TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Quan trắc thời gian thực và kết hợp phân tích dịch chuyển công trình sử dụng GNSS và cảm biến gia tốc

Vũ Ngọc Quang[1]*, Nguyễn Việt Hà[2], Trần Đình Trọng

[1] Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải; quangvn@utt.edu.vn
[2] Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất; nguyenvietha@humg.edu.vn
[3] Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; trandinhtrong@nuce.edu.vn

*Tác giả liên hệ: quangvn@utt.edu.vn; Tel.: +84–983452565

Ban Biên tập nhận bài: 25/4/2024; Ngày phản biện xong: 15/6/2024; Ngày đăng bài: 25/12/2024

Tóm tắt: Công tác quan trắc các công trình có quy mô lớn ngày càng được chú trọng theo hướng quan trắc thời gian thực để kịp thời phản ánh những bất thường của công trình. Các thiết bị quan trọng trong hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu hiện đang được kết nối với nhau bằng hệ thống dây dẫn lớn trong khi hiện nay có nhiều thiết bị mới với giá thành rẻ, kích thước nhỏ gọn và tích hợp các giải pháp IoT. Nghiên cứu kết hợp thiết bị GNSS, cảm biến gia tốc giá thành rẻ trong quan trắc công trình thời gian thực, đánh giá độ chính xác dữ liệu GNSS-RTK và phân tích các dịch chuyển thành phần bao gồm dịch chuyển tuyến tính, dao động trong các phương. Nghiên cứu sử dụng phương pháp thực nghiệm, so sánh kết quả từ dữ liệu thu thập được bằng thiết bị GNSS và cảm biến gia tốc với lượng dịch chuyển thực tế từ thiết bị eto cơ khí độ chính xác cao. Kết quả nghiên cứu cho thấy tính khả thi của giải pháp quan trắc thời gian thực sử dụng GNSS và cảm biến gia tốc. Đồng thời nghiên cứu cũng đã đánh giá mức độ dao động của giải pháp GNSS-RTK khi so sánh với thiết bị eto cơ khí chính xác cao là từ 1,2 mm đến 6,0 mm trong phương mặt bằng, 1,2 đến 14,9 mm trong phương đứng. Kết quả đánh giá độ chính xác, độ nhạy là cơ sở để lựa chọn loại hình, hạng mục quan trắc phù hợp với yêu cầu theo các tiêu chuẩn hiện hành.

Từ khóa: GNSS-RTK; Cảm biến gia tốc; MPU6050; IoT; Dịch chuyển; Thời gian thực.

1. Giới thiệu

Hạ tầng giao thông đường bộ chiếm tỉ trọng lớn trong phân bổ nguồn vốn đầu tư cho lĩnh vực giao thông vận tải. Số lượng các công trình cầu lớn, quy mô phức tạp được đầu tư xây dựng ngày càng nhiều. Song song với công tác xây dựng, các yêu cầu về công tác quan trắc, giám sát sức khỏe công trình được yêu cầu ngày càng chặt chẽ để đảm bảo nắm bắt kịp thời tình trạng, phản ứng của kết cấu trong suốt thời gian vận hành, khai thác, đảm bảo an toàn cho người và tài sản [1, 2]. Hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu công trình có nhiều thành phần như quan trắc trạng thái kết cấu, quan trắc khí tượng, quan trắc chuyển vị, biến dạng và giám sát hình ảnh [3]. Về mặt nghiên cứu các hệ thống quan trắc sức khỏe công trình cầu lớn ở Việt Nam, nghiên cứu do tác giả Bùi Hữu Hưởng thực hiện năm 2014 đã giới thiệu thiết kế và bố trí hệ thống quan trắc cho công trình cầu Rạch Miễu [4]. Hệ thống này được cho là hoạt động tốt cho tới thời điểm nghiên cứu (từ tháng 1/2009). Ngay sau đó, hệ thống quan trắc công trình cầu Cần Thơ đã được giới thiệu trong nghiên cứu của tác giả Hoàng Nam và cộng sự cùng với một số kết quả bước đầu từ các hệ thống quan trắc [5]. Năm 2018, nghiên cứu [6] đã phân tích mô hình kết cấu công trình cầu Thuận Phước. Từ đó, phương án sắp xếp các

thiết bị quan trắc cho công trình được thiết kế dựa trên phần mềm Labview. Có thể thấy rằng, các nghiên cứu ở trên, loại hình công trình cầu là các cầu dây văng, khẩu độ lớn. Nghiên cứu [7] về quan trắc và cảnh báo thời gian thực dành cho công trình cầu cũng đã được thực hiện năm 2022. Trong nghiên cứu này, tác giả mới chỉ dừng lại ở thiết bị GNSS. Sau đó, một nghiên cứu về kết hợp cảm biến và GNSS cũng đã được thực hiện [8]. Tuy nhiên, chưa có sự so sánh và đánh giá kết quả xác định dịch chuyển thực tế giữa hai thiết bị này.

Với loại hình cầu cứng, nghiên cứu so sánh khả năng quan trắc của thiết bị quét laser mặt đấy (GLS, TLS) với cảm biến cơ khí độ chính xác cao được thực hiện năm 2022 với nhịp P13-P14, đường vành đai 2 trên cao [9]. Kết quả xác độ võng được so sánh với kết quả từ cảm biến thiên phân kế độ chính xác cao và hơn cả là xác định được mô hình bề mặt dưới của kết cấu quan trắc. Một nghiên cứu với cùng đối tượng, chủng loại thiết bị được thực hiện năm 2023 nhưng với thiết bị độ chính xác cao hơn và với nhịp P61-P62 có chiều dài, độ cao lớn nhất trong nội đô [10].

Trên thế giới, các cảm biến gia tốc với độ nhậy cao, có khả năng đo đạc với tần suất lấy mẫu lên tới 1000 Hz, đáp ứng công tác quan trắc các kết cấu có tần số dao động nhỏ hơn 0.1 Hz và biên độ dao động rất nhỏ [11]. Nghiên cứu cũng khẳng định vai trò quan trọng của cảm biến gia tốc trong các hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu. Về khía cạnh phân tích dữ liệu, các thành phần dao động của kết cấu được quan trắc có thể được xác định bằng kỹ thuật tích phân hay đạo hàm [12] để chuyển đổi các đại lượng gia tốc sang các thành phần dao động và dịch chuyển. Sự phát triển của GNSS với khả năng thu nhận dữ liệu với tần suất cao hơn đã cho phép kết hợp chúng trong phân tích dịch chuyển động sử dụng GNSS cùng với cảm biến gia tốc [13, 14].

Có thể thấy rằng, các nghiên cứu trong nước được thực hiện song hành với quá trình phát triển xây dựng các công trình cầu lớn, đặc biệt là cầu dây văng cùng với quá trình nhập khẩu các hệ thống quan trắc này. Các nghiên cứu được thực hiện cũng phần lớn mới dừng ở việc giới thiệu, thiết kế hệ thống quan trắc và các kết quả hiển thị bước đầu. Nghiên cứu [15] cũng đã tổng kết rằng phần lớn thiết bị được cung cấp bởi đối tác nước ngoài dẫn đến một số bất cập trong quản lý, khai thác, lưu trữ dữ liệu quan trắc. Sự tiến bộ của các công nghệ cảm biến có tốc độ cao, các mạch điện tử có chi phí thấp, các công nghệ kết nối không dây mở ra cơ hội mới cho lĩnh vực quan trắc tự động ở nhiều cấp độ, cho nhiều loại hình công trình. Liên quan tới khía cạnh tính toán và ứng dụng các dữ liệu, các dữ liệu GNSS và dữ liệu cảm biến gia tốc phần lớn được khai thác rời rạc cho các mục tiêu khác nhau.

Nghiên cứu sử dụng thiết bị GNSS có tích hợp giải pháp IoT trong kết nối, cảm biến gia tốc MPU6050, module wifi để thực hiện quá trình quan trắc tự động và hiển thị thời gian thực là phù hợp với nhu cầu thực tiễn, đáp ứng xu hướng phát triển của các giải pháp tự động. Nghiên cứu sử dụng phương pháp so sánh thực nghiệm để đánh giá độ chính xác của thiết bị RTK và thiết bị cảm biến gia tốc. Mục tiêu cụ thể của nghiên cứu là: (1) Kết nối thiết bị và thực hiện quan trắc, hiển thị thời gian thực; (2) Đánh giá được độ nhậy của giải pháp RTK; (3) Bước đầu phân tích các thành phần chuyển dịch của kết cấu quan trắc từ dữ liệu GNSS và cảm biến.

2. Thiết bị và phương pháp

2.1. Thiết bị GNSS

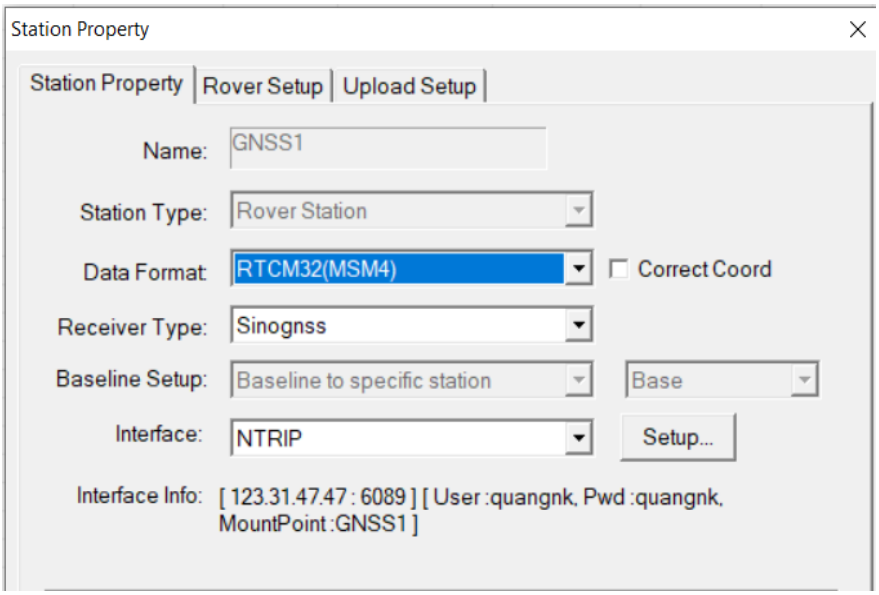
Nghiên cứu sử dụng thiết bị GNSS của hãng Comnav tự phát triển OEM board với dòng main K8, 965 kênh thu, kích thước nhỏ, hỗ trợ thu tín hiện đồng thời từ nhiều hệ thống định vị vệ tinh [16] (Hình 1). Trên nền bảng mạch của thiết bị đã tích hợp sẵn module Bluetooth, wifi và khay sim cho phép gắn sim và sử dụng dữ liệu 4G. Thiết bị GNSS hoạt động với vai trò máy thu rover tại điểm quan trắc, theo phương pháp 4G, SIM di động gắn máy thu, cài đặt trên giao diện WebUI đã được giới thiệu trong các công bố trước [7, 8]. Dữ liệu số hiệu chỉnh được truyền với định dạng RTCM qua giao thức Internet gọi tắt là NTRIP [16].

Hình 1. Main K8 của Comnav.

2.2. Thiết bị cảm biến gia tốc MPU6050

2.2.1. Kết nối GNSS

Thiết bị GNSS được tích hợp module SIM 4G, sau khi được kết nối với trạm cơ sở thông qua các thông tin cá nhân của người dùng bao gồm tài khoản, mật khẩu, cài đặt cổng truyền dữ liệu về server [17].



Hình 2. webUI cho phép thao tác cài đặt.

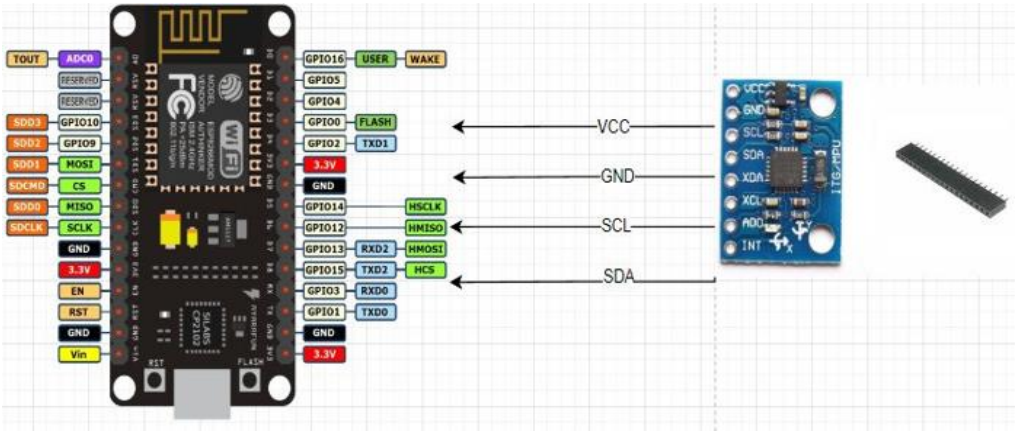
Hình 2 là một phần giao diện cài đặt thiết bị GNSS trên giao diện WebUI, cho phép người dùng cài đặt các hoạt động của máy ở vai trò khác nhau, tên, định dạng dữ liệu cũng như các thông số về tài khoản và mật khẩu người dùng.

2.2.2. Kết nối cảm biến gia tốc

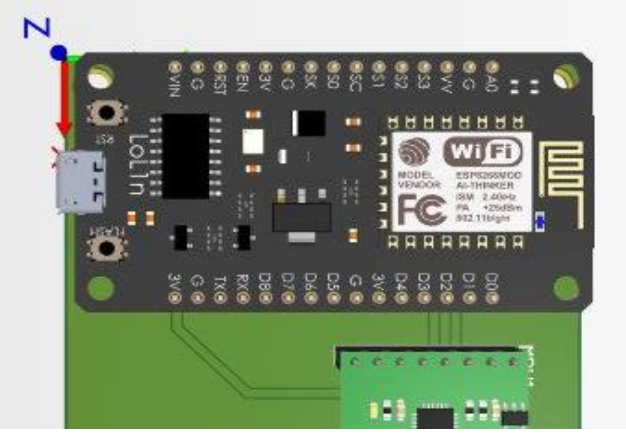
Thiết bị cảm biến gia tốc MPU6050 có kích thước nhỏ, không tích hợp sẵn module wifi [18]. Do đó, MPU6050 được kết nối với một module wifi ESP8266 để điều khiển quá trình thu, ghi cũng như truyền dữ liệu về server. Sơ đồ kết nối giữa MPU6050 và ESP8266 được thể hiện trong hình 3 và thiết kế mạch để gia công trong hình 4.

ESP8266 là module wifi nhỏ gọn, cho phép lập trình nhúng để kết nối, điều khiển các thiết bị khác, truyền số liệu và một bộ CPU mạnh được dùng nhiều trong các ứng dụng IoT. Toàn bộ chương trình được thực hiện trên nền tảng Arduino IDE phiên bản 2.3.2.

Hai thiết bị module wifi ESP và cảm biến gia tốc MPU6050 được sử dụng chung nguồn điện áp qua cổng kết nối với nguồn phía ESP.

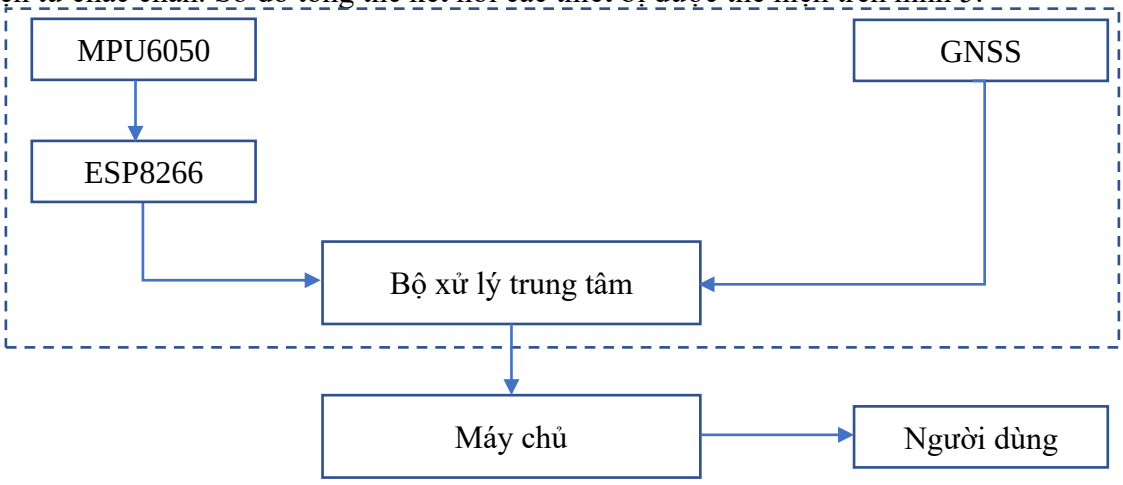


Hình 3. Vẽ mạch kết nối hai thiết bị trước khi gia công.



Hình 4. Thiết kế và gia công mạch kết nối hai thiết bị.

Để đảm bảo kết nối chắc chắn, không bị ảnh hưởng bởi các điều kiện như rung động tới khả năng thu dữ liệu, khả năng truyền và lưu trữ dữ liệu, mạch được gia công thành mạch điện tử chắc chắn. Sơ đồ tổng thể kết nối các thiết bị được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Kết nối tổng thể các thiết bị [8].

Trên sơ đồ hình 5, thiết bị GNSS với các module tích hợp sẵn trên nền tảng OEM board mới nhất cho phép nhận số hiệu chỉnh qua mạng 4G và truyền số liệu liên tục theo thời gian được cài đặt. Thiết bị ESP8266 điều khiển tác vụ thu nhận dữ liệu cảm biến, lưu trữ và truyền dữ liệu thời gian thực. Máy chủ sử dụng trong nghiên cứu là một server giả lập. Toàn bộ kết nối giữa bộ phận GNSS, ESP8266, cảm biến về bộ xử lý trung tâm; bộ xử lý trung tâm về máy chủ và máy chủ tới người dùng là kết nối không dây.

2.3. Phương pháp thực hiện

2.3.1. Thu nhận và truyền dữ liệu cảm biến

Server sử dụng là server giả lập, chương trình điều khiển, lưu trữ, truyền dữ liệu được lập trình trên nền tảng Arduino IDE 2.3.2 với địa chỉ IP động.

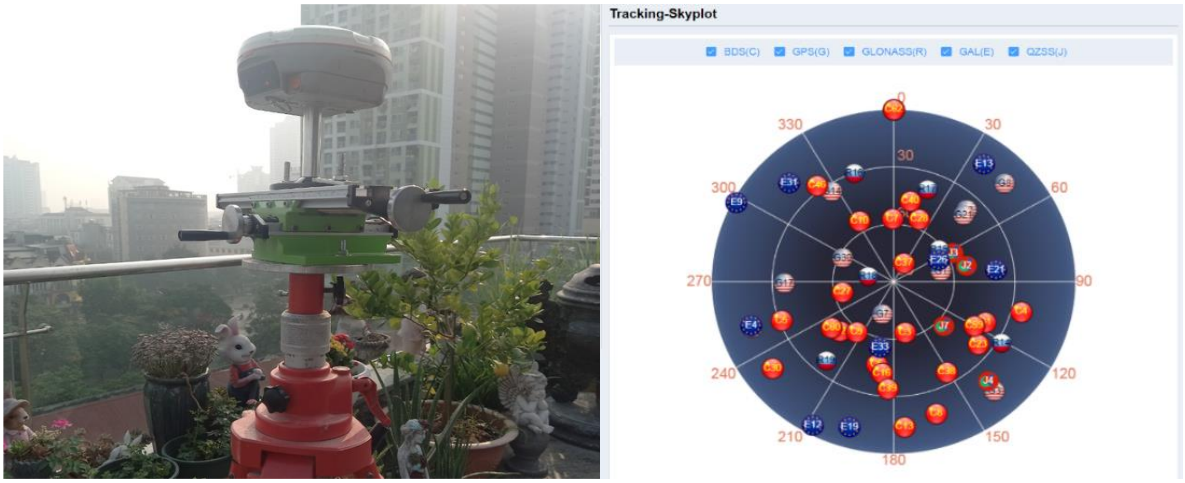
```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <DNSServer.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include "WiFiManager.h"
#include <WebSocketsClient.h>
WebSocketsClient webSocket;
const char* IPHOST = "192.168.1.6";
const uint16_t PORTHOST = 3000;

#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
Adafruit_MPU6050 mpu;
int timedata = 0;
int countdata = 0;
String resultdata = "";

void configModeCallback (WiFiManager *myWiFiManager)
{
  Serial.println("Chon cau hinh:");
  Serial.println(WiFi.softAPIP());
  Serial.println(myWiFiManager->getConfigPortalSSID());
```

Hình 6. Một đoạn chương trình.

Trong chương trình điều khiển, địa chỉ IP là địa chỉ mạng wifi được sử dụng, Porthost là cổng của server giả lập dành cho người dùng để quan sát dữ liệu thời gian thực.

2.3.2. Phương pháp nghiên cứu độ nhậy của giải pháp GNSS-RTK

Để đánh giá độ nhậy của phương pháp GNSS-RTK, anten quan trắc được lắp đặt trên một thiết bị eto cơ khí độ chính xác cao, cho phép dịch chuyển tới mức độ phần trăm của đơn vị mm với mỗi vòng quay tương đương với 1,25 mm.



Hình 7. Anten GNSS lắp đặt trên chân máy qua một thiết bị eto cơ khí độ chính xác cao.

Anten GNSS được lắp đặt trên chân máy chuyên dụng, độ ổn định cao và có trục dọc cho phép dịch chuyển lên xuống với độ chính xác cao. Giá trị dịch chuyển mặt bằng và độ cao từ thiết bị eto cơ khí và trục dọc được coi là giá trị chuẩn để xem xét, đánh giá đại lượng dịch chuyển tính toán từ phương pháp GNSS-RTK. Do các giá trị dịch chuyển từ thiết bị eto cơ khí được coi là các giá trị đo thực, Độ chính xác của giải pháp GNSS-RTK sẽ được tính toán qua công thức sau [19, 20]:

$$m = \pm\sqrt{\frac{\Delta i \times \Delta i}{n}} \quad (1)$$

2.3.3. Phương pháp chuyển đổi giá trị gia tốc sang giá trị dịch chuyển từ cảm biến gia tốc

Một mốc định tâm bắt buộc, ổn định cả về vị trí mặt bằng và độ cao được sử dụng để lắp đặt đồng thời hai thiết bị GNSS và cảm biến gia tốc.

Hình 8. Anten GNSS và cảm biến gia tốc đặt trên mốc cố định.

Các phương tọa độ thành phần từ cảm biến được đặt cùng chiều với các phương tọa độ của GNSS nhờ vào một la bàn để công tác tính toán hậu kỳ và so sánh được đồng bộ. Thành phần dịch chuyển xác định từ GNSS-RTK được tính toán từ các giá trị tuyệt đối tọa độ theo ba phương trong không gian X, Y, H trong hệ tọa độ địa phương hoặc WGS84. Với dữ liệu cảm biến gia tốc, ước tính vận tốc và dịch chuyển được chuyển đổi qua công thức sau:

$$\upsilon(t) = \upsilon_0 + \int_0^t a(t)dt \quad (2)$$

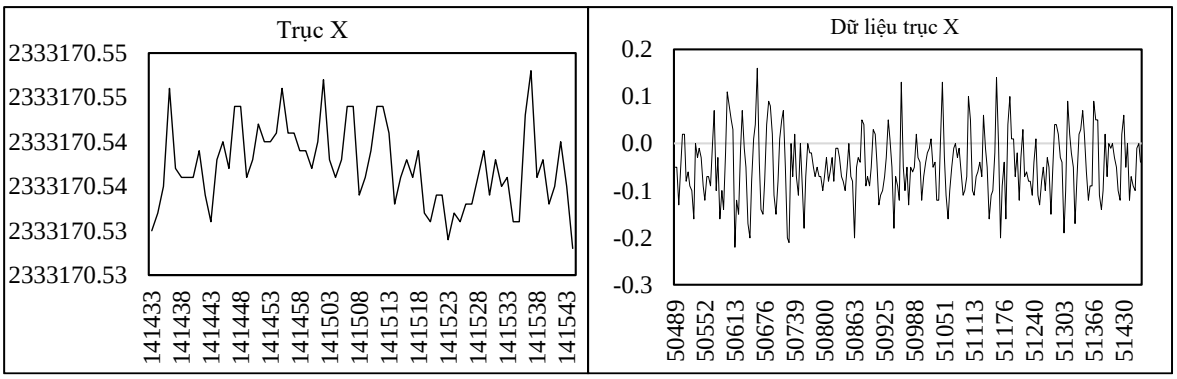
$$x(t) = x_0 + \int_0^t \upsilon(t)dt = x_0 + \upsilon_0 t + \int\int_o^t a(t)dtdt \quad (3)$$

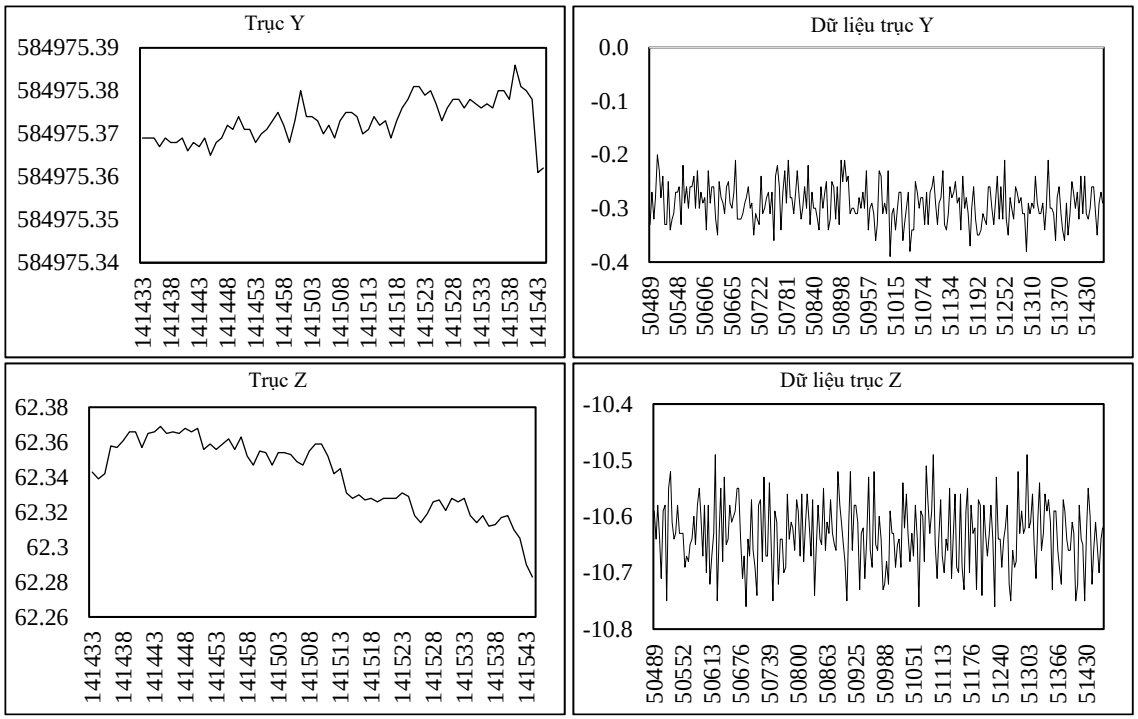
Trong đó $a(t)$ là gia tốc tại thời điểm t; $v(t), x(t)$ là vận tốc và dịch chuyển ở thời điểm t; v_0, x_0 là vận tốc và dịch chuyển ban đầu tương ứng.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả truyền dữ liệu thời gian thực và đánh giá tính toàn vẹn dữ liệu

Dữ liệu GNSS được thu thập với tần suất 1 trị đo/1 giây và dữ liệu cảm biến là 250 trị đo/1 giây liên tục truyền, hiển thị theo thời gian thực. Kết quả hiển thị trên biểu đồ trực quan trên hình 9.



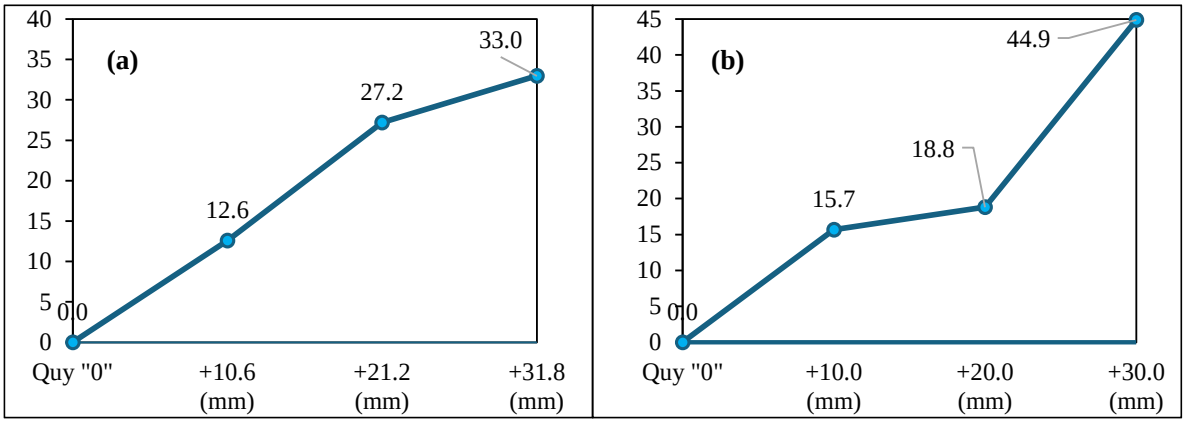


Hình 9. Dữ liệu thời gian thực của GNSS cảm biến.

Trong biểu đồ hình 9, phía bên trái là dữ liệu GNSS-RTK và bên phải là dữ liệu của cảm biến. Về tính toàn vẹn của dữ liệu, nghiên cứu sử dụng mạng internet với bằng tần 5 GHz, tốc độ cao với vận tốc truyền nhận là 1201 Mbps nên toàn bộ dữ liệu GNSS và cảm biến được đảm bảo tính toàn vẹn. Các thành phần tọa độ bên trái được tính toán trong hệ tọa độ VN:2000, kinh tuyến trục địa phương. Các thành phần tọa độ bên phải của cảm biến được tính toán trong hệ tọa độ giả định tự thân của cảm biến. Trục tung là các giá trị dao động và gia tốc theo thời gian thực được cập nhật liên tục với giãn cách thời gian là 1s với GNSS và 4 ms với cảm biến.

3.2. Kết quả đánh giá độ chính xác của giải pháp GNSS-RTK

Độ nhậy của giải pháp GNSS-RTK được so sánh với lượng dịch chuyển thực tế từ thiết bị eto cơ khí chính xác cao. Lượng dịch chuyển theo phương pháp RTK được tính toán từ giá trị trung bình của tổng số lượng trị đo RTK tương ứng trong mỗi lần dịch chuyển của thiết bị eto cơ khí. Kết quả đánh giá so sánh lượng dịch chuyển thực tế từ eto cơ khí với lượng dịch chuyển tính toán được phương pháp GNSS-RTK theo cả hai phương mặt bằng và độ cao được trình bày trong hình 10a, 10b.

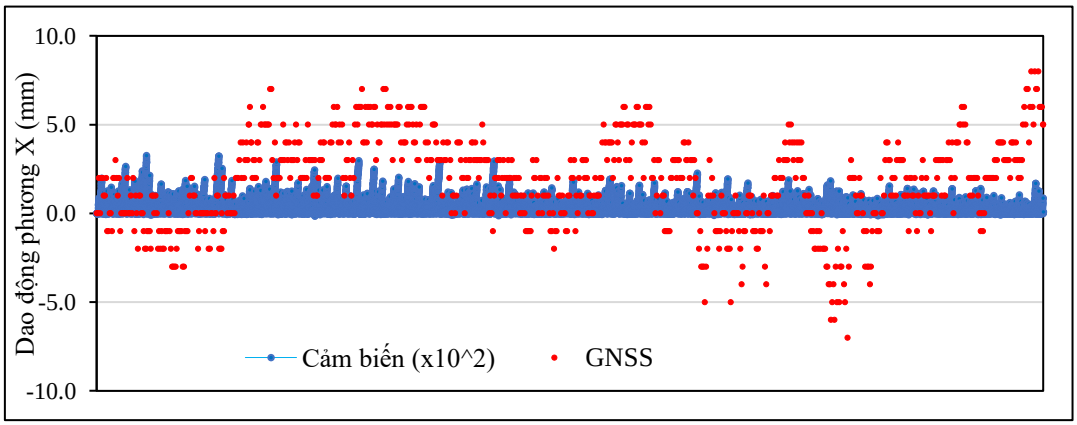


Hình 10. So sánh lượng dịch chuyển mặt bằng và độ cao tính từ GNSS-RTK so với thực tế: (a) Mặt bằng; (b) Độ cao.

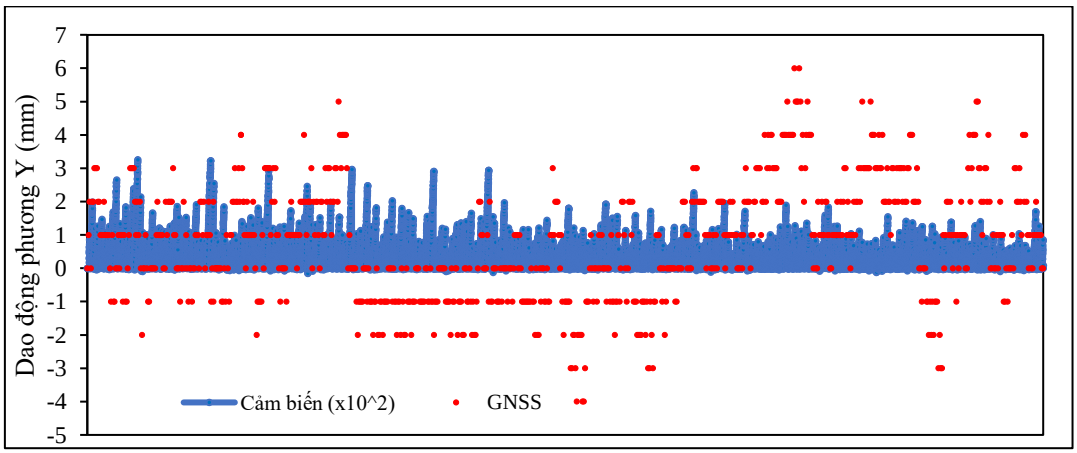
Giá trị trên trục hoành là lượng dịch chuyển về mặt bằng và độ cao tương ứng với ba lần dịch chuyển eto cơ khí. Trục đứng là giá trị dịch chuyển tính toán được các giá trị GNSS-RTK. Sử dụng công thức (1), sai số xác định lượng dịch chuyển mặt bằng và độ cao qua ba lần dịch chuyển thiết bị eto cơ khí lần lượt là 3,7 mm và 9,2 mm.

3.3. Kết quả chuyển đổi giá trị gia tốc sang giá trị dịch chuyển và so sánh với GNSS-RTK

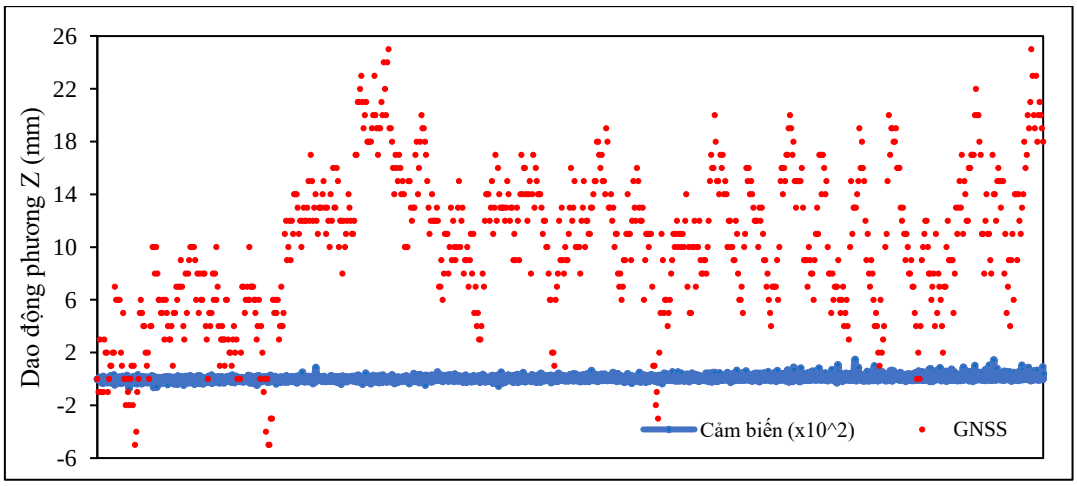
Sử dụng công thức (2), (3) ở trên để chuyển đổi các thành phần gia tốc sang các giá trị vận tốc và dịch chuyển tương ứng. Các giá trị dịch chuyển từ cảm biến được so sánh với các giá trị tương ứng từ GNSS-RTK.



Hình 11. So sánh dao động thành phần theo phương X của GNSS và cảm biến gia tốc.



Hình 12. So sánh dao động thành phần theo phương Y của GNSS và cảm biến gia tốc.



Hình 13. So sánh dao động thành phần theo phương Z của GNSS và cảm biến gia tốc.

Giá trị dịch chuyển theo ba phương tương ứng của hai thiết bị GNSS và cảm biến được tính toán so với giá trị cân bằng ban đầu. Các hình 11-13 cho thấy mặc dù đặt ở vị trí mốc cố định, thiết bị GNSS cho ra kết quả dao động thành phần theo các phương lớn hơn nhiều lần so với các giá trị tính toán từ cảm biến.

3.4. Thảo luận

Dữ liệu GNSS và cảm biến được truyền thời gian thực hỗ trợ nhiệm vụ theo dõi trực quan cho người dùng với nhiều vai trò khác nhau trong dự án và mọi địa điểm có kết nối mạng Internet. Đây là ưu điểm của công tác quan trắc thời gian thực. Kết quả về độ lệch tính toán từ giải pháp GNSS-RTK so với lượng dịch chuyển thực tế từ thiết bị eto cơ khí dao động từ 1,2 mm đến 6,0 mm trong phương ngang và 1,2 mm đến 14,9 mm trong phương đứng. Kết quả này tương đương với kết quả trong nghiên cứu [7]. Đây là cơ sở để lựa chọn ngưỡng cảnh báo trong quan trắc và lựa chọn phương pháp phù hợp với từng hạng mục, loại hình quan trắc. Đồng thời, đây cũng là một khía cạnh cần tiến hành nghiên cứu thêm để nâng cao độ chính xác của giải pháp GNSS-RTK trong quá trình xử lý hậu kỳ.

Kết quả chuyển đổi các đại lượng gia tốc sang các giá trị dịch chuyển và so sánh với giá trị GNSS-RTK cho thấy mức độ tin cậy của thiết bị cảm biến sau khi được chuyển đổi. Khi hai thiết bị đặt tại cùng vị trí và được đồng bộ về thời gian, vị trí không gian, các dữ liệu cảm biến có thể sử dụng là cơ sở hiệu chỉnh các giá trị đo GNSS trong phân tích dịch chuyển công trình. Với mức độ thử nghiệm, trong điều kiện Internet có tốc độ cao, công tác truyền và hiển thị thời gian thực đảm bảo tính liên tục, tính toàn vẹn của dữ liệu mặc dù sử dụng các kết nối không dây, module wifi giá thành rẻ. Đây là một ưu điểm của nghiên cứu. Tuy nhiên, hạn chế của nghiên cứu là công tác xử lý chuyên sâu hơn theo hướng thời gian thực hoặc cận thời gian thực là còn hạn chế do dung lượng dữ liệu cảm biến là rất lớn.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã kết hợp được thiết bị GNSS và cảm biến gia tốc trong công tác quan trắc sử dụng các thiết bị IoT phổ biến với giá thành rẻ. Các dữ liệu quan trắc được truyền và hiển thị thời gian thực hỗ trợ quan sát trực quan ở các địa điểm, với nhiều đối tượng ở vai trò khác nhau trong dự án.

Bên cạnh việc truyền và hiển thị dữ liệu quan trắc thời gian thực, nghiên cứu đã đánh giá độ chính xác, độ nhạy của giải pháp GNSS-RTK và giải pháp chuyển đổi đại lượng gia tốc sang các thành phần dịch chuyển tương ứng là cơ sở để thực hiện bài toán phân tích, hiệu chỉnh độ chính xác của dữ liệu GNSS.

Nghiên cứu đã đạt mục tiêu đề ra ban đầu là quan trắc thời gian thực, đánh giá độ chính xác của giải pháp GNSS và cảm biến gia tốc. Tuy nhiên, một số hạn chế như khả năng truyền thời gian thực tốc độ cao trong điều kiện thực tế công trình là chưa được kiểm chứng, năng lực giải các bài toán thời gian thực với thiết bị IoT có cấu hình thấp là khó khăn. Do đó, trong tương lai, các thiết bị có tích hợp bộ vi xử lý mạnh hơn cần được áp dụng.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng: V.N.Q., N.V.H., T.Đ.T.; Thu thập dữ liệu: V.N.Q.; Xử lý số liệu: V.N.Q., N.V.H.; Viết bản thảo bài báo: V.N.Q.; Chỉnh sửa bài báo: V.N.Q., N.V.H., T.Đ.T.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Bộ Giao thông vận tải. Thông Tư Số: 37/2018/QĐ-BGTVT Ngày 07/06/2018 về "Quy Định về Quản Lý, Vận Hành Khai Thác và Bảo Trì Công Trình Đường Bộ", 2018, tr. 1–13.
2. Bộ Giao thông vận tải. Thông tư hướng dẫn một số nội dung về quản lý, khai thác và bảo trì công trình đường cao tốc. 2018, tr. 1–20.

3. Chính, L.M. Hệ thống quan trắc lâu dài công trình lớn ở Việt Nam. Kỷ yếu tuyển tập Hội nghị Khoa học thường niên năm 2013, tr. 31–33.
4. Hưởng, B.H. Bố trí thiết bị quan trắc cho cầu Dây Văng Rạch Miễu. Tư vấn thiết kế, 2014, tr. 33–38.
5. Nam, H.; Nam, L.V.; Thành, N.V.; Thông, M.L. Hệ quan trắc công trình cầu Cần Thơ. *Tạp chí Giao thông vận tải* **2018**, 1–11.
6. Nguyen, L.; Huy, H.P.; Hong, T.B. Structural health monitoring system of the Thuan Phuoc suspension bridge in Viet Nam. Proceedings of the International Conference on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth & Allied Sciences, 2018, pp. 1–13.
7. Quang, V.N.; Hà, N.V.; Chiều, V.Đ. Xây dựng hệ thống quan trắc chuyển dịch và cảnh báo sớm sử dụng kỹ thuật GNSS-RTK. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* **2023**, *17*, 134–146.
8. Quang, V.N.; Hà, N.V.; Trọng, T.Đ. Kết hợp GNSS, cảm biến gia tốc và giải pháp IoT trong quan trắc cầu thời gian thực. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* **2023**, *17*, 139–151. https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4v)-12.
9. Quang, V.N.; Chiều, V.Đ.; Hòa, P.T.T. Một nghiên cứu thực nghiệm kiểm định và quan trắc cầu bằng thiết bị toàn đạc Laser mặt đất. *Tạp chí Khoa học Kiến trúc - Xây dựng* **2022**, *45*, 65–69.
10. Chieu, V.D.; Dung, L.N.; Hung, C.V.; Quang, V.N.; Son, B.N. Study on the application of TLS for bridge deflection inspection in Vietnam. *J. Sci. Technol. in Civil Eng. - HUCE* **2023**, *17*, 14–25. https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4)-02.
11. Kopacik, A.; Erdélyi, J.; Kyrinovic, P. Structural health monitoring of bridges using accelerometers - A case study at Apollo bridge in Bratislava. *Geonauka* **2015**, *3*, 8–15. https://doi.org/10.14438/gn.2015.03.
12. Sekiya, H.; Kimura, K.; Miki, C. Technique for determining bridge displacement response using MEMS accelerometers. *Sensors* **2021**, *16*, 1–21. https://doi.org/10.3390/s16020257.
13. Paziewski, J.; Stepniak, K.; Sieradzki, R.; Yigit, C.O. Dynamic displacement monitoring by integrating high-rate GNSS and accelerometer: On the possibility of downsampling GNSS data at reference stations. *GPS Solutions* **2023**, *27*, 157. https://doi.org/10.1007/s10291-023-01500-x.
14. Xiong, C.; Lu, H.; Zhu, J. Operational modal analysis of bridge structures with data from GNSS/Accelerometer measurements. *Sensors* **2017**, *17(3)*, 436. https://doi.org/10.3390/s17030436.
15. Tùng, T.T. Thống nhất quản lý việc lắp đặt hệ thống quan trắc trong thi công và khai thác công trình. *Tạp chí điện tử Bộ giao thông vận tải* **2015**, 1–5.
16. ComNav Technology Ltd. K803 GNSS Module 30, 2020.
17. Heo, Y.; Li, B.; Lim, S.; Rizos, C. Development of a Network Real-Time Kinematic Processing Platform. Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009, 6, pp. 3647–3655.
18. El-Mowafy, A. Precise real-time positioning using network RTK. In Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications; InTech, 2012, pp. 161–187.
19. Perets, T. Investigation of Wi-Fi (ESP8266) module and application to an audio signal transmission. Thesis for B. Eng. Electrical and Electronic Engineering (Telecommunications Engineering), 2021.
20. Charles, D.G.; Paul, R.W. Adjustment computations. Fourth Eds., John Wiley & Sons, INC., 2006, ISBN 978-0-471-69728-2.

Real-time monitoring and combined analysis of construction displacement using GNSS and acceleration sensors

Vu Ngoc Quang[1]*, Nguyen Viet Ha[2], Tran Dinh Trong[3]

[1] Engineering faculty, University of Transport Technology; quangvn@utt.edu.vn
[2] Faculty of Geomatics and Land Administration, Ha Noi University of Mining and Geology; nguyenvietha@humg.edu.vn
[3] Faculty of Bridges and Roads, Hanoi University of Civil Engineering; trandinhtrong@nuce.edu.vn

Abstract: Monitoring of large-scale projects is increasingly focused on real-time monitoring to promptly reflect construction abnormalities. Most of the important devices in structural health monitoring systems are currently connected together by large wiring systems while there are now many new devices with low prices, compact sizes and integrated IoT solutions. The article studies the combination of GNSS equipment and low-cost accelerometer sensors in real-time construction monitoring, assesses the accuracy of GNSS-RTK data and analyzes displacement components including linear displacements, oscillates in all directions. The study used an experimental method, comparing results from data collected using GNSS device and accelerometer with actual displacement from a high-accuracy mechanical eto device. The study results show the feasibility of a real-time monitoring solution using GNSS and acceleration sensors. Simultaneously, the study also evaluated the fluctuation level of GNSS-RTK solution when compared with high-precision mechanical eto equipment from 1.2mm to 6.0mm and 1.2mm to 14.9mm for horizontal and vertical direction respectively. The results of accuracy assessment, sensitivity is the basic to select types, monitoring items suitable with current standards.

Keywords: GNSS-RTK; Acceleration sensor; MPU 6050;, IoT; Displacement; Real-time monitoring.