

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.063

GIẢI PHÁP ĐO VẬN TỐC SÓNG TRÊN MẶT SÔNG BẰNG ẢNH NGHIÊNG TỪ MÁY ẢNH THƯƠNG MẠI

Lưu Trọng Hiếu*, Nguyễn Minh Hùng, Phan Hồng Toàn và Nguyễn Chí Ngôn

Bộ môn Tự động Hóa, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Lưu Trọng Hiếu (email: luutronghieus@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 06/01/2022

Ngày nhận bài sửa: 24/01/2022

Ngày duyệt đăng: 14/02/2022

Title:

Evaluation of waves on river surface using oblique images from commercial camera

Từ khóa:

Ảnh ortho, cảm biến bằng hình ảnh, phương pháp optical flow, phương trình thẳng hàng, vận tốc sóng trên mặt sông

Keywords:

Collinearity equation, image sensing, optical flow, ortho-images, waves on river surface

ABSTRACT

This paper is aimed to introduce a method evaluation the velocity of the water surface by using commercial camera. The camera was fixed at the top of a bridge, where it was possible to observe the river surface and vehicles passing by. The observation video was recorded in different oblique angles. Ortho-images were created from video frames by using collinearity equation and perspective transform. To estimate accuracy of the equations, experiment was taken on land before applying to river surface. The optical flow method was proposed to calculate the river surface' velocity. The result shows that wave velocity vectors were fixed with waves generated by ships and small waves generated by nature effect. The initial results of the experiment show that although moving vehicles generated many waves, these waves have small amplitude and fast terminated.

TÓM TẮT

Phương pháp đo đạc vận tốc của mặt nước tại nhánh sông chính được trình bày trong nghiên cứu này bằng máy ảnh thương mại. Máy ảnh được bố trí cố định tại đỉnh cầu, nơi có thể quan sát cụ thể mặt sông và các phương tiện qua lại. Video quan sát được quay với các góc nghiêng khác nhau. Ảnh quan sát (ảnh ortho) được dựng lại từ các khung ảnh bằng phương pháp điểm thẳng hàng (collinearity equation) và biến đổi phối cảnh (perspective transform). Để kiểm chứng độ chính xác của phương pháp, thí nghiệm được tiến hành tại vùng có thể quan sát được trước khi áp dụng lên mặt sông. Phương pháp optical flow (dòng chảy quang học) được sử dụng để tính toán vận tốc sóng trên bề mặt sông. Kết quả cho thấy vector vận tốc sóng trùng với sóng do tàu bè qua lại và sóng nhỏ do các hiện tượng tự nhiên. Nghiên cứu ban đầu của thí nghiệm cho thấy mặc dù phương tiện di chuyển qua lại tạo ra nhiều sóng nhưng các sóng này có biên độ dao động nhỏ và thời gian kết thúc nhanh.

1. GIỚI THIỆU

Sạt lở ven sông tại các nhánh sông lớn có nhiều tàu bè qua lại đang là vấn đề nghiêm trọng hiện nay tại đồng bằng sông Cửu Long. Đồng bằng sông Cửu Long có một diện tích mặt nước lớn với nhiều con sông có diện tích mặt cắt rất rộng, khi diện tích mặt

cắt của con sông đạt một mức độ nào đó, các đặc điểm cơ học của mặt sông cũng tương tự như mặt biển. Hiện nay, các phương pháp đo lường tiêu chuẩn là thả trực tiếp phao đo (bouy) lên mặt nước để thu thập số liệu. Mặc dù phương pháp này cho kết quả chính xác, việc tốn thời gian và nguồn lực lắp đặt thiết bị cũng là trở ngại trong quá trình tính

toán đo đạc. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về sự thay đổi tại các bờ sông, bờ biển chủ yếu được tiến hành trên ảnh viễn thám GIS hoặc Google Earth. Nghiên cứu về sự phân bố các chất lơ lửng trên sông Hồng bằng ảnh vệ tinh đã được thực hiện (Nguyen et al., 2016). Các nhà nghiên cứu cũng chú ý đến việc thay đổi hình thái sông (Điệp và ctv., 2019; Thành và ctv., 2019) dựa trên ảnh từ phần mềm Google Earth hoặc ảnh vệ tinh LANDSAT. Các nghiên cứu này có nhược điểm chỉ có thể nghiên cứu trên các nhánh sông lớn có thể quan sát tốt từ vệ tinh với một độ sai số chấp nhận được, tuy nhiên nếu các phương pháp này áp dụng lên những nhánh sông nhỏ hơn, kết quả có thể xuất hiện sai số lớn.

Hiện nay, ứng dụng máy bay không người lái (unmanned aerial vehicle - UAV) vào trong lĩnh vực trắc địa bản đồ mang lại hiệu quả kinh tế cao, tiết kiệm thời gian và công sức rất nhiều lần so với công nghệ truyền thống. Phương pháp này cho phép người nghiên cứu có thể quan sát đường biên dọc theo đường bờ, từ đó có thể tính toán được độ sâu của khu vực rất gần bờ biển (Sun et al., 2019). Ngoài ra thiết bị bay cũng giúp đánh giá các đặc điểm thủy triều, sóng từ xa bờ ảnh hưởng đến đường bờ biển (Matsuba & Sato., 2018; Luu et. al., 2020). Tuy nhiên, tại Việt Nam, vì lý do an ninh quốc gia nên việc áp dụng các thiết bị bay cần thời gian.

Trong lĩnh vực cảm nhận hình ảnh (image sensing), vận tốc sóng trên ảnh vệ tinh hoặc trên các phim từ máy ảnh thường được tính bằng phương pháp tương quan chéo (cross-correlation) và phương pháp vận tốc của từng phần tử điểm (particle image velocimetry - PIV) (Dalrymple et al., 1998). Phương pháp tương quan chéo cho kết quả trung bình của khung hình và không thể hiện được vận tốc cụ thể của từng điểm ảnh. Trong khi đó, phương pháp PIV lại phải chọn từng điểm ảnh thủ công trên từng khung hình. Derian and Almar (2017) chỉ ra rằng phương pháp optical flow (dòng chảy quang học) cho kết quả tốt hơn, do phương pháp này biểu diễn được vận tốc của từng pixel ảnh một cách tự động và trực quan hơn.

Hiện nay, các ứng dụng thu thập hình ảnh bằng máy bay không người lái hoặc máy ảnh chỉ tập trung chủ yếu tại các đường bờ biển. Các khu vực sông lớn, thu thập hình ảnh vẫn dựa trên ảnh vệ tinh. Tuy nhiên, độ sai lệch của ảnh vệ tinh là lớn và có thể không có đủ dữ liệu cho vùng sông nhỏ cần quan sát. Vì vậy, phương pháp đo đạc vận tốc trên bề mặt sông bằng máy ảnh cố định vị trí (land-based camera) được trình bày trong nghiên cứu. Khúc sông được chọn có mật độ tàu bè qua lại cao, do đó sóng

tồn tại trên mặt sông có vận tốc và hướng ngẫu nhiên. Máy ảnh được bố trí với các góc nghiêng khác nhau để thu thập dữ liệu. Ảnh nghiêng cho diện tích quan sát tốt hơn ảnh ortho, tuy nhiên phép đo bằng ảnh nghiêng lại không cho kết quả chính xác. Vì vậy, phần phương pháp trình bày một phương pháp dựng ảnh ortho từ ảnh nghiêng. Vận tốc trên bề mặt được đo bằng phương pháp dòng chảy quang học trên ảnh dựng lại. Mục tiêu của nghiên cứu này nhằm trình bày một phương pháp đánh giá vận tốc sóng trên bề mặt sông cũng như mối tương quan giữa vận tốc tự nhiên và vận tốc do tàu bè di chuyển. Độ lớn của vận tốc cũng là cơ sở để đo những thành phần khác của sóng như độ dài sóng và vận tốc dòng chảy.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị

Thiết bị để tiến hành thí nghiệm là 1 máy ảnh thương mại Sony Alpha 6000 có gắn ống kính góc rộng $f:16-50\text{mm}$. Thông số kỹ thuật của máy ảnh được trình bày tại Bảng 1.

Bảng 1. Cấu hình và thông số kỹ thuật máy ảnh

Cấu hình	Thông số kỹ thuật
Cảm biến	Exmor™ APS HD CMOS 24.3MP
Kích thước cảm biến	23.5 x 15.6 mm (APS-C type)
Độ phân giải	24.3 MP
Lấy nét tự động	Fast Hybrid
ISO	100-25600

2.2. Khảo sát thí nghiệm

Vị trí được chọn quay video trong thí nghiệm là giữa cầu Hưng Lợi (Hình 1) lúc 9h sáng ngày



Hình 1. Cầu Hưng Lợi nhìn từ Google Earth

20/03/2021. Đây là vị trí cao và có thể quan sát được dòng chảy của sông, sóng ngẫu nhiên, phương tiện tàu bè đi lại dễ dàng. Vào ngày lấy mẫu, trời nhiều mây, gió nhẹ và không có mưa, sóng dài trên mặt

sống chủ yếu được tạo ra từ các phương tiện qua lại trên sông. Máy ảnh được cố định trên 1 chân máy ảnh có độ cao 160 cm, có thể quay được ở các góc nghiêng 0° , 45° , 60° .

2.3. Phương pháp dựng ảnh

Video các góc nghiêng được chia thành các khung ảnh rời (30 ảnh/giây), mỗi ảnh đều được hiệu chỉnh độ biến dạng (undistorted). Sau đó, các ảnh nghiêng sẽ được biến đổi thành ảnh ortho (orthophoto - ảnh số đã được chỉnh sửa biến dạng hình học, do đó các phép đo trên ảnh không bị thay đổi về độ lớn). Phương pháp xây dựng ảnh ortho gồm 2 bước: bước 1 sử dụng phương trình thẳng hàng (collinearity equation) (Lillesand et al., 2015) và bước 2 sử dụng phép biến đổi phối cảnh (perspective transform) (Hartley & Zisserman, 2000).

2.3.1. Phương trình thẳng hàng

Phương trình thẳng hàng trình bày mối quan hệ giữa các tọa độ ảnh 2D (x, y - tilted photo plane) và hệ tọa độ mặt đất 3D (X, Y, Z) thông qua sáu yếu tố 3 góc (ω, Φ và k - là góc xoay quanh các trục roll, pitch, yaw) và tọa độ X, Y, Z của hệ gốc (L) so với một ảnh ortho (Hình 2).

Theo đó, phương trình thẳng hàng được miêu tả như sau:

$$x_p = -f \frac{m_{11}(X_p - X_L) + m_{12}(Y_p - Y_L) + m_{13}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \quad (1)$$

$$y_p = -f \frac{m_{21}(X_p - X_L) + m_{22}(Y_p - Y_L) + m_{23}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \quad (2)$$

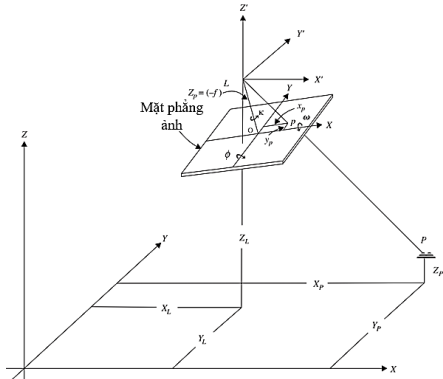
Với:

x_p, y_p : tọa độ ảnh của điểm P bất kì

X_p, Y_p, Z_p : tọa độ mặt đất của điểm P

X_L, Y_L, Z_L : tọa độ mặt đất của trạm L

m_{11}, \dots, m_{33} : hệ số của một ma trận xoay 3x3 được xác định bởi góc ω, Φ , và k làm biến đổi hệ tọa độ mặt đất thành hệ tọa độ ảnh.



Hình 2. Phương trình thẳng hàng

2.3.2. Phép biến đổi phối cảnh

Phép biến đổi phối cảnh cho phép ánh xạ điểm giữa hai mặt phẳng ảnh mà không nhất thiết phải song song với nhau thông qua một ma trận 3x3 khả nghịch trong các tọa độ thuần nhất như công thức sau:

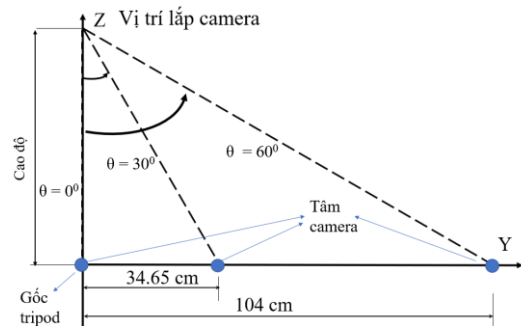
$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Với x'_1, x'_2, x'_3 là tọa độ điểm chiếu của x_1, x_2, x_3 thông qua ma trận quay $h_{i,j}$

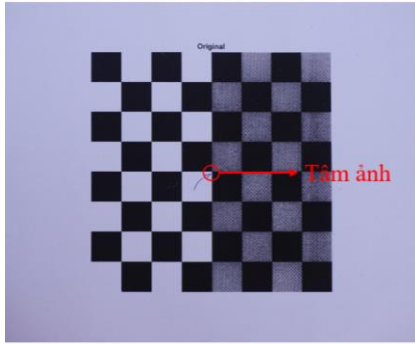
2.4. Thí nghiệm thuật toán tại phòng

Mục tiêu của bố trí thí nghiệm tại phòng để xác định độ chính xác của phương trình toán đề xuất khi tái tạo lại ảnh ortho. Theo đó, các bước thí nghiệm tiến hành chính xác như khi bố trí máy ảnh tại hiện trường (cầu Hưng Lợi). Một bàn cờ có kích thước 8x8 ô với 1 ô có diện tích 14x14 mm² được sử dụng, vùng quan sát bàn cờ tương ứng với vùng quan sát mặt sông.

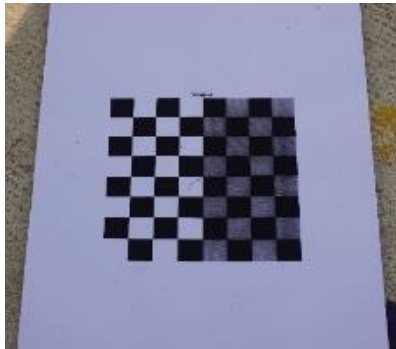
Để bố trí thí nghiệm, một máy ảnh được đặt trên tripod có độ cao cố định là 60 cm. Một bàn cờ được đặt sao cho tâm của bàn cờ trùng với tâm của khung ảnh trên máy ảnh. Ảnh được chụp, lặp lại các bước tương tự với góc nadir = 0^o, off-nadir = 30^o và off-nadir = 60^o (góc nadir là góc chụp vuông góc, góc off-nadir là cho các góc ngẫu nhiên). Ở Độ cao là 60 cm, bàn cờ được đặt cách vị trí gốc của tripod lần lượt là 34,65 cm và 104 cm (Hình 3). Ảnh chụp với góc nadir = 0^o được xem như ảnh tiêu chuẩn, ta dùng ảnh này để làm kết quả so sánh với các ảnh khác để kiểm tra khả năng của phép biến đổi ảnh.



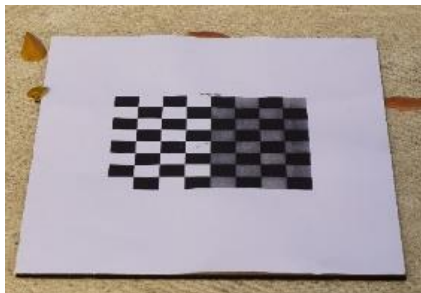
(a) sơ đồ bố trí thí nghiệm



(b) góc nadir = 0⁰, tâm ảnh đặt trùng với tâm bàn cờ



c) góc off-nadir = 30⁰



d) góc off-nadir = 60⁰

Hình 3. Bố trí thí nghiệm tại phòng thí nghiệm

2.5. Tính toán vận tốc bằng phương pháp dòng chảy quang học

Dòng chảy quang học là một phương pháp tính toán vận tốc của các đối tượng trong khung ảnh. Bằng cách đánh giá vận tốc giữa các khung ảnh, người tính toán có thể đo được vận tốc của đối tượng trong khung ảnh mà cần quan sát. Phương pháp dòng chảy quang học được tích hợp sẵn trong công cụ Computer Vision của phần mềm MATLAB, cho phép sử dụng trực tiếp trên các đoạn khung ảnh. Có nhiều cách tính khác nhau, trong trường hợp này phương pháp Lucas-Kanade được dùng để tính toán. Về cơ bản, cách tính vận tốc giữa 2 ảnh được trình bày như sau:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \tag{4}$$

$$\bar{v} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Với $I_x, I_y,$ và I_t là các vi phân độ sáng theo không gian và thời gian của từng khung ảnh.

u : vận tốc theo trục ngang của khung ảnh.

v : vận tốc theo trục dọc của khung ảnh.

\bar{v} : vận tốc theo 2 trục của khung ảnh.

2.6. Thu thập dữ liệu tại cầu Hưng Lợi



a) thu thập dữ liệu bằng máy ảnh



b) góc nadir = 0⁰



c) góc off-nadir = 45⁰



d) góc off-nadir = 60⁰

Hình 5. Thu thập dữ liệu bằng máy ảnh tại cầu Hưng Lợi

Thí nghiệm được tiến hành tại cầu Hưng Lợi, vào ngày 20/3/2021 lúc 9:00 AM. Khi tiến hành thu thập dữ liệu, thời tiết có ánh sáng phù hợp, các phương tiện đường thủy có di chuyển trên mặt sông, các phương tiện đường bộ trên cầu không quá nhiều nên ít dao động ảnh hưởng đến góc nghiêng và độ rung lắc của máy ảnh. Độ cao từ máy ảnh tới mặt sông $h=15m$ được đo thủ công; góc phương vị (góc hợp tâm máy ảnh và cực Bắc) $\theta=15^0$ được đo bằng la bàn số trên điện thoại và la bàn cầm tay. Video quay được sẽ được chia thành từng khung ảnh rồi (30 khung hình/giây), sau đó sẽ được dựng thành ảnh ortho nhờ 2 phương pháp toán kể trên.

3. KẾT QUẢ THU ĐƯỢC

3.1. Dựng ảnh Ortho

3.1.1. Kết quả dựng ảnh tại phòng

Kết quả của phép dựng ảnh được trình bày tại Hình 6. Diện tích 1 ô hình vuông bàn cờ là 14x14mm. Vị trí các điểm A, B, C, D trên khung ảnh được chọn thủ công. Do ta biết chính xác vị trí của bàn cờ so với tâm tripod, vị trí trong các góc off-nadir cũng được biết. Kết quả của 2 phép biến đổi

cho thấy ảnh sau khi dựng có kích thước tương đương với ảnh tại vị trí góc nadir = 0⁰, từ đó có thể kết luận được phép toán biến đổi đã đạt được yêu cầu đề ra.

Kết quả của phép biến đổi collinearity và perspective transform cho thấy khoảng cách giữa 2 pixel trên ảnh Ground Sample Distance (GSD) = 3,6 mm/pixel. Giá trị này được tính toán dựa trên mối liên hệ giữa kích thước pixel, độ lớn của cảm biến ccd (mm_ccd) và kích thước thật của 4 điểm trên bàn cờ ở thực tế (mm). Theo đó, 1 mm trên cảm biến tương đương 255 pixel và tỉ lệ giữa kích thước thật và kích thước trên cảm biến là 0,0095. Quan sát kết quả dựng lại bàn cờ, ta thấy hình dựng thành công với độ sai số chấp nhận được (độ lệch dưới 4 pixel), tuy nhiên khi góc off-nadir càng lớn, chất lượng ảnh càng giảm.



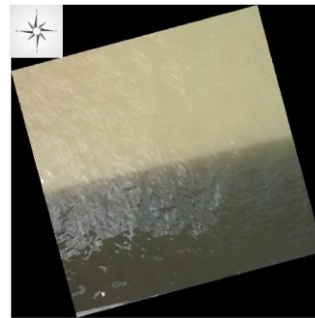
a) ảnh góc off-nadir = 30⁰ trước khi dựng



b) ảnh góc off-nadir = 30⁰ sau khi dựng

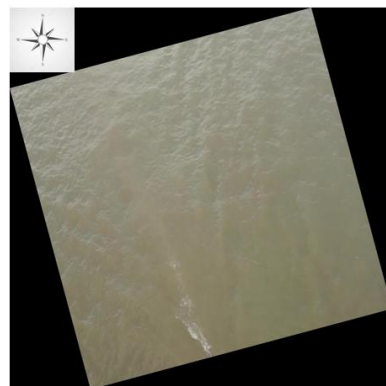
Hình 6. Kết quả phép dựng ảnh

3.1.2. *Kết quả dựng ảnh thu thập dữ liệu từ cầu Hưng Lợi*



a) Ảnh ortho với góc nadir = 0⁰

Kích thước 1024×1024 pixel = 3,69×3,69 m²



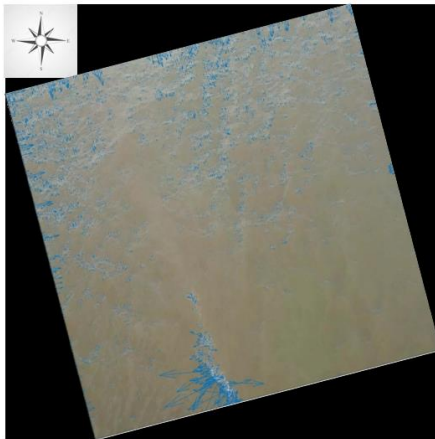
b) Ảnh ortho với góc off-nadir = 60⁰

Kích thước 2048×2048 pixel = 7,35×7,35 m²

Hình 7. Dựng ảnh ortho ở góc nadir = 0⁰ và off-nadir = 60⁰

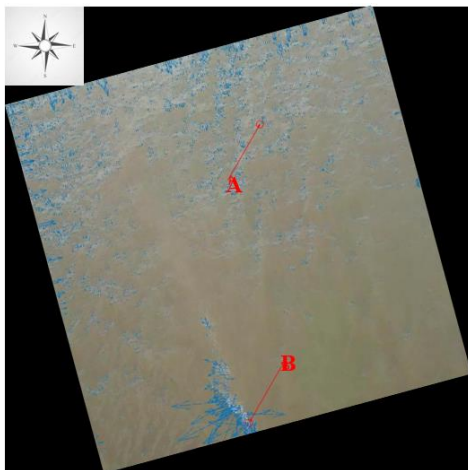
Kết quả dựng ảnh ortho từ ảnh nghiêng được trình bày tại Hình 7. Diện tích hình tại góc nadir = 0⁰ 1024×1024 pixel = 3,69×3,69 m², trong khi đó diện tích tại góc off-nadir = 60⁰ là 2048×2048 pixel = 7,35×7,35 m². Chất lượng ảnh dựng cũng cho kết quả tốt, sóng lan trên khung ảnh có thể được quan sát rõ ràng. Từ kết quả này, vận tốc sóng trên bề mặt được tính bằng phương pháp dòng chảy quang học.

3.2. Tính toán vận tốc bằng phương pháp dòng chảy quang học



a) Phương pháp dòng chảy quang học lên 1 khung ảnh

Kích thước 2048×2048 pixel = 7,35×7,35 m²



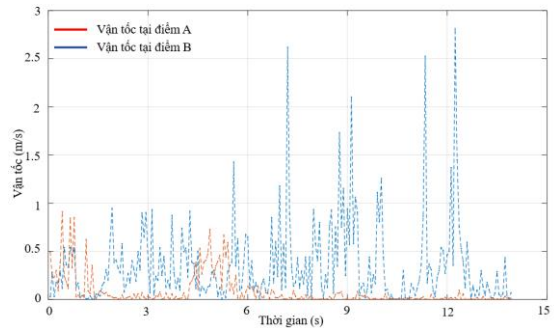
b) Vị trí so sánh vận tốc tại 2 điểm

Kích thước 2048×2048 pixel = 7,35×7,35 m²

Hình 8. Vận tốc mặt sông trên một khung ảnh bằng phương pháp dòng chảy quang học

Vận tốc mặt sóng tại 1 khung ảnh được trình bày tại Hình 8a. Khu vực quan sát có diện tích quan sát được trên thực tế là 7,35×7,35 m². Độ dài của các vector thể hiện độ lớn của vận tốc sóng trên bề mặt sông. Các vector vận tốc tại vị trí điểm A (Hình 8b) thể hiện vận tốc sau khi phương tiện di chuyển qua trong 1 khoảng thời gian, lúc này sóng tạo ra ảnh hưởng của nhiều yếu tố phụ (gió, độ lan truyền xung quanh). Các vector vận tốc tại vị trí điểm B (Hình 8b) thể hiện vận tốc do phương tiện mới rời khỏi tức

thời. Bằng cách so sánh độ lớn vector tại 2 vị trí A và B, ta có thể biết được ảnh hưởng do phương tiện tạo ra lên mặt sông.



Hình 9. Biểu đồ so sánh vận tốc tại điểm A và điểm B

Kết quả của phương pháp dòng chảy quang học là vận tốc di chuyển của khung ảnh, với đơn vị độ dịch chuyển pixel/khung ảnh. Với giá trị GSD = 3,6 mm/pixel, vận tốc sóng được đổi qua đơn vị chuẩn m/s. Biểu đồ so sánh vận tốc tại điểm A và điểm B được thể hiện tại Hình 9. Nhìn chung, vận tốc bề mặt tại hôm quan sát là không lớn (dưới 3 m/s). Vận tốc sóng do phương tiện tạo ra có độ lớn hơn khoảng 4 lần so với các yếu tố khác (vị trí A). Vận tốc tại điểm A có độ lớn dưới 1 m/s, trong khi đó vận tốc tại điểm B có độ dao động cao hơn. Thời gian duy trì sóng là tương đối ngắn, dưới 15 giây. Sau 13 giây khi quan sát, sóng vẫn còn sinh ra tại điểm B, trong khi đó sóng ở điểm A đã coi như không còn xuất hiện. Lúc này, vận tốc bề mặt tại điểm A là vận tốc của dòng chảy và các yếu tố khác.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp đo vận tốc bề mặt sông từ ảnh nghiêng bằng máy ảnh thương mại. Máy ảnh được bố trí cao độ, nơi có thể quan sát được mặt sông khi có tàu bè và khi không có tàu bè qua lại. Video được quay với các góc khác nhau 30⁰, 45⁰, 60⁰. Ảnh nghiêng dựng thành ảnh ortho bằng phương pháp thẳng hàng và phương pháp phối cảnh. Thí nghiệm chỉ ra rằng giá trị GSD = 3,6 mm/pixel. Vận tốc sóng được đo bằng phương pháp dòng chảy quang học. Kết quả đo cho thấy thời gian sóng sinh ra và kết thúc từ khi có tàu là tầm 15 giây với độ lớn dao động dưới 3m/s. Do các điều kiện ngoại cảnh, hiện tại chưa bố trí được phao đo để kiểm chứng phương pháp đề ra. Nghiên cứu chỉ ra rằng sóng trên bề mặt do phương tiện tạo ra có biên độ dao động nhỏ, thời gian kết thúc nhanh. Dạng sóng này mang năng lượng yếu, độ lan truyền thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Dalrymple, R. A., Kennedy, A. B., Kirby, J. T., & Chen, Q. (1998). Determining depth from remotely-sensed images. *Coastal Engineering*, 1(26), 2395-2408.
<https://doi.org/10.9753/icce.v26.%25p>
- Derian, P., & Almar, R. (2017). Wavelet-Based Optical Flow Estimation of Instant Surface Currents From Shore-Based and UAV Videos. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10), 5790–5797.
 doi:10.1109/tgrs.2017.2714202
- Điệp, N. T. H., Minh, V. Q., Trường P. N., Thành, L. K., & Vinh, L. T. Q. (2019). Diễn tiến tình hình sạt lở ven bờ sông Tiền và sông Hậu, vùng Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 55(CĐ Môi trường), 125-133.
<https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2019.139>
- Hartley, R., & Zisserman, A. (2000). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2nd edition.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. Wiley & Son Inc. 7th edition.
- LUU, T.H., Tsuyoshi I., Akio O., Daisuke I., & Fukutaro K. (2020). Evaluation of wave propagation characteristics using oblique UAV video images. *Journal of Japan Society of Civil Engineering (B3)*, 76(2), I_642-I_647.
https://doi.org/10.2208/jscejoe.76.2_I_642
- Matsuba, Y., & Sato, S. (2018). Nearshore bathymetry estimation using UAV. *Coastal Engineering Journal*, 60(1), 51-59.
<https://doi.org/10.1080/21664250.2018.1436239>
- Nguyen, V. T., Vu, D. V., Nguyen, D. V., & Pham, X. C. (2016). Algorithm development of satellite image processing to detect the concentration of suspended particulate matter in coastal waters of red river delta. *Viet Nam Journal of Marine Science and Technology*, 16(2), 129-135.
<https://doi.org/10.15625/1859-3097/8446>
- Sun, S. H., Chuang, W. L., Kim, K. A., Kaihatu, J. Y., Huff, J., T., & Feagin, R. (2019). Imaging-based nearshore bathymetry measurement using an unmanned aircraft system. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 145(2), 04019002-1- 04019002-12.
- Thành, T. L., Duy, Đ. V., & Kiên, V. V. (2019). Đánh giá biến đổi hình thái sông Dinh -Ninh Thuận bằng công nghệ phân tích ảnh viễn thám. *Tạp chí Tài nguyên Nước*, 4, 36-46.
<https://doi.org/10.36335/VNJHM.2021>