



DOI:10.22144/ctujos.2023.155

ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN ƯỚC LƯỢNG ĐỘ CAO BỜ SÔNG SỬ DỤNG MÁY ẢNH BA CHIỀU

Nguyễn Văn Khanh^{1*}, Phạm Đan Điền², Lê Trần Đăng Khoa² và Nguyễn Chí Ngôn¹

¹Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

²Sinh viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Văn Khanh (email: vankhanh@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 16/12/2022

Ngày nhận bài sửa: 27/12/2022

Ngày duyệt đăng: 01/01/2023

Title:

Proposed algorithm to estimate riverbank elevation using 3d camera

Từ khóa:

Độ cao bờ sông, máy ảnh 3D, máy ảnh 3D Orbbec Astra, mô hình độ sâu

Keywords:

Riverbank elevation, 3D camera, Orbbec Astra 3D camera, depth elevation model

ABSTRACT

The study aims to propose an algorithm to estimate the riverbank elevation using a three-dimensional (3D) camera. 3D camera is applied to collect the depth map of the area of interest. Then, the geometric computer vision is utilised to estimate the relative elevation of the point in the image coordinate. The estimated elevation data in the image field will be converted into a real world coordinate system and a geographic coordinate system to increase the applicability. Experimental results show that the proposed method has a MAE (Mean-absolute error) of 0,025. The results of in-situ measurement prove the proposed method well estimated the riverbank's elevation. However, the field estimation error has not been evaluated due to the lack of conditions to collect the reference data.

TÓM TẮT

Mục tiêu của nghiên cứu này là đề xuất thuật toán ước lượng độ cao ven bờ sông sử dụng máy ảnh 3 chiều (3D). Máy ảnh 3D được sử dụng để thu thập trực tiếp dữ liệu độ sâu trường ảnh của khu vực cần đo. Sau đó, các phương pháp hình học trong thị giác máy tính được áp dụng để ước lượng độ cao của điểm cần đo trong trường ảnh. Độ cao trong trường ảnh sẽ được chuyển đổi sang hệ tọa độ thực và hệ tọa độ địa lý để tăng tính ứng dụng. Kết quả thử nghiệm cho thấy phương pháp ước lượng độ cao được đề xuất có sai số MAE là 0,025 m. Kết quả đo thực địa chứng minh được phương pháp đề xuất đã ước lượng thành công độ cao của bờ sông. Tuy nhiên, sai số ước lượng thực địa chưa được đánh giá do không đủ điều kiện bố trí thí nghiệm đo độ cao đối chứng.

1. GIỚI THIỆU

Mô hình độ cao DEM (Depth elevation model) là một trong những dữ liệu rất quan trọng trong các mô hình phân tích động lực học dòng chảy, mô phỏng lũ lụt. Dữ liệu độ cao được thu thập bằng nhiều phương pháp khác nhau tùy vào khu vực quan tâm. Đối với độ cao đáy sông, biển (còn gọi là địa mạo) thì máy ADCP (đơn tia, đa tia) hay máy quét

Sonar là những phương pháp thu thập tự động phổ biến và rất hiệu quả. Tuy nhiên, hạn chế chung của các giải pháp tự động này là không thể đo độ cao khu vực gần bờ sông do phương tiện đo không thể tiếp cận. Các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực này mô phỏng thủy lực sông cũng đã nhận ra điều này (Andes & Cox, 2017; Hilton et al., 2019). Vì vậy, việc đề xuất một giải pháp hiệu quả để thu thập độ cao của khu vực gần bờ sông sẽ rất hữu ích.

Nhiều phương pháp thu thập dữ liệu độ cao ứng dụng máy ảnh đã được các nhà khoa học đề xuất. Trong đó, hệ thống hai máy ảnh là giải pháp được quan tâm nhất và được áp dụng trong nhiều ứng dụng như: đánh giá hiện trạng mặt đường (Brunken, 2021), đo sóng hay xác định hướng sóng dựa vào độ cao mặt nước (Molfetta et al., 2020; Vieira et al., 2020) và nhiều ứng dụng dựa vào độ cao bề mặt khác nữa. Các nghiên cứu này đã chứng minh được tính hiệu quả, nhưng để có thể áp dụng cần am hiểu các thuật toán xử lý ảnh hay thị giác máy tính. Thu thập độ cao phối hợp với UAV (Unmanned aerial vehicle) cũng là một xu hướng phổ biến hiện nay. Một số nghiên cứu ứng dụng xu hướng này đã được công bố như: thu độ cao bờ sông, giám sát xói lở bờ sông (Flener et al., 2013), thu thập độ cao diện rộng (Stefanik et al., 2011). Công nghệ quét laser đã được ứng dụng trong thu thập độ cao bờ sông (Hyypä et al., 2000; Longoni et al., 2016). Việc phối hợp với UAV hay sử dụng laser cho kết quả đo chính xác, dễ dàng thu thập diện rộng nhưng chi phí đầu tư rất lớn.

Nghiên cứu này đề xuất một thuật toán ước lượng độ cao bờ sông sử dụng máy ảnh 3D hay máy ảnh độ sâu. Độ sâu trường ảnh được thu trực tiếp từ máy ảnh 3D, sau đó dựa vào hình học thị giác máy tính để ước lượng độ sâu thực của không gian đo, chuyển đổi kết quả đo về hệ tọa độ thật và hệ tọa độ địa lý. Độ chính xác của phương pháp đề xuất được kiểm chứng tại phòng thí nghiệm trước khi đo đạt thực địa. Máy ảnh Orbbec Astra Pro 3D (Astra, 2022) loại trong nhà được sử dụng để đánh giá thuật toán đề xuất để tiết kiệm chi phí thực hiện.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan về phương pháp

Với mục tiêu đo độ cao bờ sông trong vùng hoạt động của máy ảnh như minh họa trong Hình 1, ý tưởng đề xuất là sử dụng độ sâu trường ảnh hay khoảng cách z từ điểm cần đo đến máy ảnh kết hợp với góc β sẽ xác định được độ cao h của điểm cần đo. Độ cao này hoàn toàn có thể quy về cao độ quốc gia hoặc so với mực nước trung bình nếu biết được độ cao (so với cao độ quốc gia) của vị trí đặt máy ảnh hoặc biến động mực nước h_2 theo thời gian, h_1 phụ thuộc vào cách lắp đặt máy ảnh.

Mặt phẳng song song với mặt đất đi qua máy ảnh 3D được sử dụng làm cao độ tham chiếu ($h = 0$ m). Tất cả cao độ trong nghiên cứu sẽ tham chiếu đến mặt phẳng này. Tham chiếu của dữ liệu sẽ được thay đổi dễ dàng nếu biết cao độ quốc gia của vị trí đặt máy ảnh.



Hình 1. Hình ảnh mô tả tổng quát thuật toán

Như vậy, cao độ của vùng không gian mà máy ảnh đang chụp được ước lượng dựa vào độ sâu trường ảnh thu được từ máy ảnh 3D, tính toán tọa độ của các điểm ảnh trong không gian thực cũng như đề xuất giải pháp chuyển sang hệ tọa độ địa lý. Các thuật toán được đề xuất và trình bày trong các phần tiếp theo của bài báo này.

2.2. Giải thuật ước lượng độ cao từ độ sâu trường ảnh

Giả sử máy ảnh đặt song song với mặt đất, hình 2a là biểu diễn hình học h_{uv} độ cao thực tế của một điểm bất kỳ trên tọa độ ảnh tại điểm $P(u,v)$ bất kỳ. Hình 2b là biểu diễn các thông số trong không gian hai chiều. Độ cao h_{uv} được xác định bằng biểu thức (1) như sau:

$$h_{uv} = z_{uv} \tan(\alpha_{uv}), \quad (1)$$

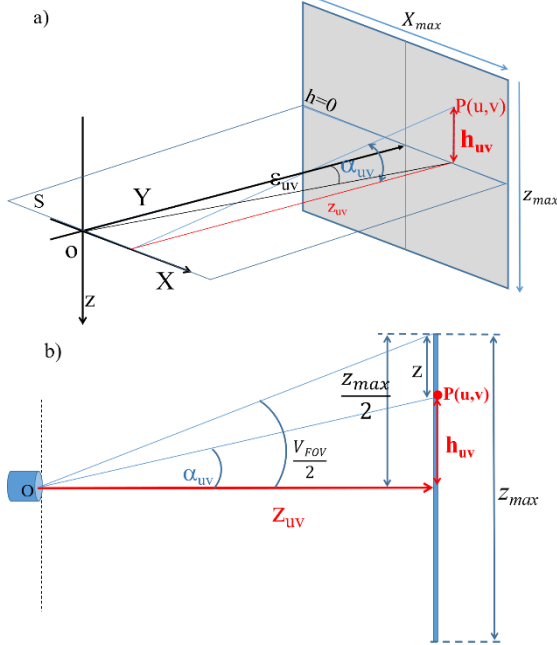
với góc α_{uv} được xác định gián tiếp từ u và u_{max} bởi biểu thức (2) như sau:

$$\alpha_{uv} = \frac{\left(\frac{u_{max}}{2} - u\right)}{\frac{u_{max}}{2}} \times \frac{V_{FOV}}{2}, \quad (2)$$

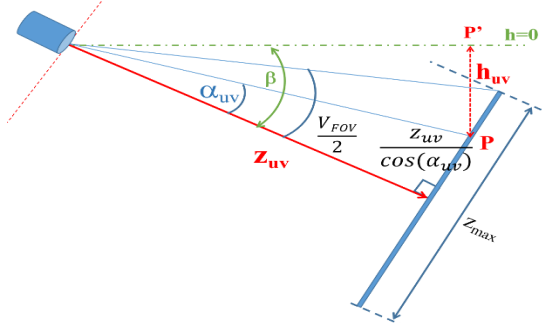
trong đó, độ phân giải ảnh được xét là 640x480 và (u,v) là tọa độ màn hình của điểm P đang xét đơn vị là pixel; S là mặt phẳng qua tâm máy ảnh và song song với mặt đất, tất cả các điểm trên mặt phẳng này đều có $z = 0$ (gọi là mặt tham chiếu); P là điểm giả định cần tìm độ cao, có tọa độ (u,v) trong trường ảnh; α_{uv} là góc tạo bởi đoạn OP và mặt phẳng S ; z_{uv} là khoảng cách từ tâm máy ảnh đến điểm P ; V_{FOV} là góc mở tối đa theo chiều dọc của máy ảnh 3D; h_{uv} là khoảng cách từ điểm P đến mặt phẳng tham chiếu hay độ cao tương đối của điểm cần đo, đơn vị là m.

Tuy nhiên, trong thực tế để linh hoạt trong việc đo đạt, thay vì máy ảnh được đặt song song với mặt đất, nó nên có thể hiệu chỉnh theo phương thẳng đứng một góc β như minh họa trong Hình 3. Trong trường hợp này, độ cao của một điểm ảnh bất kỳ so với mặt phẳng song song với mặt đất được tính theo công thức (3) như sau:

$$h_{uv} = \frac{\sin(\beta - \alpha_{uv})}{\cos(\alpha_{uv})} z_{uv} \quad (3)$$



Hình 2. Biểu diễn độ cao điểm P trong không gian a) 3 chiều và b) 2 chiều



Hình 3. Biểu diễn độ cao điểm P khi máy ảnh nghiêng góc beta

2.3. Chuyển đổi tọa độ ảnh sang tọa độ thực

Điểm P_{uv} trong hệ tọa độ ảnh sẽ được biểu diễn trong tọa độ thực dưới dạng $P(X, Y, h_{xy})$ như Hình 4. Tọa độ X, Y được xác định bằng biểu thức (4) và (5) như sau:

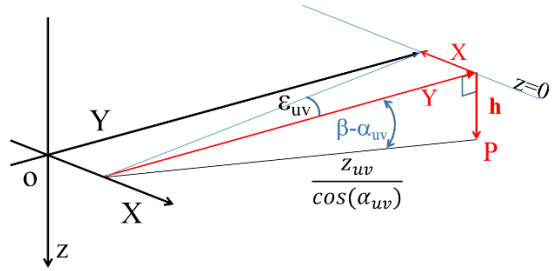
$$Y = \frac{\cos(\beta - \alpha_{uv})}{\cos(\alpha_{uv})} z_{uv}, \quad (4)$$

$$X = z_{uv} \cdot \tan(\varepsilon_{uv}), \quad (5)$$

trong đó, ε_{uv} là góc lệch chiều ngang, được xác định bằng biểu thức sau:

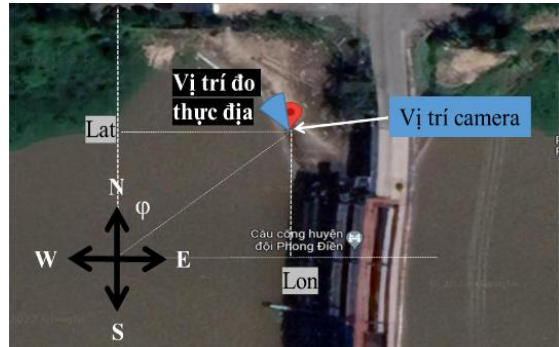
$$\varepsilon_{uv} = \frac{(\frac{v_{max}}{2} - v)}{\frac{v_{max}}{2}} \times \frac{HFOV}{2}, \quad (6)$$

và $h_{xy} = h_{uv}$.



Hình 4. Biểu diễn điểm P trong hệ tọa độ thực

Dữ liệu độ cao trong hệ tọa độ thực có thể được chuyển đổi sang tọa độ địa lý nếu biết được tọa độ địa lý của vị trí đặt máy ảnh như minh họa trong Hình 5. Do đó, dữ liệu độ cao thu được có thể được sử dụng làm dữ liệu DEM cho các phần mềm chuyên dụng mô phỏng dòng chảy hay lũ lụt. Dữ liệu độ cao cũng nên được đổi về cao độ quốc gia (Minh et al., 2022) (mực nước biển trung bình tại trạm giám sát Hòn Dấu, Hải Phòng) để thống nhất tham chiếu với các nguồn dữ liệu độ cao khác tại Việt Nam.

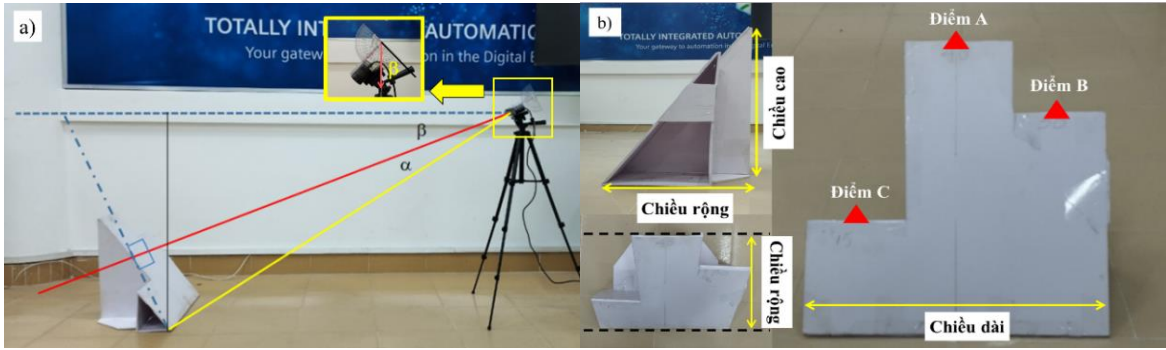


Hình 5. Biểu diễn tọa độ trên bản đồ

2.4. Các bố trí thí nghiệm

2.4.1. Đánh giá sai số của phương pháp đề nghị

Trước khi tiến hành đo đạc thực địa, giải pháp đề xuất được kiểm chứng tại phòng thí nghiệm Kỹ thuật PLC và IoT Công nghiệp của Khoa Tự động hóa, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ. Thí nghiệm được bố trí như Hình 6a, gồm hai thành phần chính là vật mẫu và hệ thống máy ảnh 3D. Ba điểm trên vật mẫu tương ứng với độ cao 0,45, 0,55 và 0,7 m so với đường $h = 0$, máy ảnh được lắp trên giá đỡ 3 chân có kết nối thước đo giúp hiệu chỉnh chính xác góc β . Độ cao của máy ảnh so với mặt đất trong 3 trường hợp $\beta=0^\circ$, $\beta=25^\circ$ và $\beta=45^\circ$ tương ứng là 0,85 m, 0,83 m và 0,8 m.



Hình 6. Bố trí thí nghiệm đánh giá sai số

Khoảng cách của vật mẫu đến máy ảnh được hiệu chỉnh từ 2,5 m đến 6,5 m, mỗi bước thay đổi là 0,5 m. Tại mỗi vị trí, độ cao của các điểm mẫu được ghi nhận. Tương tự, vị trí vật mẫu được chuyển lệch sang trái và phải 0,6 m để đánh giá sai số của vùng bên trái và bên phải. Tất cả các dữ liệu độ cao thu thập được sử dụng để đánh giá sai số của phương pháp theo khoảng cách đo và theo góc lệch sang trái hay phải.

Bên cạnh đó, độ chính xác của việc chuyển đổi tọa độ ảnh sang hệ tọa độ thực cũng được kiểm chứng bằng cách so sánh kích thước của chiều dài, rộng và cao của vật mẫu như minh họa trong Hình 6b với kích thước ước lượng.

2.4.2. Bố trí thí nghiệm đo độ cao thực địa

Sau khi được đánh giá tại phòng thí nghiệm, hệ thống đã được bố trí để đo đạc thực địa, do điều kiện thực tế hệ thống được lắp đặt tại công thủy lợi tại *Quận Phong Điền, thành phố Cần Thơ*, nơi có đê bờ xi măng lộ diện rõ tại bờ sông như minh họa trong Hình 7 để thuận tiện cho việc bố trí thí nghiệm.



Hình 7. Bố trí thí nghiệm thực địa

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sai số phương pháp đo

Độ cao ước lượng của các điểm A, B và C trong Hình 8 được so sánh với các kích thước đo đạc để tính sai số e và trung bình trị tuyệt đối sai số MAE theo công thức (7) và (8) để đánh giá phương pháp được đề xuất.

$$e = h_m - h_e, \tag{6}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_1^n |h_{mi} - h_{ei}|, \tag{7}$$

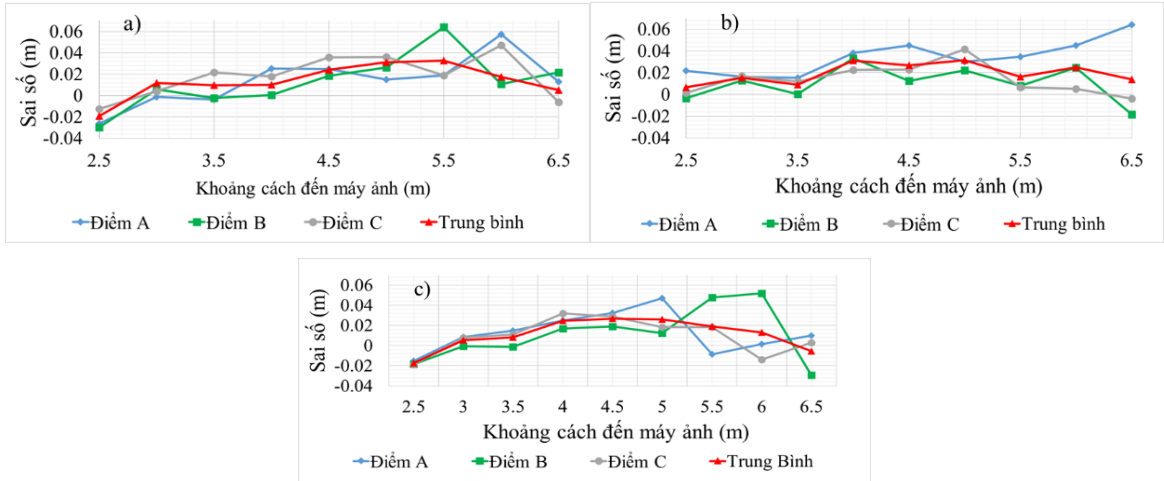
trong đó, h_m và h_e là độ cao đo đạc và độ cao ước lượng bằng phương pháp đề xuất, h_{mi} và h_{ei} là độ cao đo đạc và độ cao ứng lượng tại điểm i .

Bảng 1. MAE của độ cao ước lượng

Vị trí	MAE (m)
Chính diện	0,021
Lệch trái 0,6 m	0,022
Lệch phải 0,6 m	0,020
Trung bình	0,025

Các kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp đề xuất có thể ước lượng tốt độ cao của vật mẫu khi nằm ở chính diện và khi sang trái và phải máy ảnh với sai số lớn nhất $e_{max} = 0,06$ m như minh họa cụ thể trong các Hình 8a, 8b, 8c; MAE trung bình 0,025 m như mô tả trong Bảng 1. Sai số của phép đo tăng lên khi vị trí đo cách xa máy ảnh. Khoảng cách đo tối thiểu khoảng 2,5 m.

Bên cạnh độ chính xác của độ cao ước lượng, độ chính xác ước lượng tọa độ thực của các vị trí đo từ tọa độ ảnh theo công thức (4) và (5) cũng rất quan trọng. Các Hình 9b, 9c và 9d cung cấp kết quả ước lượng tọa độ thực của vật mẫu tương ứng với ba góc lệch của máy ảnh so với mặt phẳng ngang là 0° , 25° và 45° . Hình 9a cung cấp hình ảnh của vật mẫu trong không gian ảnh để đối chiếu. Hai đường thẳng song song trong các hình là vị trí tương ứng với chúng trong Hình 6b.



Hình 8. Biểu đồ sai số

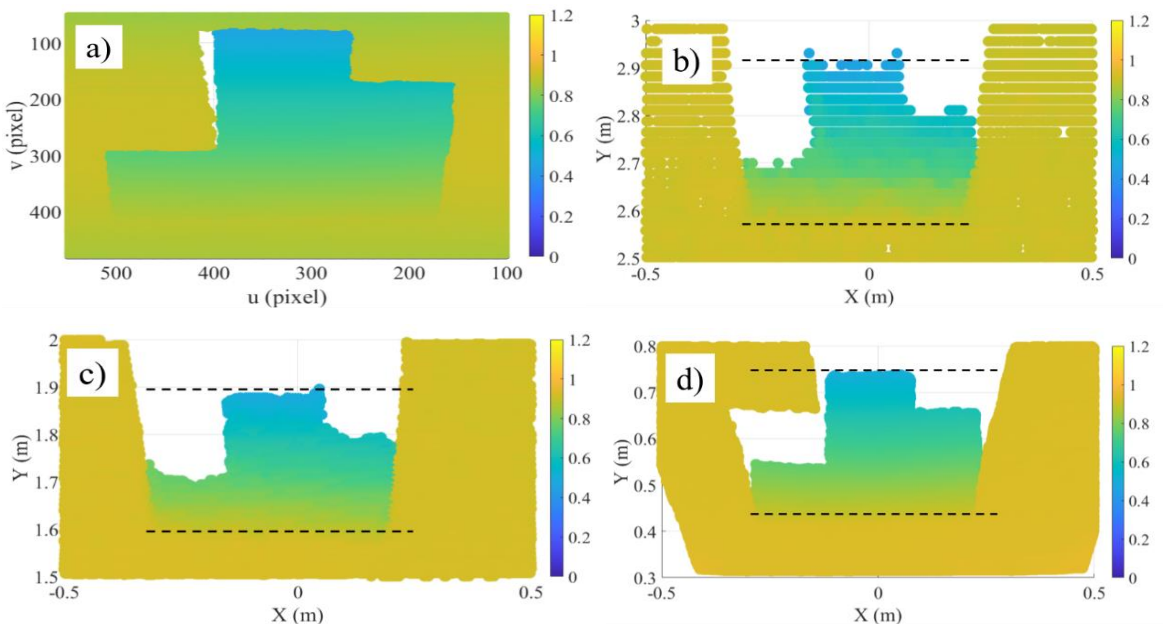
Ghi chú: a) chính diện, b) lệch phải 0,6 m, c) lệch trái 0,6 m

Độ chính xác ước lượng tọa độ thực của các điểm đo được đánh giá gián tiếp thông qua ước lượng kích thước của chiều dài, rộng và cao của vật mẫu. Kết quả được tóm tắt trong Bảng 2, sai số ước lượng các kích thước này không quá 0,024 m. Điều này cho thấy thuật toán đề nghị đã ước lượng được chính xác vị trí đặt của vật mẫu trong hệ tọa độ thực có góc tọa độ là vị trí đặt máy ảnh. Tuy nhiên, mỗi góc đặt của máy ảnh cho chất lượng ước lượng vật

thể khác nhau phụ thuộc và số lượng điểm mà máy ảnh 3D xác định được độ sâu trường ảnh.

Bảng 2. Sai số các khoảng cách của vật mẫu

Góc β	Dài (m)	Rộng (m)	Caο (m)	MAE (m)
0°	0,47	0,32	0,39	0,024
25°	0,47	0,28	0,40	0,017
45°	0,49	0,28	0,40	0,007



Hình 9. Kết quả đo độ cao vật mẫu trong hệ tọa độ thật ở các góc β khác nhau

Ghi chú: a) Độ vật trong không gian ảnh, b) $\beta=0^\circ$, c) $\beta=25^\circ$, d) $\beta=45^\circ$

Tóm lại, thuật toán đề nghị đã ước lượng thành công độ cao của các vị trí trong không gian chụp của máy ảnh. Độ chính xác trong môi trường thí nghiệm cao và được đánh giá là phù hợp cho việc triển khai ước lượng độ cao của khu vực gần bờ sông như trình bày trong mục tiêu của nghiên cứu này.

3.2. Kết quả ước lượng độ cao bờ sông

Hình 10 trình bày các kết quả đo thực địa tại địa điểm thực nghiệm. Trong đó, Hình 10a, 10b độ sâu trường ảnh được máy ảnh 3D ước lượng và độ cao ước lượng tương ứng trong không gian ảnh (u,v) . Hình 10c và 10d tương ứng là độ cao ước lượng trong không gian thực $((0,0)$ là vị trí đặt máy ảnh) và độ cao mặt của bờ sông (vị trí đường màu đỏ trong Hình 10a). Kết quả này chứng tỏ thuật toán đề nghị đã ước lượng được độ cao bờ sông, phần dốc được tái tạo tốt, phần không gian xi măng phẳng trên bờ được ước lượng chính xác so với giá trị đo bằng thước.

3.3. Thảo luận

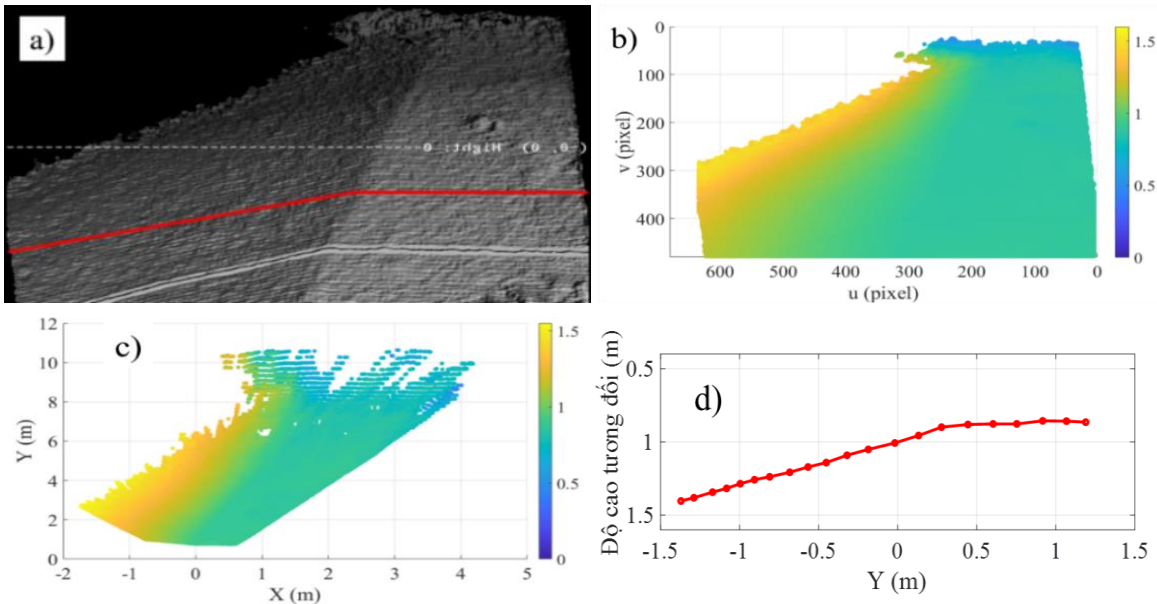
Nghiên cứu này đã đề xuất và kiểm chứng được một giải pháp ứng dụng trực tiếp máy ảnh 3D vào ước lượng độ cao của bờ sông. Kết quả bước đầu rất khả quan, đã tái tạo được đa số các vị trí trong không gian làm việc của máy ảnh. Các vị trí ước lượng được chuyển đổi tốt sang tọa độ thực nên dễ dàng được chuyển đổi sang hệ tọa độ địa lý để cung cấp dữ liệu độ cao cho các nghiên cứu liên quan, nhất là trong lĩnh vực mô phỏng thủy lực sông ngòi, lũ lụt.

Tuy nhiên, thuật toán này cần được thử nghiệm thêm với nhiều điều kiện bờ sông khác nhau để đánh giá đầy đủ tính hiệu quả của thuật toán. Kết quả ước lượng phụ thuộc chính vào góc đặt của máy ảnh so với mặt phẳng ngang nên hệ thống này chỉ hoạt động tốt với điều kiện lắp đặt cố định, một hệ cân bằng máy ảnh cần được nghiên cứu để tích hợp. Thuật toán hiện tại cũng chỉ ước lượng độ cao của một khung ảnh nên cần được nâng cấp để thu thập độ cao liên tục theo không gian và thời gian.

Như đã trình bày, máy ảnh 3D được sử dụng là loại trong nhà do hạn chế về mặt kinh phí nên thời điểm thực nghiệm bị hạn chế, tránh các thời điểm ánh sáng mặt trời. Do đó, việc trang bị máy ảnh 3D ngoài trời cũng là một điều kiện quan trọng để triển khai linh hoạt hệ thống của nghiên cứu này.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất thành công thuật toán ước lượng trực tiếp độ cao tương đối của bờ sông dựa vào độ sâu trường ảnh thu được từ một máy ảnh 3D mà không cần áp dụng các thuật toán xử lý ảnh phức tạp. Độ cao ước lượng của không gian đo đạt được biểu diễn trong không gian thực, sẵn sàng để chuyển đổi về tọa độ địa lý. Độ cao tương đối của tập điểm đo hoàn toàn có thể được chuyển đổi về cao độ quốc gia thông qua việc dẫn cao độ quốc gia về vị trí đặt máy ảnh để kết quả của nghiên cứu có thể được sử dụng bởi các nghiên cứu có sử dụng DEM.



Hình 10. Kết quả ước lượng độ cao bờ sông

Ghi chú: a) độ sâu trường ảnh, b) độ cao ước lượng trong hệ tọa độ ảnh, c) độ cao ước lượng trong hệ tọa độ thực, d) đường mặt cắt đánh dấu trong hình a

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Ban Giám hiệu Trường Đại học Cần Thơ, phòng Quản lý Khoa học,

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Andes, L. C., & Cox, A. L. (2017). Rectilinear inverse distance weighting methodology for bathymetric cross-section interpolation along the Mississippi River. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(7), 04017014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001514)
- Astra, O. (2022). Retrieved 1 from <https://orbbe3d.com/product-astra-pro/>
- Brunken, H. (2021). *Stereo vision-based road condition monitoring*. Technische Universitaet Berlin (Germany).
- Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M. G., & Uijttewaal, W. S. (2018). Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach. *Earth Surface Dynamics*, 6(4), 933-953. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-933-2018>
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., Kasvi, E., Hyypä, H., Hyypä, J., & Alho, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote sensing*, 5(12), 6382-6407. <https://doi.org/10.3390/rs5126382>
- Hilton, J. E., Grimaldi, S., Cohen, R. C., Garg, N., Li, Y., Marvanek, S., Pauwels, V. R., & Walker, J. P. (2019). River reconstruction using a conformal mapping method. *Environmental Modelling & Software*, 119, 197-213. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.006>
- Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H., & Samberg, A. (2000). Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR.
- Longoni, L., Papini, M., Brambilla, D., Barazzetti, L., Roncoroni, F., Scaioni, M., & Ivanov, V. I. (2016). Monitoring riverbank erosion in mountain catchments using terrestrial laser scanning. *Remote sensing*, 8(3), 241. <https://doi.org/10.3390/rs8030241>
- Minh, H. N., Ouillon, S., & Duy, V. V. (2022). Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to ENSO-evidence from tide gauge measurement of 1960-2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(1), 109-126.
- Molfetta, M. G., Bruno, M. F., Pratola, L., Rinaldi, A., Morea, A., Preziosa, G., Pasquali, D., Di Risio, M., & Mossa, M. (2020). A stereoscopic system to measure water waves in laboratories. *Remote sensing*, 12(14), 2288. <https://doi.org/10.3390/rs12142288>
- Stefanik, K. V., Gassaway, J. C., Kochersberger, K., & Abbott, A. L. (2011). UAV-based stereo vision for rapid aerial terrain mapping. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 24-49. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.1.24>
- Vieira, M., Guimarães, P. V., Violante-Carvalho, N., Benetazzo, A., Bergamasco, F., & Pereira, H. (2020). A low-cost stereo video system for measuring directional wind waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 831. <https://doi.org/10.3390/jmse8110831>