

# ỨNG DỤNG CAMERA CHIỀU SÂU (STEREO CAMERA) VÀ KỸ THUẬT PIV TRONG VIỆC PHÁT HIỆN SỚM CHUYỂN ĐỘNG CỦA MÁI DỐC

## APPLICATION OF STEREO CAMERA AND PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV) TECHNIQUES IN EARLY DETECTION OF SLOPE MOVEMENTS

Trịnh Việt Dũng

Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: tvdung.ibst@gmail.com, 0965 892 292

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-3>

**TÓM TẮT:** Trong những năm gần đây, hiện tượng sạt lở đất xảy ra với tần suất ngày càng gia tăng, đặt ra nhu cầu cấp thiết về các hệ thống phát hiện và dự báo. Nghiên cứu này giới thiệu một hệ thống tích hợp stereo camera ZED với mã nguồn Python chuyên dụng, nhằm theo dõi và phát hiện các chuyển động trên sườn dốc - yếu tố thường là tiền đề dẫn đến các vụ sạt lở quy mô lớn. Hệ thống được kiểm chứng thông qua thí nghiệm trên mô hình sườn dốc nhân tạo. Dữ liệu ảnh độ sâu, cung cấp thông tin chi tiết về hình thái bề mặt dốc, đóng vai trò trọng tâm trong phân tích. Bên cạnh đó, kỹ thuật Particle Image Velocimetry (PIV) được áp dụng để trực quan hóa động lực của sườn dốc, góp phần nâng cao độ tin cậy của kết quả.

Kết quả thử nghiệm ban đầu cho thấy hệ thống đạt độ chính xác cao, cho thấy tính khả thi của phương pháp. Công trình này mở ra một hướng tiếp cận đầy hứa hẹn cho việc phát hiện và dự báo sạt lở đất, với tiềm năng ứng dụng thực tiễn nhằm bảo vệ cơ sở hạ tầng, tài sản và an toàn con người.

**TỪ KHÓA:** Sạt lở, camera chiều sâu, PIV, Python, OpenCV, depth images.

**ABSTRACT:** In recent years, the increasing frequency of landslides has highlighted the urgent need for effective detection and prediction systems. This study presents a system that integrates a ZED stereo camera with specialized Python-based algorithms to monitor and detect slope movements-phenomena that often precede large-scale landslides. The system was validated through experiments conducted on an artificial slope model. Depth images, which provide detailed information on slope morphology, served as the primary source of data for the analysis. In addition, the Particle Image Velocimetry (PIV) technique was employed to visualize slope dynamics and enhance the reliability of the results.

Preliminary findings demonstrate that the system achieves a high level of accuracy, confirming the feasibility of the proposed approach. This work represents a promising step forward in landslide detection and prediction research, offering practical potential for safeguarding infrastructure, property, and human lives.

**KEYWORDS:** Landslides, stereo camera, PIV, Python, OpenCV, depth images.

### 1. GIỚI THIỆU

Sạt lở đất là một trong những thảm họa thiên nhiên phổ biến tại nhiều quốc gia có địa hình đồi núi và mưa lớn. Cả Việt Nam và Nhật Bản đều thường xuyên hứng chịu sạt lở gây hậu quả nghiêm trọng. Tháng 10 năm 2020, một loạt trận sạt lở ở miền Trung Việt Nam do mưa lớn đã khiến ít nhất 130 người thiệt mạng [1]. Trước đó, trận lở đất tại

Hiroshima (Nhật Bản) năm 2014 cũng khiến 70 người thiệt mạng. Những sự kiện này cho thấy mưa lớn và điều kiện địa hình phức tạp đang làm gia tăng rủi ro sạt lở đất. Mặc dù các quốc gia đã triển khai bản đồ nguy cơ, hệ thống cảnh báo và biện pháp phòng chống, nguy cơ sạt lở vẫn hiện hữu do biến đổi khí hậu, mất rừng và phát triển hạ tầng ở vùng đồi núi.

Hiện nay, các hệ thống cảnh báo sớm sạt lở được nghiên cứu và áp dụng theo nhiều hướng tiếp cận. Một số nghiên cứu ứng dụng công nghệ mới nhằm nâng cao hiệu quả dự báo, ví dụ sử dụng trí tuệ nhân tạo/máy học để tăng độ tin cậy của cảnh báo hoặc tích hợp các công cụ quan trắc hiện đại trong quản lý rủi ro thiên tai [2,3,4]. Tuy nhiên, phần lớn phương pháp truyền thống dựa vào mạng lưới cảm biến tại chỗ (cảm biến nghiêng, địa chấn, đo mực nước ngầm, v.v.) và nhân lực theo dõi. Các thiết bị này không chỉ đắt tiền mà còn đo đạc hạn chế tại một số điểm cục bộ, do đó phải lắp đặt dày đặc mới bao quát được cả sườn dốc. Việc triển khai trên diện rộng như vậy không phải lúc nào cũng khả thi và hiệu quả, đặc biệt trong tình huống khẩn cấp cần theo dõi khu vực lớn. Hơn nữa, việc lắp đặt và bảo trì hệ thống cảm biến đòi hỏi chuyên gia và tiềm ẩn nguy hiểm cho người thực hiện [5].

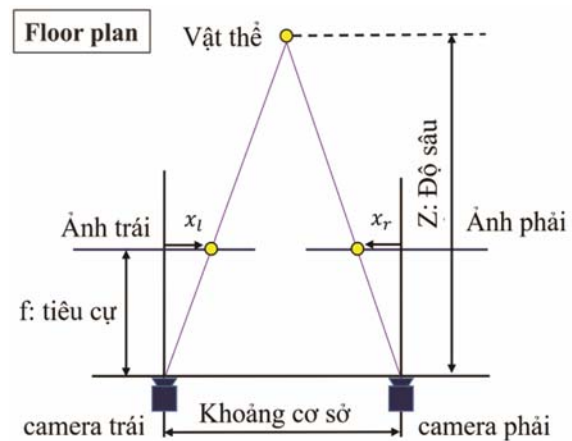
Trước những hạn chế nêu trên, công nghệ quan trắc không tiếp xúc đang nổi lên như một giải pháp nhiều tiềm năng. Đáng chú ý, stereo camera cho phép quan sát đối tượng từ hai góc nhìn đồng thời, tái tạo mô hình 3D của bề mặt địa hình với độ chi tiết cao. Công nghệ này có thể cung cấp bản đồ độ sâu (depth map) của mái dốc, giúp theo dõi chuyển động bề mặt một cách toàn diện. Ưu điểm của stereo camera là triển khai nhanh chóng, phạm vi quan sát rộng và không đòi hỏi nhiều nhân lực hay chuyên môn cao tại hiện trường [6,7]. Tuy nhiên, nhược điểm là độ phân giải độ sâu bị giới hạn, nhất là khi đặt máy ở khoảng cách xa, dẫn đến khó phát hiện những chuyển dịch nhỏ trước khi sạt lở xảy ra. Đặc biệt trong điều kiện mưa lớn, chất lượng dữ liệu độ sâu giảm do nhiễu và sai số tăng. Do đó, cần có phương pháp phân tích dữ liệu phù hợp để khai thác hiệu quả thông tin từ camera độ sâu. [8]

**Mục tiêu nghiên cứu:** Nghiên cứu này tập trung đánh giá tính khả thi của việc sử dụng stereo camera trong quan trắc chuyển động mái dốc và phát hiện vết nứt nhằm cảnh báo sớm sạt lở đất. Để khắc phục hạn chế của phép đo bằng ảnh độ sâu, tác giả đề xuất một phương pháp mới xử lý dữ liệu ảnh nhằm giảm sai số và tăng độ tin cậy khi phát hiện biến dạng mái dốc. Hệ thống được phát triển sẽ được thử nghiệm trên mô hình mái dốc thu nhỏ trong phòng thí nghiệm với mưa nhân tạo. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng đóng góp một giải pháp quan trắc sạt lở hiệu quả, an toàn và kinh tế hơn, qua đó nâng cao năng lực cảnh báo và giảm thiểu thiệt hại do sạt lở đất.

## 2. CAMERA ĐỘ SÂU VÀ PIV

### 2.1. Hệ thống stereo camera và thu thập dữ liệu

Stereo camera gồm hai camera đặt song song cách nhau một khoảng cơ sở (baseline) nhất định, hoạt động tương tự như hai mắt người để thu được ảnh lập thể của một cảnh. Từ hai ảnh chụp cùng lúc ở hai góc hơi khác nhau (trái và phải), hệ thống stereo camera có thể tính toán bản đồ độ sâu - là ma trận khoảng cách từ camera đến từng điểm trên bề mặt đối tượng [9]. Nguyên lý chính là dựa vào thị sai hai mắt (binocular disparity): một điểm trên vật thể sẽ xuất hiện ở hai vị trí hơi khác nhau trên hai ảnh; độ chênh lệch vị trí đó gọi là thị sai và tỉ lệ nghịch với khoảng cách đến camera. Sau khi tìm được thị sai cho mọi điểm (giải bài toán tương ứng ảnh giữa hai ảnh trái - phải), hệ thống dùng kỹ thuật tam giác đặc với baseline đã biết và tiêu cự camera để tính ra tọa độ không gian của điểm đó. Kết quả là thu được một bản đồ độ sâu cho toàn cảnh, trong đó mỗi pixel mang giá trị độ sâu (khoảng cách) tương ứng. Quy trình này đòi hỏi hai ảnh lập thể phải được hiệu chỉnh hình học (rectification) sao cho các điểm tương ứng nằm trên cùng một hàng, giúp giảm độ phức tạp tính toán và tăng độ chính xác [10].



Hình 1: Sơ đồ nguyên lý đo độ sâu trong hệ thống stereo camera [6]

$$Z = \frac{f \cdot B}{x_l - x_r} \quad (1)$$

Trong đó:

$Z$  - độ sâu (khoảng cách từ camera đến đối tượng);

$f$  - tiêu cự (focal length) của camera;

$B$  - baseline (khoảng cơ sở giữa hai camera trái - phải);

$x_l$  - tọa độ điểm ảnh trên ảnh trái;

$x_r$  - tọa độ điểm ảnh trên ảnh phải.

Trong những năm gần đây, công nghệ stereo camera đã được ứng dụng trong lĩnh vực địa kỹ thuật để theo dõi biến dạng bề mặt. Nhờ thu được dữ liệu 3D chi tiết, stereo camera cho phép đánh giá mức độ và phạm vi chuyển dịch trên mái dốc một cách trực quan. Các nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của stereo camera trong việc theo dõi chuyển động bề mặt mái đất: ví dụ, Feng và cộng sự (2012) đã sử dụng hệ thống hai máy ảnh SLR để giám sát mô hình sạt lở đất trong phòng thí nghiệm. Nhóm này áp dụng hai phương pháp là theo dõi điểm đặc trưng (SIFT) và dựng mô hình bề mặt số (DSM) liên tục để xác định sự dịch chuyển của mái dốc theo thời gian thực, với độ trễ phân tích dưới 1 phút. Kết quả cho thấy có thể phát hiện được sự dịch chuyển và biến dạng thể tích của khối trượt với độ phân giải cao [11]. Như vậy, stereo camera tỏ ra hữu ích trong giám sát trượt đất, đặc biệt ở chỗ cung cấp bằng chứng trực quan về sự thay đổi địa hình bề mặt. Tuy nhiên, hạn chế của công nghệ này là cần tầm nhìn không bị che khuất và ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết xấu hoặc thảm thực vật dày đặc có thể làm giảm chất lượng ảnh và độ chính xác đo đạc [12].

## 2.2. Phân tích chuyển động bằng PIV

Particle Image Velocimetry (PIV) là kỹ thuật đo trường vận tốc của chất lỏng bằng ảnh, vốn được phát triển trong cơ học chất lỏng. Nguyên lý của PIV là rải các hạt/điểm dấu (tracer) trong dòng chảy, sau đó chụp ảnh liên tiếp và sử dụng phương pháp tương quan chéo trên các cặp ảnh kế tiếp để tìm ra vector dịch chuyển của nhóm hạt trong mỗi vùng ảnh nhỏ. Từ độ dịch chuyển và khoảng thời gian giữa hai khung hình, ta tính được vận tốc của dòng chảy tại các vùng đó, tạo thành một bản đồ vector vận tốc toàn cục [13].

Áp dụng PIV cho bề mặt mái dốc đất, nguyên tắc tương tự như trong chất lỏng. Trước khi thí nghiệm, bề mặt mái dốc có thể được “gieo hạt” (seeding) bằng cách rải các vật liệu làm dấu (ví dụ: sơn điểm hoặc rắc hạt màu tương phản) để tạo ra các điểm đặc trưng dễ theo dõi trên ảnh. Trong quá trình mái dốc dịch chuyển (do tác động như mưa), liên tục chụp ảnh bề mặt; mỗi cặp ảnh liên tiếp sẽ được chia thành các cửa sổ nhỏ và tính toán tương quan để xác định vector chuyển dịch của hoa văn điểm dấu trong từng cửa sổ. Kết quả là thu được một trường vector dịch chuyển 2 chiều biểu diễn hướng và độ lớn chuyển dịch của bề mặt đất giữa hai thời điểm liên tiếp. Lặp lại cho toàn bộ chuỗi ảnh, ta có thể theo dõi sự phát triển của trường chuyển vị theo thời gian [14].

Ưu điểm của phương pháp PIV là cung cấp cái nhìn toàn cục về chuyển động trên toàn bề mặt mái dốc, không chỉ tại vài điểm cục bộ. So với việc gắn các cảm biến điểm trên mái dốc, PIV rẻ hơn và an toàn hơn vì chỉ cần camera đặt từ xa. Một số nghiên cứu địa kỹ thuật gần đây đã bắt đầu ứng dụng PIV để theo dõi biến dạng đất và công trình đất. Tuy nhiên, PIV cũng có thách thức: nếu bề mặt ít đặc trưng (như cát mịn đồng đều) hoặc bị thay đổi đột ngột (như sụp mạnh làm các dấu hiệu bị mất), thuật toán có thể mất dấu hoặc cho kết quả nhiễu. Trong trường hợp sạt lở nghiêm trọng, nhiều điểm trên bề mặt thay đổi vị trí lớn và các “hạt” dấu hiệu bị biến dạng, phương pháp PIV có thể trở nên kém chính xác. Do đó, cần kết hợp PIV với các phương pháp khác để tăng độ tin cậy [15].

## 3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 3.1. Phương pháp thu thập dữ liệu

Camera ZED 2i (Stereolabs) làm thiết bị thu thập ảnh chính. Camera ZED 2i có hai camera song song với khoảng cách cơ sở cố định, cung cấp video màu đồng bộ hai mắt ở độ phân giải cao qua cổng USB 3.0. Thiết bị này đi kèm phần mềm SDK cho phép xuất bản đồ độ sâu của cảnh theo thời gian thực bằng cách xử lý cặp ảnh trái-phải thu được. Theo khuyến cáo của hãng, khoảng cách làm việc tối ưu của camera để đạt độ chính xác độ sâu cao là khoảng 1 - 10 m đối với ZED 2i. Trong thí nghiệm này, camera được gắn cố định trên chân máy, đặt cách chân mái dốc khoảng 1,5 m theo phương ngang để bao quát toàn bộ mái dốc mô hình. Camera được căn chỉnh đảm bảo song song với mặt đất và kết nối với máy tính xách tay để lưu trữ dữ liệu.



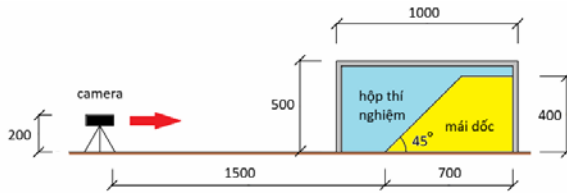
|                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| Tiêu cự (Focal length)       | 4 mm             |
| Khẩu độ (Aperture)           | f/1.8            |
| Phạm vi đo độ sâu            | 1.5 m đến 35 m   |
| Khả năng phát hiện đối tượng | Tối đa 35 m (3D) |
| Độ phân giải                 | 2048 × 1242      |

**Hình 2: Thông số kỹ thuật chính của camera**

Trong quá trình thí nghiệm, stereo camera ZED 2i được thiết lập ghi hình với tốc độ 15 khung hình/giây, độ phân giải 2208 × 1242 pixel cho mỗi khung hình (2K). Thời gian thí nghiệm kéo dài ~ 70 phút, tương đương khoảng 63.000 khung hình ảnh. Dữ liệu được camera lưu dưới định dạng video SVO độc quyền, chứa cả chuỗi ảnh lập thể và bản đồ độ sâu của từng khung hình. Sau thí nghiệm,

tác giả sử dụng API Python do nhà sản xuất cung cấp để trích xuất toàn bộ dữ liệu hình ảnh và độ sâu từ file.svo này. Kết quả thu được ~ 60.000 ảnh màu (mỗi ảnh có hai kênh trái - phải) và ~ 60.000 ảnh độ sâu tương ứng (16-bit) cho từng khung hình thí nghiệm. Do tốc độ ghi thực tế dao động nhẹ, một số nhỏ khung hình bị mất (khoảng 1% tổng số) nhưng phân bố ngẫu nhiên nên không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả chung. Toàn bộ ảnh độ sâu sau đó được chuyển đổi sang định dạng PNG 16-bit để thuận tiện cho xử lý bằng Python.

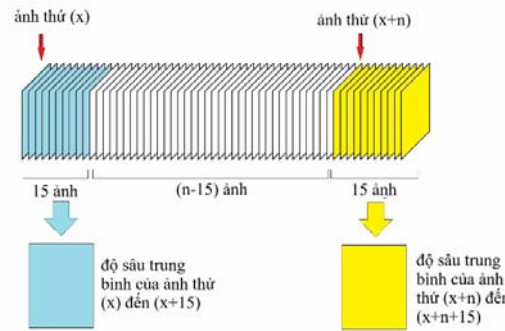
Trước khi phân tích, ảnh màu và ảnh độ sâu được tiền xử lý để giới hạn phạm vi phân tích trong vùng mái dốc. Cụ thể, mỗi khung hình được cắt (crop) lấy phần ảnh chứa mái dốc, bỏ qua phần mép hộp thí nghiệm hoặc nền xung quanh. Kích thước khung hình sau khi cắt là  $394 \times 502$  pixel, vẫn giữ nguyên tỷ lệ và định dạng ảnh gốc. Việc cắt ảnh giúp giảm dữ liệu xử lý nhưng không làm mất thông tin cần thiết về chuyển động của bề mặt mái dốc.



**Hình 3: Sơ đồ hệ thống stereo camera và mô hình dốc thí nghiệm**

### 3.2. Quy trình xử lý ảnh và phân tích dịch chuyển

Quy trình phân tích chuyển dịch được thiết kế gồm nhiều bước xử lý nối tiếp trên dữ liệu ảnh độ sâu và ảnh màu thu được, nhằm trích xuất thông tin về mức độ và vị trí chuyển động của mái dốc theo thời gian. Hình 4 mô tả lưu đồ các bước chính của quá trình xử lý ảnh. Trước tiên, ảnh độ sâu được nạp theo trình tự thời gian. Để giảm nhiễu và sai số phép đo giữa các khung hình đơn lẻ, tác giả áp dụng phương pháp lấy trung bình nhiều khung hình liên tiếp: cứ mỗi khoảng thời gian  $\Delta t$  cố định, chương trình tính trung bình giá trị độ sâu của  $n$  khung hình gần nhau (với  $n$  được chọn phù hợp, tương ứng với  $\Delta t$  trong vài giây). Cách làm này giúp lọc bớt dao động ngẫu nhiên (nhiều) của dữ liệu độ sâu tại từng điểm, đồng thời phản ánh xu hướng dịch chuyển rõ ràng hơn. Trong nghiên cứu này, với tốc độ camera 15 fps, tác giả chọn  $n = 750$  khung (tương đương khoảng 50 giây) cho một lần tính trung bình ở phương pháp quan sát toàn cục, nhằm đảm bảo triệt tiêu nhiễu  $\pm 5$  mm của camera ở từng khung. Kết quả của bước này là tạo ra chuỗi ảnh độ sâu trung bình đại diện cho mái dốc tại các mốc thời gian cách nhau 50 giây.



**Hình 4: Diễn giải quy trình xử lý ảnh**

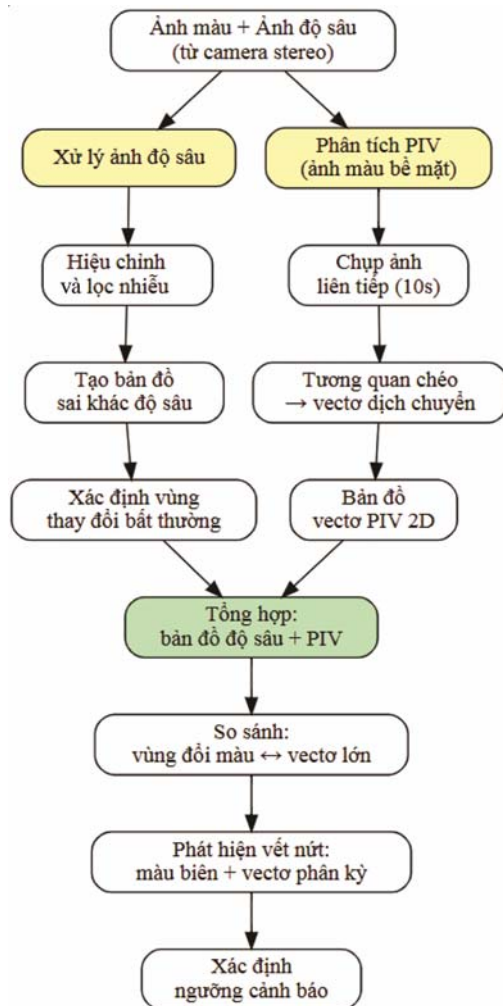
Tiếp theo, để xác định mức độ thay đổi bề mặt qua thời gian, chương trình thực hiện so sánh ảnh độ sâu kế tiếp. Cụ thể, ảnh độ sâu trung bình tại thời điểm  $t_{i+1}$  được trừ cho ảnh độ sâu trung bình tại thời điểm  $t_i$  (với  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ ) để tạo ra một bản đồ sai khác độ sâu. Bản đồ này biểu diễn độ lún/xuất hiện tương đối của từng điểm trên bề mặt: giá trị dương thể hiện điểm đó lùi ra xa hơn so với trước (lún xuống hoặc thụt vào), giá trị âm nghĩa là điểm nhô ra gần camera hơn (phồng lên hoặc dịch chuyển về phía trước). Những vùng không thay đổi đáng kể sẽ có giá trị sai khác xấp xỉ 0. Để trực quan hóa kết quả, bản đồ sai khác độ sâu được mã hóa màu thành bản đồ màu biểu diễn chuyển dịch: các giá trị dương/âm được gán màu nóng/lạnh theo thang màu (ví dụ: điểm lún xuống hiện màu đỏ, điểm nhô lên màu xanh lam), còn vùng ổn định gần như không đổi màu (màu trung tính). Trên bản đồ màu này, ranh giới giữa vùng màu nóng và màu lạnh thường trùng với vị trí vết nứt (do một bên đất lún xuống, bên kia nhô lên tương đối). Để loại bỏ nhiễu, các điểm có giá trị sai khác quá nhỏ (dưới ngưỡng cảm biến  $\sim 5$  mm) được lọc bỏ hoặc tô màu trung tính (ví dụ màu đen) trên bản đồ. Kết quả cuối của bước xử lý ảnh độ sâu là một loạt bản đồ chuyển dịch theo màu qua các giai đoạn khác nhau, cung cấp cái nhìn tổng quát về diễn biến chuyển dịch trên toàn mái dốc.

Song song với xử lý ảnh độ sâu, các ảnh màu chụp bề mặt mái dốc cũng được phân tích bằng kỹ thuật PIV để thu được trường vector chuyển dịch. Quá trình phân tích PIV được thực hiện bằng phần mềm MATLAB với gói toolbox PIV. Các ảnh liên tiếp cách nhau một khoảng thời gian nhất định (ví dụ 10 giây) được chọn để phân tích nhằm bắt được chuyển dịch đủ lớn. Mỗi cặp ảnh đầu - cuối trong khoảng thời gian đó được chia thành lưới các ô cửa sổ (ví dụ kích thước  $16 \times 16$  pixel) và áp dụng thuật toán tương quan chéo để tìm độ dịch chuyển của hoa văn hạt giữa hai ảnh. Kết quả cho mỗi cặp ảnh là một bản đồ vector 2D (vector PIV), trong đó



mỗi vector đại diện cho chuyển dịch trung bình của vùng bề mặt tương ứng trong khoảng thời gian phân tích. Bằng cách lặp lại cho các giai đoạn kế tiếp, ta xây dựng được một chuỗi bản đồ vector PIV mô tả sự thay đổi chuyển động theo thời gian [16].

Cuối cùng, kết quả từ hai phương pháp (bản đồ màu sai khác độ sâu và bản đồ vector PIV) được tổng hợp và so sánh để phân tích toàn diện. Các vùng có màu sắc thay đổi rõ rệt trên bản đồ độ sâu thường tương ứng với nơi có vector PIV lớn (dịch chuyển nhiều). Ngược lại, những khu vực ổn định sẽ không có màu nổi bật và vector PIV ngắn. Việc kết hợp hai kết quả giúp hiệu chỉnh lẫn nhau: nếu có nhiều hoặc sai sót ở một phương pháp, phương pháp kia có thể bổ trợ phát hiện. Chẳng hạn, vết nứt xuất hiện sẽ được nhận biết bởi cả vùng biên đổi màu trên bản đồ độ sâu lẫn sự phân kỳ của các vector PIV hai bên vết nứt (vector hướng ra xa nhau). Thông tin tổng hợp này sau đó được sử dụng để xác định ngưỡng cảnh báo.



**Hình 5: Quy trình xử lý kết hợp giữa phân tích ảnh độ sâu và PIV**

### 3.3. Phát hiện vết nứt và cảnh báo dịch chuyển

Dựa trên kết quả phân tích chuyển dịch, tác giả thiết lập tiêu chí để phát hiện vết nứt và kích hoạt cảnh báo sớm. Tiêu chí đầu tiên là sự xuất hiện của dị thường trong trường chuyển dịch: cụ thể, nếu tại một vùng cục bộ trên mái dốc xuất hiện biến dạng đột ngột - biểu hiện qua việc các điểm kề nhau có chuyển dịch khác biệt lớn hoặc vector PIV trong vùng có phương và độ lớn thay đổi bất thường - thì hệ thống xác định đó có thể là vị trí vết nứt hình thành. Ví dụ, khi quan sát các điểm trên và dưới vị trí dự kiến vết nứt: trước khi nứt, chúng di chuyển đồng đều; ngay khi vết nứt hình thành, điểm phía trên có xu hướng trượt xuống còn điểm phía dưới có thể nhô lên hoặc ít chuyển động, tạo nên sự phân kỳ chuyển động rõ rệt giữa hai điểm lân cận.

Tiêu chí thứ hai liên quan đến mức độ chuyển dịch tuyệt đối. Hệ thống liên tục theo dõi độ lớn chuyển dịch trung bình trên toàn mái dốc và tại các vị trí trọng yếu (ví dụ đỉnh, chân mái dốc). Nếu phát hiện tốc độ chuyển dịch vượt quá ngưỡng cho phép (ngưỡng được hiệu chỉnh dựa trên dữ liệu thí nghiệm - ví dụ vài mm/phút), hệ thống sẽ kích hoạt cảnh báo dịch chuyển ngay cả khi chưa thấy vết nứt rõ ràng. Ngưỡng này nhằm bắt các trường hợp mái dốc trượt dần dần (creep) trên diện rộng mà không hình thành vết nứt lớn.

Trong nghiên cứu, tác giả tập trung vào cảnh báo dựa trên vết nứt vì đây là dấu hiệu sớm. Hệ thống được lập trình để phát cảnh báo mức 1 (cảnh báo chú ý) khi phát hiện vết nứt đầu tiên xuất hiện. Nếu vết nứt tiếp tục mở rộng nhanh (chuyển dịch giữa hai mép nứt tăng nhanh) hoặc xuất hiện thêm nhiều vết nứt khác, hệ thống nâng lên cảnh báo mức 2 (cảnh báo khẩn cấp), cho thấy nguy cơ sạt lở cao. Thông tin cảnh báo bao gồm vị trí vết nứt trên mái dốc, thời điểm phát hiện và tốc độ phát triển của vết nứt. Tóm lại, phương pháp nghiên cứu của đề tài kết hợp hai cách tiếp cận: (1) Quan trắc dịch chuyển toàn cục bằng ảnh độ sâu và PIV để không bỏ sót bất kỳ sự thay đổi nào trên bề mặt mái dốc; và (2) Phát hiện dấu hiệu cục bộ quan trọng (vết nứt) để đưa ra cảnh báo sớm trước khi xảy ra trượt đất lớn. Sự kết hợp này tận dụng ưu điểm của mỗi phương pháp.

## 4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

### 4.1. Thiết lập mô hình mái dốc thí nghiệm

Để kiểm chứng phương pháp, tác giả đã tiến hành thí nghiệm trên mô hình mái dốc thu nhỏ trong phòng thí nghiệm. Mái dốc được xây dựng

bên trong một thùng chứa kích thước 30 cm (rộng) × 50 cm (cao) × 100 cm (dài). Thùng có khung kim loại và vách bên bằng nhựa trong suốt để thuận tiện quan sát từ bên ngoài. Vật liệu tạo mái dốc là cát khô rời, được đổ từng lớp mỏng (~ 5 cm) và phun sương nước tạo ẩm nhẹ để tăng độ kết dính tạm thời. Bằng cách làm ẩm từng lớp và đầm nhẹ, tác giả đã đắp được mái dốc với độ dốc ~ 50°, lớn hơn góc nghỉ tự nhiên của cát (~ 30 - 35°). Nhờ giữ ẩm, mái dốc đứng vững ban đầu dù dốc, nhưng khi tiếp tục thêm nước sẽ dẫn đến mất ổn định - mô phỏng quá trình mưa khiến mái dốc bão hòa và trượt.



**Hình 6: Đối tượng mô hình mái dốc thí nghiệm**

Để gây mưa nhân tạo, một hệ thống vòi phun nước được lắp đặt phía trên mô hình. Cụ thể, vòi phun dạng sương đặt cách đỉnh mái 50 cm, vuông góc với mặt mô hình, đảm bảo bao phủ đều toàn bộ mái dốc. Lưu lượng phun được điều chỉnh tương đương mưa 50 mm/giờ - cường độ khá lớn thường gây sạt lở trong thực tế. Nước từ vòi phun được cấp liên tục từ một bể chứa 75 lít thông qua ống dẫn, đảm bảo dòng chảy ổn định trong suốt thí nghiệm. Nước mưa sau khi thấm và chảy tràn trên mái dốc được thu gom vào khay nhựa đáy thùng và thoát ra ngoài qua hệ thống xả, tránh ngập úng quá mức.

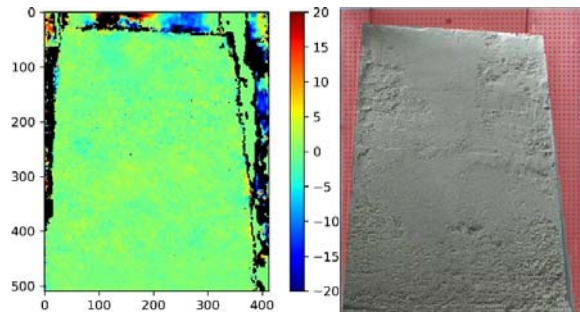
Sau khi chuẩn bị mái dốc và hệ thống mưa, stereo camera ZED 2i được đặt trên chân máy phía trước mô hình như mô tả ở mục 3.1. Vị trí camera cách chân mái dốc ~ 1,5 m, ngang với khoảng giữa chiều cao mái để có góc nhìn bao quát và chính diện. Camera được cân chỉnh thẳng bằng bằng thước nivo, đảm bảo trục ngang camera song song với mặt đất. Khi mọi thứ đã sẵn sàng, thí nghiệm được tiến hành: bật vòi phun cho mưa liên tục xuống mái cát và đồng thời kích hoạt stereo camera ghi hình. Camera thu thập dữ liệu hình ảnh và độ sâu toàn bộ quá trình từ khi mái dốc còn ổn định đến khi sạt lở hoàn toàn.

Quá trình thí nghiệm kéo dài khoảng 1 giờ. Trong thời gian này, quan sát bằng mắt thường qua vách kính cho thấy mái dốc trải qua nhiều giai đoạn: bắt đầu thấm nước, xuất hiện dòng chảy bề mặt nhỏ, rồi một vết nứt hình thành trên đỉnh mái, tiếp đó vài vết nứt khác ở gần chân mái, và cuối cùng một mảng lớn đất trượt xuống (sạt lở hoàn toàn). Tất cả các diễn biến này được hệ thống camera ghi lại để phân tích chi tiết ở bước xử lý sau.

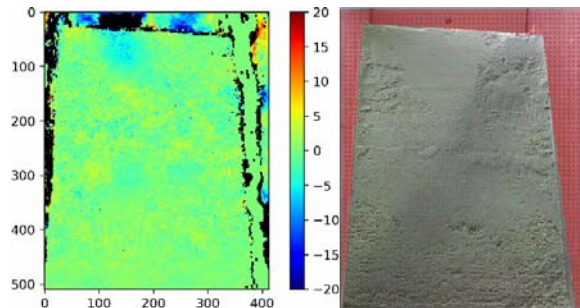
#### 4.2. Kết quả phát hiện chuyển dịch và vết nứt

Sau thí nghiệm, dữ liệu ảnh được phân tích theo quy trình đã mô tả ở mục 3.2. Kết quả cho thấy hệ thống đã phát hiện rõ ràng các giai đoạn chuyển dịch của mái dốc và sự xuất hiện của vết nứt chính, phù hợp với quan sát thực tế. Có thể chia diễn biến trượt đất trong thí nghiệm thành một số giai đoạn chính và đối chiếu với kết quả phân tích như sau:

##### **Giai đoạn 1 (Ổn định ban đầu):**



**Hình 7: Giai đoạn 1 - Thời điểm bắt đầu**



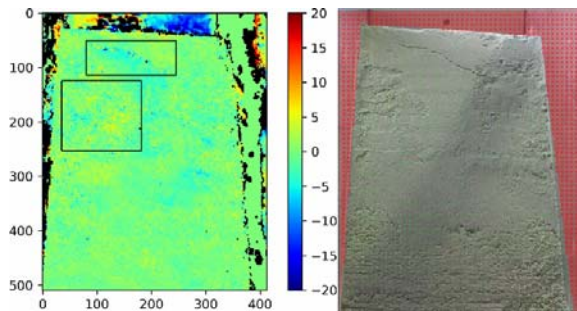
**Hình 8: Giai đoạn 1 - Thời điểm kết thúc**

Từ khi bắt đầu mưa đến khoảng giây thứ 733 của thí nghiệm (tương ứng frame #0 đến frame #11.000). Trong phần lớn giai đoạn này, mái dốc chưa có chuyển động đáng kể, cả bản đồ chuyển dịch độ sâu và vector PIV đều cho thấy rất ít biến đổi trên toàn bề mặt. Tuy nhiên, tại thời điểm khoảng 733 s, hệ thống phát hiện dấu hiệu bất thường nhỏ: bản đồ màu xuất hiện một vùng màu vàng nhạt cục bộ trên đỉnh mái dốc, tương ứng với

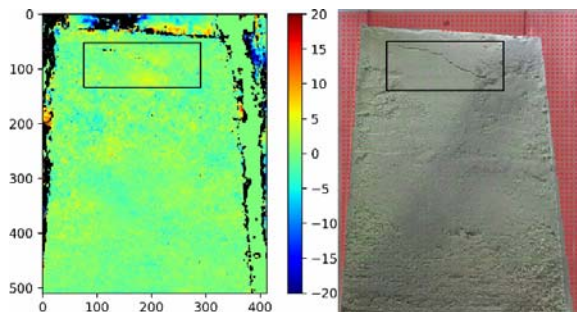


điểm bị dịch chuyển xa khoảng 5 mm khỏi vị trí ban đầu. Đồng thời, các vector PIV tại khu vực này bắt đầu dài ra, chỉ thị có chuyển động. Đối chiếu hình ảnh, đây chính là lúc vết nứt đầu tiên xuất hiện trên đỉnh mái dốc. Như vậy, hệ thống đã nhận biết vết nứt ngay khi nó hình thành, thông qua việc ghi nhận một chuyển dịch rất nhỏ (~5 mm) khác thường trên bề mặt ổn định. Cảnh báo mức 1 được kích hoạt ở thời điểm này, báo hiệu mái dốc bắt đầu mất ổn định.

**Giai đoạn 2 (Phát triển vết nứt):** Từ ~ 733 s đến ~ 1.333 s (frame #11.001 đến #20.000).



**Hình 9: Giai đoạn 2 - Thời điểm bắt đầu**

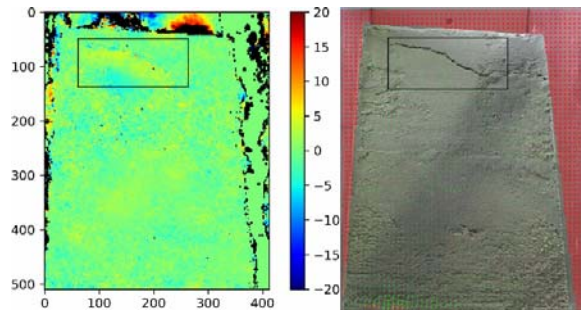


**Hình 10: Giai đoạn 2 - Thời điểm kết thúc**

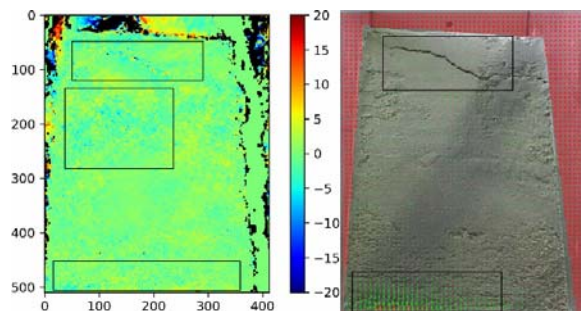
Trong giai đoạn này, mưa tiếp tục làm mái dốc suy yếu. Kết quả phân tích cho thấy chuyển dịch tăng dần: trên bản đồ màu, các vùng màu vàng (lún xuống) xuất hiện ngày càng nhiều và rõ hơn, đặc biệt quanh khu vực vết nứt đỉnh. Độ lớn chuyển dịch ước tính đạt đến vài chục mm. Trên ảnh thực, vết nứt đỉnh mở rộng nhanh về bề rộng và dài hơn. Đồng thời, hệ thống cũng phát hiện các vết nứt mới ở gần chân mái dốc: khoảng giữa giai đoạn 2, bản đồ màu cho thấy một dải màu vàng xanh xen kẽ ở chân, vector PIV khu vực này cũng xuất hiện hướng trượt xuống rõ rệt, đó là dấu hiệu một loạt vết nứt nhỏ ở chân mái dốc bắt đầu hình thành. Cảnh báo mức 2 được kích hoạt do xuất hiện nhiều vết nứt đồng thời. Nhìn chung, trong giai đoạn 2, các vết nứt phát triển liên tục, thể hiện rõ qua sự thay đổi màu sắc xung quanh vị trí các vết nứt trên

bản đồ chuyển dịch. Vector PIV trên đỉnh mái và chân mái dốc đều dài ra, chỉ ra tốc độ chuyển động tăng lên.

**Giai đoạn 3 (Tiền sạt lở):** Từ ~ 1.333 s đến ~ 2.000 s (frame #20.001 đến #30.000).



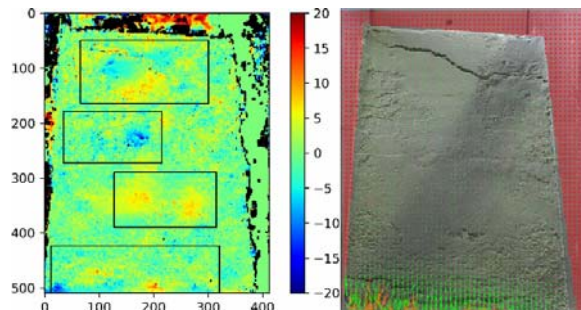
**Hình 11: Giai đoạn 3 - Thời điểm bắt đầu**



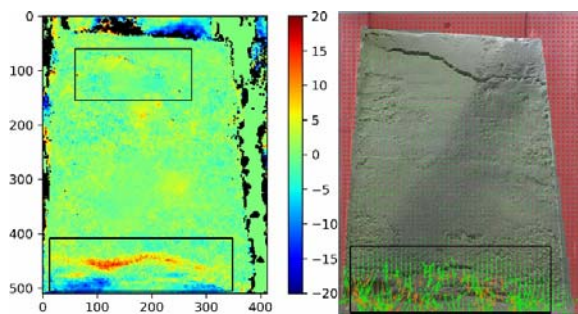
**Hình 12: Giai đoạn 3 - Thời điểm kết thúc**

Kết quả phân tích trong giai đoạn này tương tự xu hướng giai đoạn 2 nhưng mức độ cao hơn. Vết nứt đỉnh tiếp tục mở rộng và đất phía trên vết nứt dịch xuống rõ rệt. Bản đồ màu cho thấy quanh vết nứt đỉnh luôn có dải màu vàng xen lẫn xanh (biểu thị sự chênh lệch độ cao hai bên mép nứt tăng lên). Ở chân mái, có hiện tượng trượt khối nhỏ: một phần đất chân mái trượt nhẹ, PIV ghi nhận các vector tại chân hướng ra ngoài (phía chân mái) dù rất nhỏ. Điều này phù hợp với quan sát là dưới chân mái dốc bắt đầu trượt lở cục bộ do đất bão hòa nước.

**Giai đoạn 4 (Sạt lở cục bộ liên tiếp):** Từ ~ 2.000 s đến ~ 3.400 s (frame #30.001 đến #51.000).



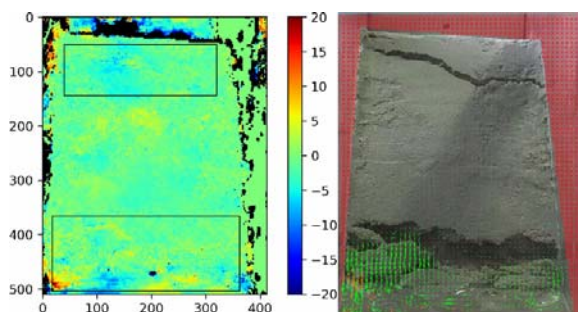
**Hình 13: Giai đoạn 4 - Thời điểm bắt đầu**



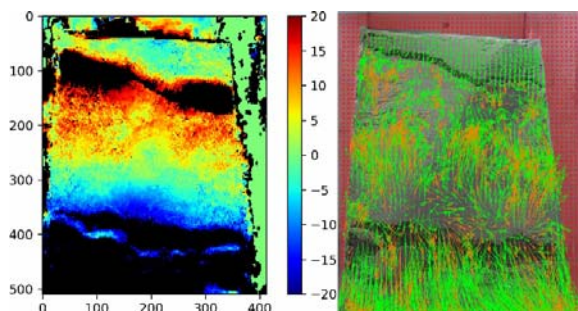
**Hình 14: Giai đoạn 4 - Thời điểm kết thúc**

Đây là giai đoạn mái dốc diễn ra nhiều đợt sụt lún nhỏ liên tiếp, tập trung chủ yếu ở nửa dưới mái dốc. Trên bản đồ chuyển dịch, xuất hiện những mảng màu đỏ và xanh đan xen rất rõ rệt ở vùng chân mái dốc. Màu đỏ đậm cho thấy những khu vực đất sụt xuống đáng kể, còn màu xanh đậm kề bên cho thấy đất/trầm tích đẩy ra ngoài. Những mảng màu tương phản này chính là dấu hiệu của các khối đất luân phiên trượt xuống. Vết nứt ở đỉnh vẫn tiếp tục mở rộng nhưng tốc độ chậm hơn so với các diễn biến ở chân. Phân tích PIV cho thấy vector dịch chuyển tại vùng chân mái rất lớn, chỉ hướng trượt xuống và ra ngoài, biểu thị tốc độ chuyển dịch nhanh ở đó. Vector ở đỉnh cũng tăng chiều dài, nhưng chủ yếu chỉ sự sụt lún tại chỗ. Có thể hiểu rằng nước ngầm làm tăng đất dưới cùng mất ổn định và trượt trước, kéo theo các phần phía trên. Hệ thống cảnh báo tiếp tục duy trì mức 2 trong giai đoạn này, báo hiệu nguy hiểm cao.

**Giai đoạn 5 (Sạt lở toàn bộ):** Sau  $\sim 3.400$  s (từ frame #51.001 đến khi kết thúc).



**Hình 15: Giai đoạn 5 - Thời điểm bắt đầu**



**Hình 16: Giai đoạn 5 - Thời điểm kết thúc**

Cuối thí nghiệm, toàn bộ phần mái dốc phía trên vết nứt chính sụp đổ và trượt xuống rất nhanh trong vòng vài giây. Kết quả phân tích cho thấy ngay trước và trong thời điểm sạt lở cuối cùng, bản đồ màu biến đổi mạnh trên toàn vùng mái dốc, hầu như cả mái phủ màu đỏ/xanh lộn xộn - dấu hiệu chuyển động hỗn loạn và rất lớn. Vector PIV trong khoảnh khắc này trở nên mất trật tự: nhiều vector dài xuất hiện chỉ theo nhiều hướng, thậm chí có vector chỉ phương hướng lên trên, điều này không phản ánh đúng thực tế và là do thuật toán PIV bị rối bởi quá nhiều điểm thay đổi đột ngột và các dấu hiệu (hạt) trên bề mặt bị cuốn trôi, biến dạng. Nói cách khác, trong pha sụp đổ hoàn toàn, phương pháp PIV không còn theo dõi chính xác được chuyển động vì bề mặt thay đổi quá nhanh và không còn cấu trúc để bám dấu. Tuy nhiên, bản đồ độ sâu vẫn ghi nhận rõ ràng sự sụp đổ: hầu hết các điểm trên mái đều lún xuống rất mạnh (thể hiện màu đỏ đậm diện rộng). Thí nghiệm kết thúc khi mái dốc ngừng chuyển động.

Nhìn chung, hệ thống quan trắc đã theo dõi sát diễn biến của mái dốc trong suốt thí nghiệm. Vết nứt chính trên đỉnh được phát hiện ngay khi xuất hiện với độ dịch chuyển chỉ vài mm. Các vết nứt phụ ở chân cũng được nhận biết thông qua sự thay đổi cục bộ trên bản đồ chuyển dịch và vector PIV. Trước mỗi lần sạt lở cục bộ, hệ thống đều ghi nhận gia tăng chuyển dịch ở khu vực tương ứng, cho thấy khả năng cảnh báo trước vài chục giây đến vài phút. Kết quả phân tích cũng phù hợp với quan sát bằng mắt thường: những nơi đất trượt hoặc nứt đều tương ứng với vùng có màu và vector nổi bật trên kết quả.

#### 4.3. Đánh giá độ chính xác và khả năng ứng dụng

Độ chính xác của hệ thống: Trong thí nghiệm, hệ thống stereo camera cho phép đo đặc chuyển dịch với độ nhạy cỡ vài mm. Tuy nhiên, do hạn chế về độ phân giải độ sâu, camera ZED 2i có sai số khoảng  $\pm 5$  mm cho mỗi phép đo độ sâu giữa hai khung hình liên tiếp. Điều này có nghĩa là những chuyển dịch nhỏ hơn 5 mm khó phân biệt với nhiễu. Để khắc phục, phương pháp đã sử dụng kỹ thuật lấy trung bình nhiều khung hình (như trình bày ở mục 3.2) giúp giảm sai số ngẫu nhiên. Kết quả cho thấy hệ thống có thể phát hiện vết nứt với độ mở cỡ  $\sim 5$  mm (điển hình như vết nứt đỉnh xuất hiện được phát hiện với chuyển dịch  $\sim 5$  mm) - tương ứng ngưỡng nhạy của phép đo. Đối với các chuyển dịch lớn hơn (vài chục mm trở lên), sai số tương đối rất nhỏ (dưới 10%). Nhìn chung, sai số tuyệt đối khoảng  $\pm 5$  mm có thể chấp nhận được trong bối cảnh cảnh báo sạt lở, bởi những chuyển dịch đáng lo ngại thường ở mức hàng chục mm trở



lên. Ngoài ra, hệ thống không ghi nhận cảnh báo giả (false positive) nào khi mái dốc ổn định: trong giai đoạn đầu, camera hầu như không cảnh báo cho đến khi vết nứt thực sự xuất hiện. Điều này cho thấy độ tin cậy của hệ thống trong việc tránh báo động nhầm khi chưa có diễn biến nguy hiểm rõ rệt.

Khả năng ứng dụng thực tế: Kết quả thành công trên mô hình thí nghiệm chứng minh tiềm năng ứng dụng của hệ thống trong thực tế. So với các phương pháp truyền thống, giải pháp sử dụng stereo camera và PIV có một số ưu điểm nổi bật:

- Giám sát diện rộng: Chỉ với một cụm camera đặt ở vị trí an toàn (ví dụ đặt đối diện sườn đồi), hệ thống có thể quan sát toàn bộ bề mặt mái dốc. Mọi chuyển động ở bất kỳ điểm nào trên mái cũng sẽ được ghi nhận, khắc phục hạn chế của cảm biến điểm (chỉ đo tại vị trí đặt cảm biến). Như thí nghiệm cho thấy, hệ thống theo dõi được đồng thời đỉnh và chân mái dốc - hai khu vực cách nhau đáng kể - mà không cần thêm thiết bị.

- Cảnh báo sớm hơn: Nhờ phát hiện được vết nứt - dấu hiệu mà các cảm biến nghiêng hay dịch chuyển truyền thống có thể bỏ sót - hệ thống cho phép cảnh báo sớm hơn trước khi khối trượt thực sự xảy ra. Trong thí nghiệm, cảnh báo được đưa ra ngay khi vết nứt đỉnh xuất hiện, sớm hơn vài phút so với lúc mái dốc bắt đầu trượt rõ ràng. Thời gian cảnh báo sớm này rất quý giá để có biện pháp ứng phó (di tản người dân, đóng đường, v.v.).

- Chi phí và an toàn: Stereo camera có chi phí vừa phải và việc lắp đặt tương đối đơn giản (chỉ cần cố định trên bệ, không tiếp xúc trực tiếp mái dốc). Hệ thống không đòi hỏi phải chôn thiết bị trong đất hay kéo dây cảm biến qua sườn đồi, nhờ đó giảm rủi ro cho người lắp đặt ở địa hình nguy hiểm. Công tác bảo trì cũng thuận tiện hơn do thiết bị tập trung tại một chỗ, dễ tiếp cận.

Tuy nhiên, để triển khai thực tế, cần cân nhắc một số vấn đề. Thứ nhất, điều kiện môi trường ngoài trời khắc nghiệt hơn phòng thí nghiệm: mưa to, sương mù, ánh sáng yếu ban đêm có thể ảnh hưởng đến chất lượng ảnh. Có thể khắc phục bằng cách sử dụng vỏ bảo vệ camera, hệ thống chiếu sáng bổ sung (đèn hồng ngoại hoặc LED) và lựa chọn thời gian phơi sáng camera phù hợp. Thứ hai, dữ liệu thu được rất lớn (camera tốc độ cao), do đó xử lý thời gian thực là thách thức. Nghiên cứu này phân tích dữ liệu sau thí nghiệm nên không có hạn chế thời gian, nhưng để ứng dụng cảnh báo thực, cần tối ưu thuật toán để chạy liên tục 24/7. Một giải pháp là giảm tốc độ khung hình hoặc độ phân giải khi điều kiện ổn định và chỉ tăng khi phát hiện

bất thường. Ngoài ra, việc điều chỉnh tham số như số khung trung bình  $n$  hay kích thước cửa sổ PIV cần linh hoạt tùy theo tình huống để cân bằng giữa độ chính xác và tốc độ xử lý.

Mặc dù còn cần hoàn thiện, hệ thống đã cho thấy triển vọng lớn. Trong tương lai, việc thử nghiệm hiện trường tại các khu vực có nguy cơ sạt lở cao sẽ được tiến hành để đánh giá hiệu quả hệ thống dưới điều kiện thực tế. Đồng thời, hướng đến tích hợp hệ thống vào mạng lưới cảnh báo sớm tổng thể: dữ liệu camera có thể kết hợp với dữ liệu mưa, mực nước ngầm, cảm biến khác để tăng độ tin cậy cảnh báo. Hơn nữa, khả năng giám sát thời gian thực sẽ được phát triển, nhằm cho phép tự động đưa ra cảnh báo ngay khi phát hiện dấu hiệu nguy hiểm tức thì. Với những cải tiến đó, công nghệ này hứa hẹn trở thành một công cụ hữu ích trong quản lý thiên tai sạt lở đất ở Việt Nam cũng như các quốc gia có địa hình đồi núi.

## 5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã trình bày một phương pháp quan trắc và cảnh báo sạt lở đất mới, kết hợp stereo camera và phân tích ảnh PIV để theo dõi chuyển dịch mái dốc và phát hiện vết nứt. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Hệ thống sử dụng stereo camera ZED 2i cho phép thu thập dữ liệu độ sâu liên tục của bề mặt mái dốc với độ phân giải cao. Kết hợp với thuật toán xử lý ảnh, hệ thống có thể tái hiện động học bề mặt mái dốc theo thời gian, giúp các biến dạng nhỏ được thể hiện rõ ràng qua bản đồ màu và vector chuyển dịch.

- Vết nứt mái dốc - một trong những chỉ dấu quan trọng của sạt lở, được phát hiện ngay khi độ dịch chuyển chỉ khoảng 5 mm, qua đó cảnh báo sớm trước khi xảy ra trượt đất lớn. Đây là ưu điểm nổi bật so với các phương pháp truyền thống chỉ dựa vào đo chuyển vị hoặc gia tốc nền.

- Phương pháp kết hợp giúp nâng cao độ tin cậy của kết quả: Bản đồ sai khác độ sâu cung cấp thông tin về mức độ và phạm vi biến dạng, trong khi phân tích PIV cung cấp thông tin về hướng và tốc độ chuyển động. Sự tương đồng giữa kết quả hai phương pháp tại các vị trí bất thường (chẳng hạn đều cho thấy biến động tại vị trí vết nứt) tăng cường độ tin cậy của kết luận.

- Hệ thống bước đầu cho thấy độ chính xác chấp nhận được với sai số khoảng  $\pm 5$  mm. Mặc dù có giới hạn trong việc phát hiện những chuyển dịch cực nhỏ, độ nhạy này đủ để nhận biết các thay đổi địa chất đáng kể phục vụ cảnh báo sạt lở.

- Về khả năng ứng dụng, hệ thống stereo camera + PIV là giải pháp giám sát sạt lở tiềm năng, có ưu thế về chi phí, độ phủ không gian, và an toàn vận hành. Hệ thống phù hợp giám sát những vị trí xung yếu như ta-luy đường đèo, sườn đồi khu dân cư, nơi việc lắp đặt mạng cảm biến truyền thông khó khăn hoặc tốn kém.

Nghiên cứu cũng gợi mở một số hướng phát triển trong tương lai. Trước hết, cần tiến hành thí nghiệm thực địa trên các mái dốc thực sự để kiểm chứng hiệu quả hệ thống trong điều kiện môi trường phức tạp. Thứ hai, việc tối ưu thuật toán cần được quan tâm để hệ thống hoạt động ổn định và liên tục, bao gồm xử lý dữ liệu lớn và giảm thiểu thời gian trễ. Thứ ba, có thể xem xét kết hợp phương pháp điểm và toàn cục: lắp một số điểm đo cố định (ví dụ bia phản chiếu đo bằng laser) để bổ sung thông tin định lượng chính xác tại vài vị trí, kết hợp với quan trắc ảnh diện rộng để có bức tranh tổng thể. Cuối cùng, tích hợp hệ thống vào các mạng lưới cảnh báo sớm đa cảm biến, sử dụng trí tuệ nhân tạo để phân tích tổng hợp và ra quyết định cảnh báo, sẽ là hướng đi tiềm năng nhằm nâng cao hơn nữa độ tin cậy và thời gian dự báo sạt lở đất.

Tóm lại, nghiên cứu này đã chứng minh tính khả thi của việc sử dụng stereo camera và kỹ thuật PIV trong giám sát và cảnh báo sạt lở. Hệ thống đã phát hiện sớm chuyển dịch và vết nứt trên mô hình thí nghiệm với độ chính xác cao, mở ra triển vọng ứng dụng thực tế.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] <https://edition.cnn.com/2020/10/21/asia/vietnam-floods-weather-intl-hnk/index.html>. "Dozens killed in floods across Vietnam and Cambodia," CNN, 21-Oct-2020. [Online].
- [2] Xu, Q., Dong, X., Ran, J., & Huang, R. (2023). Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China. *Engineering Geology*, 321: 107156.
- [3] Elmoulat, M., El Kamoun, N., & Satori, K. (2020). Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring. *Procedia Computer Science*, 177: 480-487.
- [4] He, R., Tang, H., Dai, Z., Xu, X., & Zhu, J. (2024). Application of artificial intelligence in three aspects of landslide risk assessment: A comprehensive review. *Rock Mechanics Bulletin*, Article 100144.
- [5] Zeng, P., Feng, B., Dai, K., Li, T., Fan, X., & Sun, X. (2024). Can satellite InSAR innovate the way of large landslide early warning? *Engineering Geology*, 342: 107771.
- [6] Onoue, Y., Ishizawa, T., Danjo, T., & Fukuzono, T. (2021). Proposing a method to analyze slope displacement using the distance image data of depth camera. *Journal of Disaster Research*, 16(7), 1086-1095.
- [7] Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798.
- [8] Gallup, D., Frahm, J.-M., Mordohai, P., & Pollefeys, M. (2008). Variable Baseline/Resolution Stereo. In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 1-8. IEEE.
- [9] Scharstein, D., & Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1-3): 7-42.
- [10] Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [11] Feng, T., Liu, X., Scaioni, M., Lin, X., & Li, R. (2012). Real-time landslide monitoring using close-range stereo image sequences analysis. In *Proceedings of the International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012)*, pp. 2150-2155. IEEE.
- [12] Stumpf, A., Kerle, N., & Malet, J.-P. (2013). Object-oriented image analysis for multi-scale landslide detection using stereo imagery and digital terrain models. *Remote Sensing of Environment*, 138: 23-36.
- [13] Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1): 261-304.
- [14] White, D., Take, W. A., & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, 53(7): 619-631.
- [15] Zuccarini, A., Vasu, N. N., Banks, V. J., Bowman, E. T., Leonardi, A., & Berti, M. (2025). PIV analysis of flow-type landslides under suboptimal image conditions. *Landslides*, 22(7): 2413-2432.
- [16] Thielicke, W., & Sonntag, R. (2021). Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software*, 9(1): 12.