogrammetric documentation and 3D reconstruction of heritage buildings in India," *Heritage*, vol. 5, no. 1, pp. 367–393, Mar. 2022, doi: 10.3390/heritage5010020.

[5] Ö. Demirel, "Photogrammetric survey for 3D reconstruction of historical buildings in Safranbolu, Turkey," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLVI-M-1-2022, pp. 191–198, Jun. 2022, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2022-191-2022.

[6] L. Carini and G. Rizzi, "Digital 3D reconstruction of archaeological Heritage monuments using photogrammetry," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 47, pp. 83–93, 2021.

[7] F. Chiabrando, A. Spanò, F. G. Tonolo, and N. Testa, "Dealing with Shadows in Photogrammetric 3D Reconstruction," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. V-2-2022, pp. 157–164, 2022.

[8] E. M. Mikhail, J. S. Bethel, and J. C. McGlone, *Introduction to Modern Photogrammetry*. Wiley, 2001.

[9] P. Wolf, B. DeWitt, and B. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2014.