

NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG CẢM BIẾN GIA TỐC TRONG QUAN TRẮC VÀ CẢNH BÁO SẠT LỞ

Ngô Thanh Vũ, Nguyễn Thanh Hải
Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

Ngày nhận bài: 25/4/2023; ngày chuyển phản biện: 26/4/2023; ngày chấp nhận đăng: 24/5/2023

Tóm tắt: Quan trắc sạt lở hiện nay tại Việt Nam phần lớn được thực hiện bằng phương pháp đo gián tiếp, tức là sử dụng một hoặc nhiều mốc chuẩn kết hợp với thiết bị chuyên dùng để đo chuyển vị, biến dạng của mái dốc. Tuy nhiên, các phương pháp kể trên phụ thuộc nhiều vào điều kiện tự nhiên như thời tiết (GPS, toàn đạc) hay kỹ thuật phức tạp (Inclinometer). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất ứng dụng cảm biến gia tốc để thu thập, tính toán chuyển vị của cung trượt. Kết quả chuyển vị của đất nền được tính toán thông qua 2 lần tích phân gia tốc. Ngoài ra, nghiên cứu này sử dụng phương pháp khử độ lệch không và bộ lọc Kalman để khử nhiễu tín hiệu đầu vào, tăng độ chính xác của phép tính. Mô hình mô phỏng gồm 3 thành phần: (i) Thiết bị quan trắc gồm vi điều khiển ESP32, cảm biến gia tốc MPU9250 và các mô-đun khác; (ii) Con trượt và (iii) Ray trượt ngang. Khi con trượt chuyển động, thiết bị sẽ tự động thu thập, lưu trữ và tính toán chuyển vị. Sai số giữa kết quả chuyển vị từ thiết bị và thực tế dưới 5%. Từ đó cho phép chúng tôi đề xuất ứng dụng cảm biến gia tốc trong các hệ thống quan trắc và cảnh báo sạt lở.

Từ khóa: Sạt lở, quan trắc và cảnh báo, thiết bị đo lường quán tính (IMU), bộ lọc Kalman.

1. Tổng quan nghiên cứu

Hiện nay, dưới tác động của biến đổi khí hậu, các hiện tượng thời tiết cực đoan xảy ra càng nhiều, ngoài ra phải kể đến các tác động nhân tạo lên môi trường nên sạt lở đất xảy ra ngày càng nhiều và gây thiệt hại to lớn về tính mạng con người và của cải vật chất. Nhằm giảm thiểu các thiệt hại do sạt lở đất gây ra, trên thế giới đã ứng dụng nhiều giải pháp quan trắc khác nhau nhằm giám sát và cảnh báo sạt lở đất. Mặc dù chủng loại và số lượng cảm biến của các hệ thống là khác nhau, tuy nhiên các hệ thống tập trung vào hai đặc trưng chính là hàm lượng nước trong đất và độ chuyển vị của mái dốc.

Hệ thống quan trắc cảnh báo điển hình ứng dụng kết quả đo hàm lượng nước trong đất là hệ thống đặt tại dãy núi Deoksan, tỉnh Gangwon, Hàn Quốc [5]. Vị trí đặt thiết bị đo là nơi đã từng xảy ra lũ quét vào năm 2006 và 2007, và được đánh giá là vẫn còn có nguy cơ xảy ra sạt lở đất cao. Cũng trong nghiên cứu này, nhóm

tác giả cũng đề xuất sử dụng hàm lượng nước lỗ rỗng làm căn cứ để thiết lập ngưỡng cảnh báo, tuy nhiên, để xác định được chính xác ngưỡng cảnh báo thì phải tiến hành thêm các thí nghiệm về tính chất, thành phần hạt của đất. Hệ thống phức tạp và cải tiến hơn là hệ thống KIGAM-LAMOS [16] được xây dựng từ năm 2015 tại Công viên quốc gia Jirisan - Hàn Quốc. Hệ thống này kết hợp nhiều loại cảm biến khác nhau bao gồm cảm biến đo lưu lượng mưa, cảm biến đo độ ẩm trong đất để đánh giá mức độ nguy hiểm, rủi ro xảy ra sạt lở đất. Theo nghiên cứu của HWANG và các cộng sự [7], khi thể tích nước trong đất đạt đến giá trị bão hòa do mưa, có thể gây ra sạt lở mái dốc do sự suy giảm cả cường độ chống cắt và lực dính của đất. Tuy nhiên, theo nghiên cứu của Martin Kuradusenge và các cộng sự tại Rwanda [9], giá trị ngưỡng để cảnh báo dựa vào lượng mưa hoặc hàm lượng nước trong đất cho các khu vực và vị trí khác nhau là không cố định. Bởi vì nó còn phụ thuộc nhiều vào thành phần hạt, địa chất nền đất, hệ số mái dốc, tính chất thảm thực vật. Chính vì thế nên cần phải có các dữ liệu từ các thí nghiệm khác nhau của nhiều khu vực khác nhau để cung cấp dữ liệu đầu vào

Liên hệ tác giả: Ngô Thanh Vũ
Email: nthvu@dut.udn.vn

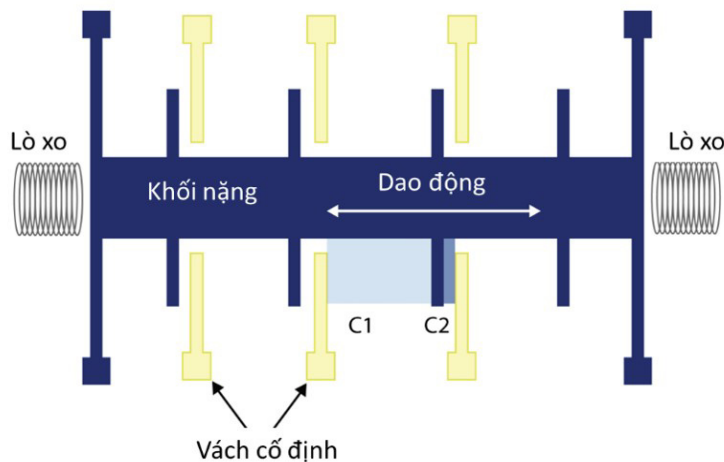
giúp hệ thống hỗ trợ đưa ra quyết định chính xác nhất.

Một số hệ thống khác lại tập trung vào đo chuyển vị của mái dốc bằng cảm biến chuyển vị dây rung (Vibrating Wire Piezometers) như hệ thống quan trắc tại thung lũng sông Thompson - Canada [10]. Hoặc như hệ thống của Chen H và các cộng sự [6] lại sử dụng sợi quang học (fiber Bragg grating - based inclinometer) để đo đặc chuyển vị đồng thời của nhiều lớp đất trên cung trượt và đưa ra cảnh báo.

Hiện nay, bởi giới hạn của một số tính năng kỹ thuật nên rất khó để đo khoảng cách của các đối tượng chuyển động một cách trực tiếp, nên thông thường, để đo khoảng cách của một đối tượng di chuyển thì phương pháp đơn giản nhất được sử dụng là phương pháp gián tiếp, sử dụng một vật chuẩn hay một thiết bị chuẩn để làm mốc đo sự dịch chuyển của một vật. Phương pháp đo gián tiếp này tuy đơn giản, dễ thực hiện nhưng bộc lộ nhiều nhược điểm trong các trường hợp đặc biệt. Để giải quyết vấn đề đo khoảng cách, một phương pháp đo độ dịch chuyển không cần tham chiếu được đề xuất là

sử dụng gia tốc kế. Trong nghiên cứu của Berg (1961), tác giả đã đề xuất phương pháp biến đổi giữa gia tốc, vận tốc và tín hiệu dịch chuyển tại mỗi điểm trong quá trình chuyển động của một sự vật. Sau khi thu được gia tốc, có thể tính toán được tín hiệu vận tốc bằng phương pháp tích phân, tín hiệu chuyển vị có thể tính toán được bằng cách tích phân vận tốc.

Trên thế giới hiện nay có hai chủng loại cảm biến gia tốc chính là cảm biến gia tốc kế áp điện (Piezoelectric Accelerometer) và cảm biến MEMS (Micro Electro - Mechanical Systems) Accelerometer. Cảm biến MEMS là cảm biến gia tốc kế được thiết kế để phát hiện các lực quán tính dựa trên nguyên lý của lực quán tính trên cơ sở của kết cấu khối lò xo giảm chấn (spring-mass) (Hình 1). Ưu điểm chính của dòng cảm biến này là kích thước nhỏ, độ chính xác cao và mạch giao tiếp đơn giản. Đặc biệt có nhiều dòng gia tốc kế cho phép xuất tín hiệu kỹ thuật số trực tiếp, do đó có thể kết nối trực tiếp với vi xử lý mà không cần thêm bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự (Analog) thành tín hiệu số (Digital) (ADC - Analog Digital Converter).



Hình 1. Cơ cấu khối lò xo của MEMS

Gia tốc kế MEMS là một công nghệ mới mang tính cách mạng, được sử dụng rộng rãi trong y tế, quân sự, hàng không vũ trụ và các lĩnh vực khác. Đặc biệt là các ứng dụng liên quan đến địa chấn cũng được phát triển đáng kể trong thập kỷ qua. Jangsoo Lee và các đồng sự [12] đã giới thiệu một thiết bị có thể phát hiện chấn động do động đất và sau đó gửi các thông báo cảnh báo

phù hợp tùy theo cường độ tín hiệu thu thập được. Thiết bị có thể được gắn vào tường hoặc kết cấu khung chịu lực của một tòa nhà. Thiết bị thông minh này được đề xuất chỉ trang bị các cảm biến cần thiết bao gồm gia tốc kế, bộ vi xử lý và mô-đun lưu trữ dữ liệu và mô-đun kết nối Wifi. Thiết bị đã được kiểm nghiệm và chứng minh được khả năng thu thập và xử lý số liệu

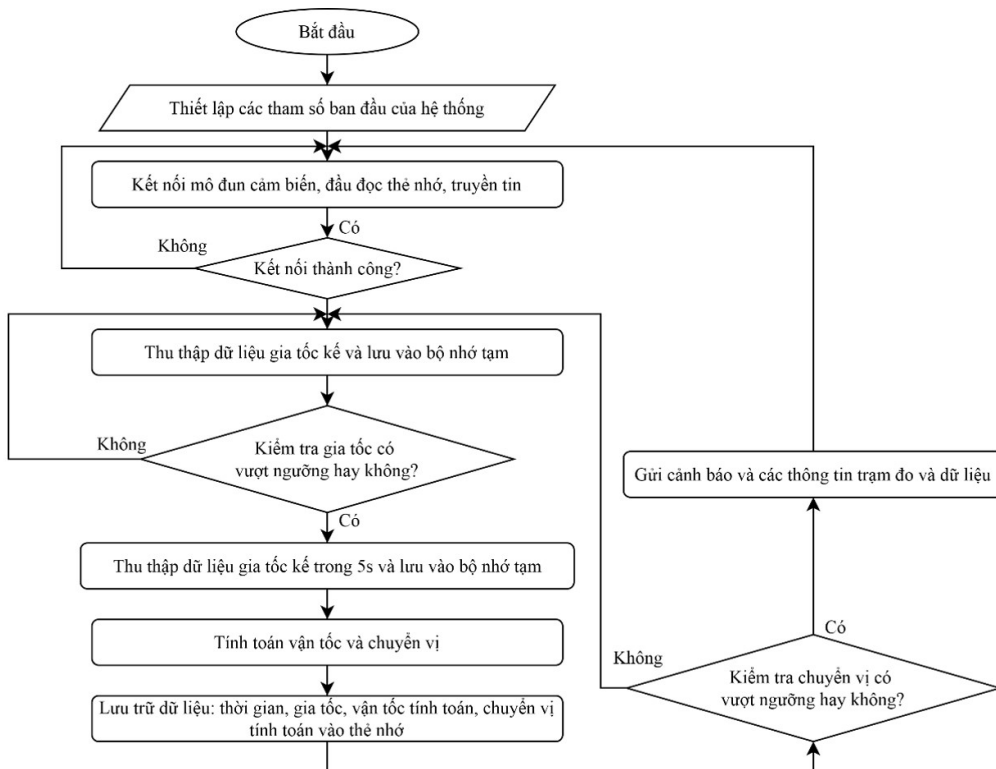
cho hơn 15 trận động đất lớn nhỏ tại Pohang, Hàn Quốc. Giovanni Vitale và các đồng sự [17] cũng sử dụng các gia tốc kế MEMS để xây dựng hệ thống các trạm quan trắc động đất trong khu đô thị (Urban Seismic Network-USN) tại Camerino, miền Trung Italy. Hệ thống này có thể tính toán gần như lập tức vị trí tâm chấn cũng như cường độ trận động đất, giúp tăng cường khả năng cảnh báo và phản ứng nhanh nhằm giảm thiểu thiệt hại. Tuy nhiên báo cáo cũng chỉ ra một số tồn tại của hệ thống như mức độ nhiễu nền của hệ thống cao làm giảm khả năng phát hiện các trận động đất có cường độ nhỏ hoặc tâm chấn ở xa hệ thống USN. Kết luận này cũng tương đồng với kết luận trong bài báo của Antonino D’Alessandro và các cộng sự [3], bất chấp những tiến bộ đã đạt được trong thập kỷ qua, hiệu suất của cảm biến MEMS vẫn chưa thể so sánh với các cảm biến truyền thống.

Mặc dù cảm biến MEMS được ứng dụng trong nhiều hệ thống quan trắc địa chấn, tuy nhiên các ứng dụng liên quan đến quan trắc sạt lở đất lại khá hạn chế. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung vào giải pháp quan trắc

chuyển vị bằng cảm biến gia tốc MEMS nhằm đo đạc, phát hiện các chuyển động bất thường của đất nền trong giai đoạn biến dạng ban đầu và biến dạng đều để tiến hành đưa ra các quyết định cảnh báo sạt lở đất. Cũng trong nghiên cứu này, các phương pháp xử lý nhiễu tín hiệu đầu ra của cảm biến cũng được đề cập và ứng dụng để tăng độ chính xác của phép tính chuyển đổi từ gia tốc sang chuyển vị.

2. Thiết bị quan trắc sạt lở đất

Hệ thống bao gồm mô-đun thu thập dữ liệu, mô-đun xử lý và lưu trữ dữ liệu, và mô-đun truyền tín hiệu. Công việc chính của bộ vi điều khiển là thu nhận, lưu trữ các dữ liệu thu thập từ cảm biến và tính toán, ra quyết định cảnh báo khi xuất hiện các sự kiện bất thường. Các sự kiện bất thường này được định nghĩa là các số liệu thu thập vượt qua ngưỡng giới hạn đã được lập trình trước như Hình 2. Để đảm bảo dữ liệu đầu vào, thiết lập các tham số để đối sánh, cũng nhằm tính toán các sai số do lỗi chênh lệch đầu ra, các dữ liệu trong vòng 0,5 giây ngay trước sự kiện bất thường cũng sẽ được lưu trữ cùng với dữ liệu của các sự kiện bất thường.



Hình 2. Sơ đồ khối mô tả phương thức hoạt động và ra quyết định của hệ thống

Trong hệ thống này loại cảm biến được sử dụng là gia tốc kế MPU9250 [13] của hãng InvenSense có thể thu thập được 9 tín hiệu chuyển động khác nhau bao gồm 3 trục con quay hồi chuyển, roll, pitch, yaw. 3 trục gia tốc theo 3 phương x, y, z, và 3 trục từ tính theo 3 phương x, y, z (Hình 3). MPU9250

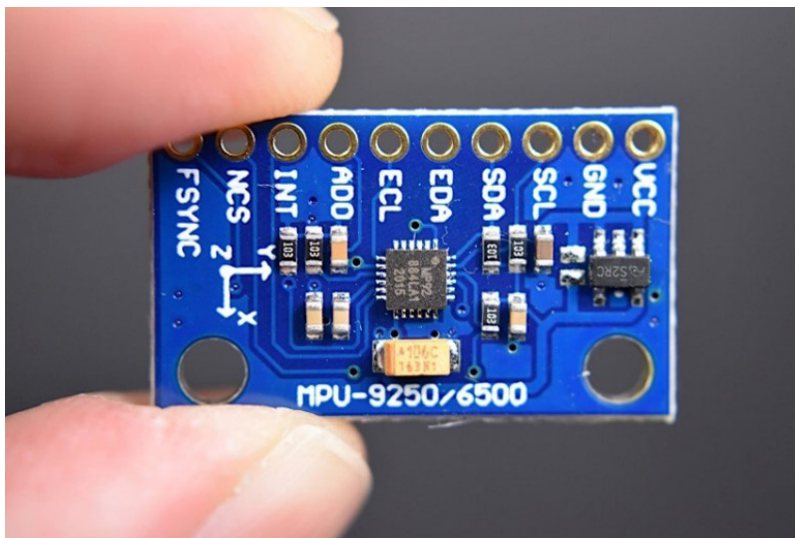
có các thông số cụ thể như Bảng 1. Với việc cảm biến được trang bị sẵn bộ trang bị ADC 16 bit và kết nối với vi xử lý bằng Serial Peripheral Interface (SPI) hoặc Inter - Integrated Circuit (I2C) giúp giảm thiểu tối đa nhiễu do dây nối và tăng cường độ chính xác của hệ thống.

Bảng 1. Các tham số cụ thể của cảm biến MPU9250

		MPU9250	
	Con quay hồi chuyển	Gia tốc kế	Từ kế
Phạm vi tối đa	$\pm 250^\circ/s$	$\pm 2\text{ g}$	$\pm 4800\ \mu\text{T}$
	$\pm 500^\circ/s$	$\pm 4\text{ g}$	
	$\pm 1000^\circ/s$	$\pm 8\text{ g}$	
	$\pm 2000^\circ/s$	$\pm 16\text{ g}$	
Độ phân giải	16 bits	16 bits	14 bits
Độ nhiễu RSM	$0,1^\circ/s\text{-rsm}$	$300\ \mu\text{g}/\text{VHz}$	-

Với đặc thù của các trạm đo, quan trắc sạt lở thường ở những khu vực sườn núi, mái taluy nên việc truyền tín hiệu đi thẳng cũng là một vấn đề khó khăn bởi các vật cản tự nhiên như cây cối, núi, đá... Cộng với độ phủ của hệ thống 3G - 4G ngày càng cao nên việc sử dụng giao thức 3G - 4G được ưu tiên để gửi các tham số quan trắc về máy chủ. Tuy nhiên, tại một số điểm dân cư gần khu vực có nguy cơ sạt lở, chúng ta có thể sử dụng phương thức LORA/LORAWAN để tiết kiệm chi phí. Đặc biệt, tại Đà Nẵng, hệ thống FreeLora [1] cũng đã được xây

dựng, phát triển và đưa vào sử dụng từ năm 2021, hệ thống này nhằm giúp tạo cơ sở hạ tầng để phát triển các công cụ, ứng dụng phục vụ mục tiêu xây dựng thành phố thông minh. Hệ thống này đặc biệt hiệu quả đối với các trạm đo cần băng thông thấp như các hệ thống IoT phục vụ quan trắc môi trường mực nước sông, nồng độ muối trong nước [2]. Đặc biệt dữ liệu thu thập từ thiết bị phục vụ cảnh báo sạt lở đang được nghiên cứu có dung lượng gói tin đủ nhỏ, và hoàn toàn phù hợp với LORA/LORAWAN.



Hình 3. Cảm biến trong hệ thống quan trắc sạt lở MPU9250

Bộ phận tiêu thụ năng lượng lớn nhất của hệ thống quan trắc sạt lở là bộ vi điều khiển ESP32 (Bảng 2), tuy nhiên với mức tiêu thụ năng lượng thấp, tiêu thụ năng lượng tối đa 250 mA tương đương với 0,8 W một giờ hoặc 19,8 W một ngày khi hoạt động tối đa công suất. Đặc biệt chỉ tiêu tổn 150 μ A khi ở chế độ

ngủ đông, tương đương với 0,000495 W một giờ hoặc 0,001188 W một ngày. Tất cả các mô-đun được thiết kế sử dụng đều dùng nguồn 3,3 V, điều này giúp cho việc thiết kế và kết nối mạch trở nên đơn giản hơn, giảm thiểu các sai số phép đo và các tác động khác có thể khiến cho thiết bị làm việc không ổn định.

Bảng 2. Các tham số tiêu thụ năng lượng cụ thể của hệ thống

Thành phần	Tiêu thụ năng lượng
ESP32	250 mA
MPU9250	3,7 mA
SD card	150 mA
Màn hình Oled	20 mA
Đồng hồ thời gian thực RTC	0,1 mA
LORA/LORAWAN	100 mA
Tổng	525,3 mA ~ 1,7 Wh

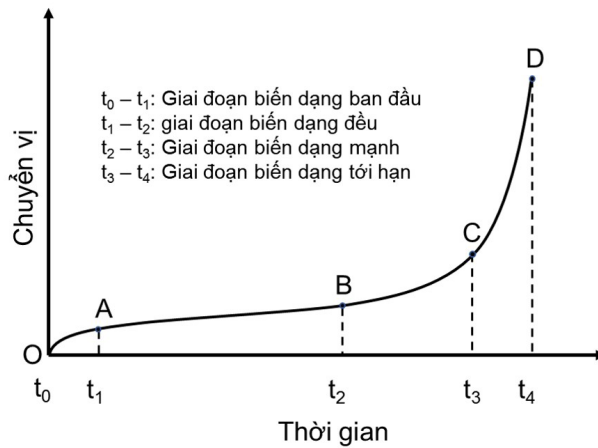
Để cung cấp nguồn năng lượng cho thiết bị hoạt động liên tục, pin năng lượng mặt trời 30 W và mô-đun quản lý sạc MPPT (Maximum Power Point Tracker) cùng hệ pin Lithium lưu trữ 12 v 20 Ah được sử dụng. Pin mặt trời đảm bảo cung cấp đủ điện cho hệ thống vào ban ngày, phần năng lượng dư sẽ được dùng để sạc pin Lithium nhằm duy trì cung cấp năng lượng vào ban đêm. Pin Lithium được tính toán dư công suất để dự phòng cho những thời đoạn thời tiết bất lợi, gây ảnh hưởng đến khả năng cung cấp năng lượng của pin năng lượng mặt trời.

3. Cơ sở lý thuyết

3.1. Dấu hiệu cảnh báo sạt lở đất

Sự hình thành của sạt lở đất điển hình có thể được chia thành bốn giai đoạn (Hình 4), giai đoạn biến dạng ban đầu, giai đoạn biến dạng đều, giai đoạn biến dạng mạnh và giai đoạn biến dạng tới hạn (sạt lở). Trong giai đoạn biến dạng ban đầu (từ t_0 đến t_1), sạt lở có thể bắt đầu khi có sự tác động của con người hoặc các yếu tố tự nhiên khác làm ảnh hưởng, biến đổi về hình dạng mái dốc, vật liệu bao phủ và hàm lượng nước trong

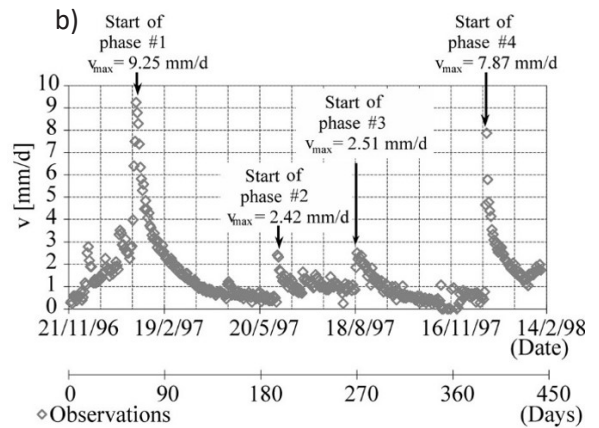
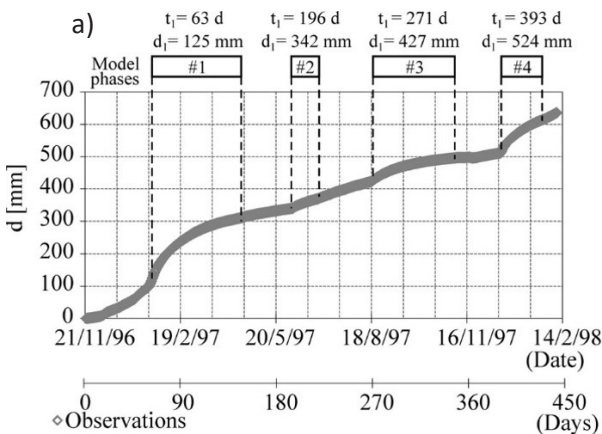
đất. Theo nghiên cứu của Voight (1988), trong giai đoạn này, sự dịch chuyển thường xảy ra đột ngột nhưng với biên độ nhỏ [18]. Sau giai đoạn này, nếu tác nhân gây trượt không vượt quá lực cản đỉnh dọc theo bề mặt trượt và các yếu tố bên ngoài tác động trở nên yếu hơn hoặc biến mất, thì đất nền sẽ dần ổn định ở vị trí mới. Trong trường hợp các yếu tố kích hoạt bên ngoài lớn và động lực vượt qua lực cản, các vật liệu trên bề mặt trượt sẽ bị phá hủy với trạng thái cân bằng động do sự khóa cắt và tăng cường trượt của đất [14]. Điều này dẫn đến sự dịch chuyển tăng dần đều - giai đoạn biến dạng đều (từ t_1 đến t_2). Khi phần lớn đất trên bề mặt trượt đạt đến trạng thái dư và một bề mặt trượt hoàn chỉnh được hình thành, vận tốc cung trượt tăng nhanh hơn giai đoạn biến dạng đều, giai đoạn này được gọi là giai đoạn biến dạng mạnh (từ t_2 đến t_3). Khi cường độ của hầu hết các vật liệu bên trong bề mặt trượt giảm đến mức dư, sự chênh lệch giữa lực dẫn động và lực chống trượt tăng dần. Do đó, gia tốc tăng, độ dịch chuyển tăng nhanh và gây ra sạt lở đất hoàn toàn - giai đoạn biến dạng tới hạn (từ t_3 đến t_4).



Hình 4. Chuyển vị điển hình theo thời gian của sụt lún đất

Trong nghiên cứu của CASCINI Leonardo và các cộng sự [14]. Nghiên cứu được thực hiện tại Vallcebre, Tây Ban Nha, đây là khu vực có quá trình sụt lún điển hình 4 giai đoạn và lượng dữ liệu quan trắc đồ sộ, với tần suất lấy mẫu 20 phút cho 1 lần đo sử dụng cảm biến giãn kế dạng dây (wire extensometer), và thực hiện quan trắc trong 450 ngày. Như được thể hiện tại Hình 5a, b, trong giai đoạn 2, vận tốc cung trượt có sự thay đổi không tuyến tính, từ 2,42 mm/ngày đến 0,7 mm/ngày. Điều này có thể được lý giải rằng trên thực tế,

đất nền không hoàn toàn đồng nhất, giữa bề mặt trượt có nhiều dị vật như đá tảng, rễ cây, hang động hoặc thậm chí sự thay đổi của mực nước ngầm, hay áp lực nước lỗ rỗng trong thời đoạn này cũng là yếu tố cản trở, làm chậm hoặc đẩy nhanh vận tốc của cung trượt. Mặc dù vận tốc của cung trượt có sự biến thiên, không bằng nhau trong suốt giai đoạn này, nhưng chuyển vị lại xảy ra liên tục trong khoảng thời gian kéo dài, nên khi xét cho cả thời đoạn này, chuyển vị của cung trượt được xem như là biến đổi đều.



Hình 5. Dữ liệu quan trắc chuyển vị (a) và vận tốc (b) theo thời gian của sụt lún đất tại Vallcebre

3.2. Xử lý dữ liệu (Data Post Processing) - Bộ lọc Kalman (Kalman Filter)

Các tín hiệu đầu ra thu thập được của gia tốc kế MEMS thường có đặc trưng của độ lệch không (zero drift). Độ lệch không có nghĩa là ở bất kỳ trạng thái nào, cảm biến sẽ xuất ra một

giá trị sai số không đổi theo thời gian. Sai số này có ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán cuối cùng. Hình 6a cho thấy độ lệch không của tín hiệu gia tốc theo 3 phương X, Y, Z của cảm biến ở trạng thái tĩnh. Từ dữ liệu thu thập của nhiều thí nghiệm tĩnh tại phòng thí nghiệm, giá trị độ

lệch không của cảm biến gia tốc là một giá trị cố định. Để giảm độ lệch không của tín hiệu, có thể dùng công thức tính sau:

$$a_{zerodrift} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i}{n} \quad (1)$$

$$a_{i\ zerofix} = a_i - a_{zerodrift} \quad (2)$$

Trong đó, a_i là giá trị của gia tốc tại thời điểm i , $a_{zerodrift}$ là đại lượng trung bình của độ lệch không ngẫu nhiên của cảm biến.

Sau khi xử lý độ lệch không, tín hiệu thu được vẫn còn có các nhiễu ngẫu nhiên hay còn được gọi là nhiễu Gauss cũng là một yếu tố tác động đến độ chính xác của phép toán (Hình 6b). Bộ lọc Kalman thường được sử dụng để xử lý các tín hiệu nhiễu và nhiễu ngẫu nhiên như vậy [11]. Nguyên tắc của lọc Kalman là sử dụng dữ liệu của thời gian trước đó để dự đoán và ước tính

dữ liệu thời điểm tiếp theo. Giả sử rằng phương trình trạng thái và phương trình rời rạc là:

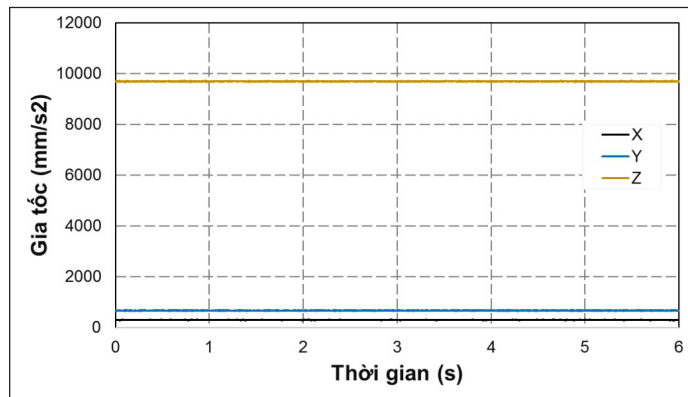
$$X_{k|k-1} = FX_{k-1} + BU_k + \omega_k \quad (3)$$

$$Z_k = H_k X_k + v_k \quad (4)$$

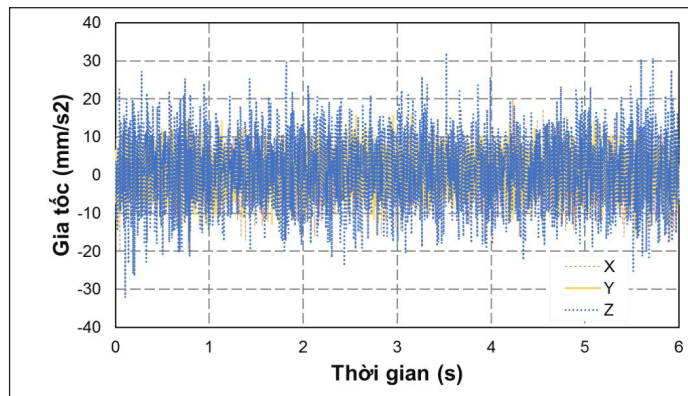
Trong đó F là ma trận chuyển đổi trạng thái, H_k là ma trận đo hệ thống, ω_k là độ lệch ước lượng của hệ thống, v_k là nhiễu hệ thống, và BU_k là đại lượng điều khiển hệ thống.

Tiền đề của bộ lọc Kalman là ω_k và v_k là độc lập. Độ lệch không ngẫu nhiên của gia tốc kế MEMS, nhiễu Gaussian, và phương sai của chúng lần lượt là Q và R . Đầu tiên, hiệp phương sai trạng thái P tại thời điểm này được dự đoán theo giá trị dữ liệu tại thời điểm $k - 1$ như sau:

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1}F^T + Q \quad (5)$$



Hình 6a. Lỗi Zero drift của tín hiệu đầu ra



Hình 6b. Tín hiệu đầu ra sau khi xử lý lỗi độ lệch không (Zero drift)

$$K = \frac{P_{k|k-1}H^T}{HP_{k|k-1}H^T + R} \quad (6)$$

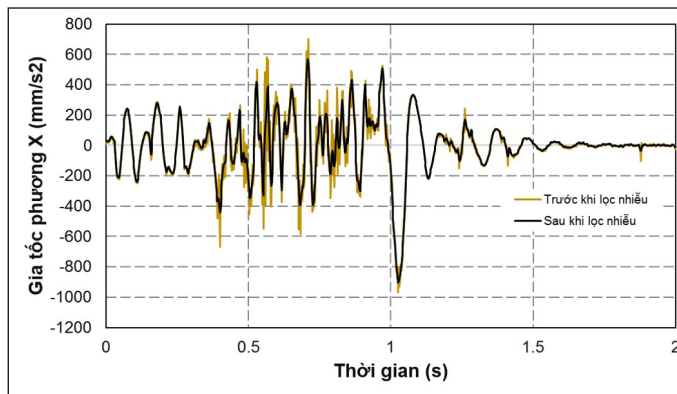
$$X_k = X_{k|k-1} + K(Z_k - HX_{k|k-1}) \quad (7)$$

$$P_k = (I - KH)P_{k|k-1} \quad (8)$$

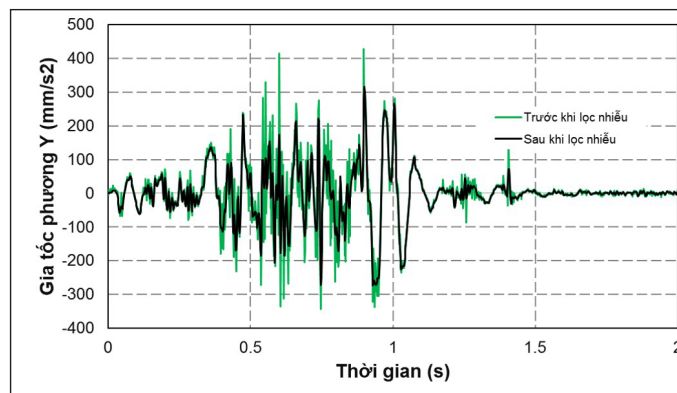
Trong đó: K là hệ số khuếch đại của bộ lọc Kalman tại thời điểm k , X_k là giá trị ước tính tối ưu tại thời điểm k , P_k là phương sai tại thời điểm k . $P_{k|k-1}$ là hiệp phương sai trạng thái tại thời điểm k được dự đoán tại thời điểm $k-1$. I là ma

trận đơn vị.

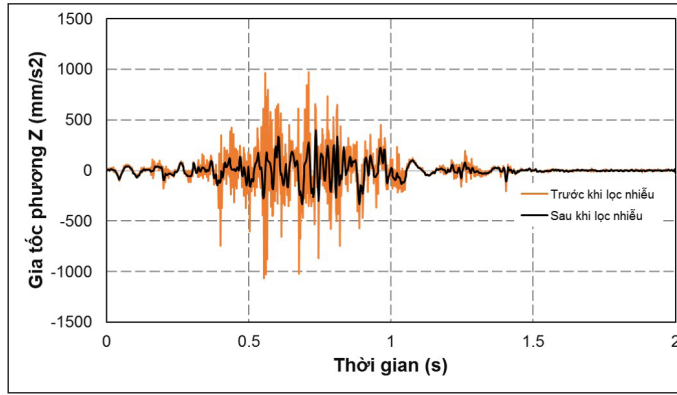
Các bước trên có thể được lặp lại để cập nhật ước tính trạng thái tại mỗi thời điểm để đạt được mục đích tối ưu hóa dữ liệu. Vì chỉ có một biến trạng thái của tín hiệu gia tốc, trạng thái ma trận chuyển tiếp $A = 1$ và $H = 1$ trong công thức lọc Kalman. Hệ thống không có đầu vào nên ma trận điều khiển trạng thái $B = 0$. Sau điều chỉnh tham số Q và xác định R , để các giá trị ban đầu $P_0 = 1$ và $X_0 = 0$. Khi dữ liệu được xử lý bằng bộ lọc Kalman, phần lớn các tín hiệu nhiễu bị loại bỏ như trong Hình 7a, b, c điều này rất hữu ích để cải thiện độ chính xác tính toán của khoảng cách.



Hình 7a. Kết quả trước và sau khi sử dụng thuật toán Kalman Filter để lọc nhiễu của dữ liệu gia tốc theo phương X (TH2)



Hình 7b. Kết quả trước và sau khi sử dụng thuật toán Kalman Filter để lọc nhiễu của dữ liệu gia tốc theo phương Y (TH2)



Hình 7c. Kết quả trước và sau khi sử dụng thuật toán Kalman Filter để lọc nhiễu của dữ liệu gia tốc theo phương Z (TH2)

3.3. Cơ sở lý thuyết của tính toán chuyển vị

Với điều kiện kỹ thuật giới hạn của bộ vi xử lý trung tâm, như tốc độ không cao và bộ nhớ Ram thấp (chỉ từ 80 Mhz, và 2 Kbyte đối với Arduino Nano, hoặc 240 Mhz và 520 Kbyte đối với ESP32), cùng với đó, việc đánh đổi giữa khả năng tiết kiệm năng lượng và hiệu suất làm việc, cũng như khả năng chạy đa tác vụ còn hạn chế, nên các công thức tính toán phải được tối ưu và đơn giản nhất để hệ thống có khả năng xử lý các dữ liệu thu thập từ cảm biến với tần số lấy mẫu trong một giây (sps - samples per second) cao nhất có thể.

Vì khoảng thời gian lấy mẫu gia tốc kế MEMS là một hằng số giá trị Δt , các giá trị gia tốc thu được là rời rạc. Khoảng cách có thể đạt được bằng tích phân số của tăng cường. Giả sử rằng

các tín hiệu gia tốc rời rạc được thu thập bởi cảm biến là $a_{t_1}, a_{t_2}, a_{t_3}, \dots, a_{t_{i-1}}, a_{t_i}, a_{t_{i+1}}, \dots$. Các mốc thời gian tương ứng của mỗi giá trị gia tốc là $t_{t_1}, t_{t_2}, \dots, t_{t_{i-1}}, t_{t_i}, t_{t_{i+1}}, \dots$.

Tương ứng các mốc thời gian của mỗi điểm gia tốc có giá trị trong mỗi cửa sổ chuyển động có thể được tính toán như một hàm bậc hai bằng phép nội suy Lagrange. Bằng cách tính tích phân xác định của hàm bậc hai tại hai thời điểm đầu tiên trong cửa sổ trượt, sự gia tăng vận tốc của hai thời điểm đầu tiên có thể xác định. Lần lượt trượt cửa sổ hình chữ nhật, sự gia tăng tốc độ nhanh giữa hai điểm gia tốc liên kề bất kỳ có thể là thu được bằng phương pháp tương tự. Giả sử rằng ba điểm trong cửa sổ trượt tại một thời điểm là (t_{i-1}, a_{i-1}) , (t_i, a_i) , và (t_{i+1}, a_{i+1}) . Một hàm bậc hai có thể tính được bằng phép nội suy Lagrange như sau:

$$a = \frac{(t - t_i)(t - t_{i+1})}{(t_{i-1} - t_i)(t_{i-1} - t_{i+1})} a_{i-1} + \frac{(t - t_{i-1})(t - t_{i+1})}{(t_i - t_{i-1})(t_i - t_{i+1})} a_i + \frac{(t - t_{i-1})(t - t_i)}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} a_{i+1} \quad (9)$$

Vì khoảng thời gian giữa các lần lấy mẫu số liệu của cảm biến được cài đặt là hằng số nên

$$a = \frac{(t - t_i)(t - t_{i+1})}{2\Delta t^2} a_{i-1} + \frac{(t - t_{i-1})(t - t_{i+1})}{\Delta t^2} a_i + \frac{(t - t_{i-1})(t - t_i)}{2\Delta t^2} a_{i+1} \quad (10)$$

$$a = \frac{a_{i-1} - 2a_i + a_{i+1}}{2\Delta t^2} t^2 + \frac{-3a_{i-1} + 4a_i - a_{i+1}}{2\Delta t} a_i + a_{i+1} \quad (11)$$

Bằng cách tích phân xác định của hàm số bậc hai giữa t_{i-1} và t_i , sự thay đổi vận tốc trong khoảng thời gian này có thể thu được như sau:

$$\Delta v_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} a \cdot dt = \frac{5a_{i-1} + 8a_i - a_{i+1}}{12} \Delta t \quad (12)$$

Vận tốc v_n tại bất kỳ thời điểm nào có thể nhận được bằng cách tích lũy độ tăng vận tốc Δv_i như sau:

$$v_n = v_0 + \sum_{i=1}^n \Delta v_i \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (13)$$

Trong đó v_0 là vận tốc ban đầu và v_n là vận tốc tại bất kỳ thời điểm nào. Sau chuỗi vận tốc rời rạc thu được từ bộ tích lũy rời rạc, tương tự, ta có thể tính toán chuyển vị bằng cách sử dụng phương pháp trên

$$\Delta s_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} v \cdot dt = \frac{5v_{i-1} + 8v_i - v_{i+1}}{12} \Delta t \quad (14)$$

Quãng đường dịch chuyển tại bất kỳ thời điểm nào cũng có thể được tính như sau

$$s_n = s_0 + \sum_{i=1}^n \Delta s_i \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (15)$$

4. Kết quả thí nghiệm

Thiết bị được thiết lập để thu thập dữ liệu gia tốc theo 3 phương X, Y, và Z một cách liên tục. Nếu các giá trị gia tốc này có sự thay đổi một cách đột ngột thì hệ thống mới bắt đầu lưu trữ các dữ liệu gia tốc vào thẻ nhớ với tần số lấy mẫu là 500 sps cho đến khi hết sự kiện. Việc thay đổi gia tốc của đất nền được chia ra làm 2 trường hợp chính được mô tả dưới đây.

Trường hợp đầu tiên, gia tốc thay đổi do rung động bên ngoài nhưng không làm thay đổi vị trí ban đầu của cảm biến, hệ thống thu thập và tính toán chuyển vị gần bằng 0. Trong trường hợp này, có 2 khả năng: (1) Thứ nhất, thông thường là do các yếu tố do các hoạt động nhân tạo, dân sinh khu vực lân cận gây ra các rung động này;

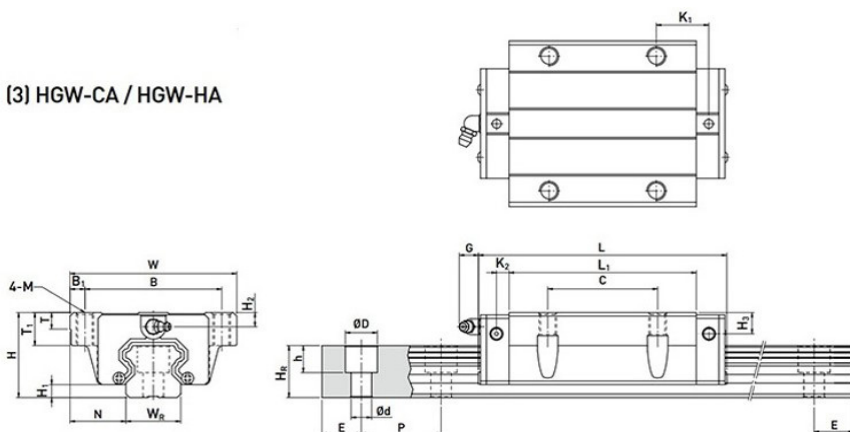
(2) Thứ hai là do độ nhạy cảm biến ở mức cao, đo được rung chấn do quá trình sạt lở của cung trượt, mái trượt khu vực lân cận lan truyền đến khu vực đặt cảm biến.

Trường hợp thứ hai, gia tốc thay đổi, hệ thống thu thập và tính toán được rằng chuyển vị vượt ngưỡng được thiết lập cho trước. Đây chính là sự kiện chính, cần tính toán, xử lý để đưa ra quyết định cảnh báo. Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu giả định ngưỡng cảnh báo khi có chuyển vị là 1 mm, và ngưỡng cảnh báo này có thể thiết lập ngay từ khi xây dựng hệ thống, hoặc có thể được điều chỉnh từ máy chủ, khi hệ thống đã được đưa vào sử dụng.

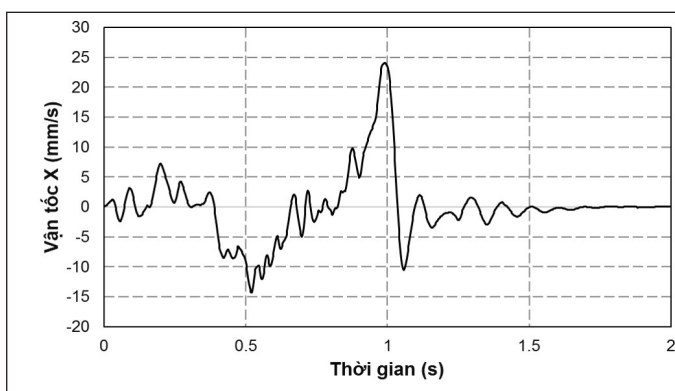
Để giả lập và kiểm tra độ chính xác của phép đo chuyển vị từ gia tốc. Một cơ cấu thử nghiệm đã được lắp đặt tại phòng thí nghiệm Công trình thủy - Khoa Xây dựng Công trình thủy - Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng. Cơ cấu này bao gồm một hệ thống ray trượt, giá đỡ thiết bị. Ray trượt được sử dụng là ray trượt vòng HGW-CA (Hình 8) nhằm tăng độ ổn định của hệ thống và giảm thiểu tối đa chuyển vị theo hướng không mong muốn.

Thiết bị đo được tinh gọn các thành phần như pin năng lượng mặt trời nhằm thu nhỏ kích thước cho phù hợp với hệ thống ray trượt. Thiết bị đo sẽ được gắn cố định trên con trượt. Trong trường hợp 1, thiết bị và ray trượt được đặt cố định, và lực tác động đủ lớn tác dụng lên khu vực lân cận của hệ thống ray trượt, với mục đích tạo ra rung chấn, nhưng vẫn đảm bảo không gây chuyển vị. Trong thí nghiệm ở trường hợp 2 và 3, sau khi tác động lực lên thiết bị quan trắc được đặt trên ray trượt, gây ra chuyển vị theo phương X. Đến khi thiết bị dừng dịch chuyển, ổn định, tiến hành đo đặc mức độ dịch chuyển so với vị trí ban đầu và so sánh đối chiếu với kết quả tính toán từ hệ thống. Tương tự với trường hợp 4 và 5, thiết bị xoay góc 90° so với ray trượt vị trí ban đầu để thử nghiệm dịch chuyển theo phương Y. Kết quả tính toán vận tốc và chuyển vị từ thiết bị đo cho trường hợp 2 được thể hiện trên hình 9a, 9b. Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm cho các trường hợp được trình bày trong Bảng 3.

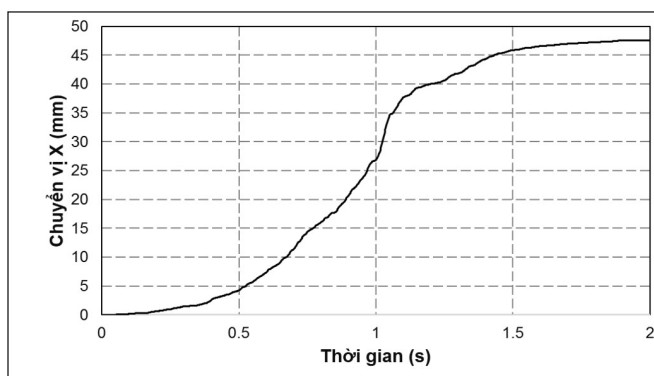
(3) HGW-CA / HGW-HA



Hình 8. Thiết kế con trượt và ray trượt HGW-CA



Hình 9a. Vận tốc tính toán trường hợp 2



Hình 9b. Chuyển vị tính toán trường hợp 2

Bảng 3. Bảng tổng hợp kết quả đo thực nghiệm

	Chuyển vị thực tế (mm)	Chuyển vị tính toán (mm)	Ghi chú
TH1	0	0,1	Không phát tín hiệu báo động
TH2	X: 48 mm	X: 47,5 mm	Phát tín hiệu báo động
TH3	X: 100 mm	X: 98,4 mm	Phát tín hiệu báo động
TH4	Y: 48 mm	Y: 49,8 mm	Phát tín hiệu báo động
TH5	Y: 100 mm	Y: 97,6 mm	Phát tín hiệu báo động

Khi thiết bị quan trắc xác định được có chuyển vị vượt ngưỡng đã thiết lập ban đầu, các thông tin về thời gian xuất hiện chuyển vị, gia tốc đỉnh lớn nhất, chuyển vị tính toán sẽ được gửi về máy chủ. Từ các thông tin gửi về, người quản lý sẽ dựa vào đó để thiết lập các mức cảnh báo tương ứng. Nếu tần suất các gói thông tin gửi về từ trạm đo trong thời gian ngắn là cao, và giá trị chuyển vị tăng dần trong thời gian ngắn, rồi sau đó giảm dần thì ta có thể xác định mái dốc đang trong giai đoạn biến đổi ban đầu. Nếu tần suất các gói thông tin gửi về từ trạm đo trong thời gian ngắn là cao, và giá trị chuyển vị tăng dần trong thời gian ngắn, ta có thể xác định mái dốc đang trong giai đoạn biến đổi mạnh hoặc sắp tới giai đoạn biến đổi tới hạn. Nếu tần suất các gói thông tin gửi về từ trạm đo trong thời gian dài và ít, giá trị chuyển vị gần như không đổi trong khoảng thời gian này, ta có thể xác định mái dốc đang trong giai đoạn biến đổi đều.

Ngoài ra, cảm biến gia tốc có thể trở thành một thành phần quan trọng trong hệ thống có áp dụng phương pháp tổng hợp cảm biến (sensor fusion) bao gồm nhiều loại cảm biến như GPS, cảm biến đo hàm lượng nước trong đất... nhằm kết hợp, đối chiếu, và kiểm chứng các dữ liệu quan trắc để tăng cường độ chính xác các phép đo. Phương pháp này đã được áp dụng rộng rãi trong các hệ thống robot tự hành, nhằm xác định vị trí bản thân [8]. Đây cũng chính là một xu hướng trong các hệ thống quan trắc nhằm tối ưu hóa công năng của hệ thống, hỗ trợ ra quyết định chính xác hơn so với các hệ thống đơn cảm biến.

5. Kết luận

Trong bài báo này, với mục tiêu ban đầu là xây dựng thiết bị quan trắc chuyển vị và cảnh báo sạt lở, nhóm tác giả đã đề xuất sử dụng

gia tốc kế MPU9250 để thu thập dữ liệu gia tốc của đất nền, sau đó sử dụng các thuật toán để chuyển đổi dữ liệu từ gia tốc kế sang chuyển vị. Vì là cảm biến giá thành thấp nên nhà sản xuất đã lược bỏ khá nhiều tính năng và không có hiệu chỉnh dữ liệu đầu ra, nên dữ liệu thu thập được mang rất nhiều nhiễu, gây ảnh hưởng đến kết quả tính toán. Nhóm tác giả đã đưa ra quy trình xử lý số liệu đầu vào, và cách ứng dụng bộ lọc Kalman để loại bỏ nhiễu Gauss, góp phần tăng độ chính xác của kết quả cuối cùng. Hàm Lagrange bậc 2 được áp dụng để tính toán phương pháp tính toán chuyển đổi từ dữ liệu gia tốc kế sang chuyển vị. Phương pháp này tương đối tối ưu, và công thức tính toán đơn giản, có thể áp dụng được cho các bộ vi xử lý có cấu hình thấp, tốc độ không cao, và bộ nhớ ít.

Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng, mặc dù đã qua các bước xử lý nhiễu và sai số phép đo, nhưng kết quả tính toán cuối cùng vẫn có độ sai lệch nhất định đối với thực tế. Phương pháp đo chuyển vị thông qua tính toán từ dữ liệu gia tốc kế có tiềm năng áp dụng để nắm bắt các chuyển động bất thường của đất nền trong giai đoạn biến dạng ban đầu và biến dạng đều. Tuy nhiên, vẫn cần nhiều thí nghiệm thực tế để có được đánh giá tổng quan và chính xác hơn đối với phương pháp này. Nhóm tác giả dự kiến tiến hành đo thực nghiệm tại một số địa điểm thực tế trong một thời gian dài hơn, và sử dụng nhiều phương pháp đo khác để kiểm chứng số liệu thu thập được.

Trong tương lai, khi các hệ thống quan trắc và cảnh báo sạt lở được phổ biến, với lượng dữ liệu lớn và đa dạng, việc áp dụng các mô hình học máy sẽ giúp tăng cường hơn nữa độ chính xác cho hệ thống, và giảm thiểu các thiệt hại do sạt lở đất gây ra tại Việt Nam.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2022-02-25.

Tài liệu tham khảo

Tài liệu tiếng Việt

1. Trần Văn Líc và cộng sự (2021), “Mạng không dây diện rộng công suất thấp LoRaWAN trong triển khai Free LoRa tại thành phố Đà Nẵng, Việt Nam”, Hội nghị Quốc gia lần thứ 24 về Điện tử, truyền thông và công nghệ thông tin. <https://loro-alliance.org/resource>.

- Ngô Đình Thanh và cộng sự (2020), “Mạng công nghiệp lorawan cho thành phố Đà Nẵng: giải pháp cho ứng dụng IOT tầm xa tiêu thụ năng lượng thấp”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, Vol 18, No. 1, tr. 7-10.

Tài liệu tiếng Anh

- A. D’Alessandro et al. (2019), “A review of the capacitive MEMS for seismology,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 14. MDPI AG, Jul. 02, 2019. doi: 10.3390/s19143093.
- G. V. Berg (1961), “Integrated velocity and displacement of strong earthquake groundmotion”, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 51(2), 175-189.
- B. G. Chae et al. (2014), “Suggestion of a landslide early warning method using a gradient of volumetric water content,” in *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 2: Methods of Landslide Studies*, Springer International Publishing, 2014, pp. 545-550. doi: 10.1007/978-3-319-05050-8_84.
- H. Chen et al. (2021), “Early Warning Indicators of Landslides Based on Deep Displacements: Applications on Jinping Landslide and Wendong Landslide, China,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.747379.
- H. Ching-Chuan et al. (2009), “Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 370, no. 1–4, pp. 39–51, May 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.051.
- T. T. Hoang et al. (2012), "Multi-Sensor Perceptual System for Mobile Robot and Sensor Fusion-based Localization", *International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, pp.259-264.
- M. Kuradusenge et al. (2021), “Experimental Study of Site-Specific Soil Water Content and Rainfall Inducing Shallow Landslides: Case of Gakenke District, Rwanda,” *Geofluids*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/7194988.
- R. Macciotta et al. (2015), “Instrumenting and Monitoring a Slow Moving Landslide Monitoring strategies for enhanced landslide understanding and safety” *View project Canadian Rail Research Laboratory (CaRRL)*. <https://www.researchgate.net/publication/282250732>
- R. E. Kalman (1960), “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems 1”, *Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering*, 82(Series D.), 35-45 (1960).
- J. Lee et al. (2019), “A smart iot device for detecting and responding to earthquakes,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 12, Dec. 2019, doi:10.3390/electronics8121546.
- InvenSense Inc (2014), *MPU-9255 Product Specification*, 1745 Technology Drive, San Jose.
- M. R. Scoppettuolo et al. (2020), “Typical displacement behaviours of slope movements” *Landslides*, vol. 17, no. 5, pp. 1105–1116, May 2020, doi: 10.1007/s10346-019-01327-z.
- L. Cascini et al. (2014), “Displacement trends of slow-moving landslides: Classification and forecasting”, *J. Mt Sci*, vol. 11, no. 3, pp. 592-606, , doi: 10.1007/s11629-013-2961-5.
- Y. S. Song et al. (2021), “A landslide monitoring system for natural terrain in korea: Development and application in hazard evaluations,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/s21093040.
- G. Vitale et al. (2022), “Urban Seismic Network Based on MEMS Sensors: The Experience of the Seismic Observatory in Camerino (Marche, Italy),” *Sensors*, vol. 22, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22124335.
- B. Voight (1988), “A method for prediction of volcanic eruptions,” *Nature*, vol. 332, no. 6160, pp. 125–130, doi: 10.1038/332125a0.

INVESTIGATION ON POTENTIAL APPLICATION OF ACCELEROMETER IN LANDSLIDE MONITORING AND WARNING

Ngo Thanh Vu, Nguyen Thanh Hai

The University of Danang - University of Science and Technology

Received: 25/4/2023; Accepted: 24/5/2023

Abstract: Currently, landslide monitoring in Viet Nam is predominantly carried out using indirect measurement methods, which involve using one or more standard benchmarks in combination with specialized devices to measure slope displacement and deformation. However, these methods heavily rely on natural conditions such as weather (GPS, total station) or complex techniques (Inclinometer). In this study, the authors propose the application of accelerometer sensors to collect and compute the displacement of a sliding arc. The ground displacement results are calculated through two integrations of acceleration. Additionally, this research employs bias elimination and Kalman filtering techniques to reduce input signal noise and enhance the accuracy of computations. The simulation model consists of three components: (i) A monitoring device comprising ESP32 microcontroller, MPU9250 accelerometer sensor, and other modules, (ii) The sliding arc, and (iii) The horizontal slide rail. As the sliding arc moves, the device automatically collects, stores, and calculates the displacement. The error between the measured displacement from the device and the actual displacement is below 5%. This finding allows us to propose the application of accelerometer sensors in landslide monitoring and warning systems.

Keywords: Landslides, monitoring and early warning, Inertial Measurement Unit (IMU), Kalman filter.