

# Jornadas de Automática

## Integración de IMU y GNSS. Estimación del estado del firme.

Díaz-Cacho, Miguel.<sup>a,\*</sup>, Chaves, Andre.<sup>b</sup>, G. Rivera, Matias.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Dept. Ing. Sistemas y Automática, Universidade de Vigo

<sup>b</sup>Instituto Politecnico de Bragança, Bragança, Portugal

<sup>c</sup>Dept. Ing. Sistemas y Automática, Universidade de Vigo

**To cite this article:** Díaz-Cacho, M., Chaves, A., Rivera, M.G. 2024. Integration of IMU and GNSS. Road surface condition estimation. Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10937>

### Resumen

Este trabajo presenta un sistema de integración de sensores proporcionada por un dispositivo móvil para entornos vehiculares. Los sensores integrados son un IMU y un receptor GNSS, que permiten crear un sistema de estimación del estado del firme basado en la variación de la aceleración vertical detectada por el IMU y asociarlo a unas coordenadas geodésicas. Para dotar al sistema técnico de un marco teórico se definen unidades específicas de rugosidad basándose en las muestras de la aceleración medida e inspiradas en las técnicas tradicionales de medida de rugosidad de superficies. El sistema se sirve de una topología ITS tradicional, donde el dispositivo móvil es la OBU con capacidad de transmisión de datos al servidor C-ITS en la nube para ser procesados y determinar los parámetros resultantes. Se realizaron pruebas del sistema en un entorno viario real con resultados satisfactorios, donde se detectaron diferencias en los tipos de firme y hendiduras en la calzada.

**Palabras clave:** ITS, Rugosidad de calzada, GNSS, IMU, Sensorización, Integración de sensores y percepción, localización, construcción de mapas.

### Integration of IMU and GNSS. Road surface condition estimation.

#### Abstract

This work presents a sensor integration system provided by a mobile device for vehicular environments. The integrated sensors are an IMU and a GNSS receiver, which allow the creation of a road surface condition estimation system based on the variation of the vertical acceleration detected by the IMU and associated with geodetic coordinates. To provide the technical system with a theoretical framework, specific roughness units are defined based on the samples of the measured acceleration and inspired by traditional surface roughness measurement techniques. The system uses a traditional ITS topology, where the mobile device is the OBU with the capacity to transmit data to the C-ITS server in the cloud to be processed and determine the resulting parameters. Tests of the system were carried out in a real road environment with satisfactory results, where differences in the types of road surface and indentations in the road were detected.

**Keywords:** ITS, Road roughness, GNSS, IMU, Sensing, Sensor integration and perception, Localization, Map building,

### 1. Introducción

Los actuales sistemas vehiculares incluyen funcionalidades de ayuda a la conducción y de confort dependientes de los datos recogidos por diversos sensores instalados en el vehículo. Aplicaciones como el trazado de

rutas están muy extendidas y son ampliamente utilizada en diversos campos y sectores, desde la planificación de viajes hasta la logística empresarial. Estas mismas aplicaciones se encuentran en los llamados teléfonos móviles inteligentes (en adelante *smartphone* por su término anglosajón), lo que

\*Autor para correspondencia: mcacho@uvigo.es  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

permite dotar de estas funcionalidades a vehículos que o no las llevan incorporadas o no las tienen actualizadas. Así, el uso de *smartphones* para aplicaciones de ayuda a la conducción permite dotar a un vehículo de ese tipo de capacidades de forma modular, prácticamente ilimitada y con un ciclo de vida mucho más dinámico que el del propio automóvil.

La inmensa mayoría de los *smartphones* tienen capacidades de sensorización, comunicaciones, programación y procesamiento de datos. Disponen de una MEMS IMU (Unidades Micro-electromecánicas y Unidades de Medida Inercial) compuestas por acelerómetros y giroscopios para la estimación de la orientación y poder conmutar la posición de la imagen en la pantalla entre horizontal y vertical. Además, disponen de capacidades de estimación de la posición sobre la superficie terrestre con una exactitud del orden de unas decenas de centímetros a unidades de metro. Así, los *smartphones* son dispositivos altamente capacitados para el prototipado de soluciones ITS móviles, dado que disponen de:

- numerosos sensores: micrófono, cámara, posicionamiento, IMU.
- diferentes interfaces de comunicación: 5G, Wifi, Bluetooth, NFC.
- sistema operativo y entorno de desarrollo.

Este trabajo plantea una prueba de concepto para aprovechar las capacidades de los *smartphones* instalados en un vehículo para establecer en tiempo real y de forma distribuida un registro del estado del pavimentado de carreteras. Este estado, que incluye información sobre la calidad de la carretera, la presencia de baches, pavimentación reciente o cualquier otra condición, puede afectar significativamente la seguridad y comodidad de viaje.

En los últimos años, se ha comenzado a estudiar la integración de datos sobre el estado de las carreteras en aplicaciones cartográficas. Algunas plataformas utilizan tecnologías como sensores en vehículos conectados, datos recopilados por los usuarios y sistemas de monitoreo gubernamentales para proporcionar información actualizada sobre las condiciones de las carreteras. Estos datos dinámicos permiten a los conductores tomar decisiones informadas sobre la ruta a seguir, evitando tramos de carretera en mal estado y mejorando la seguridad en los viajes. El estado de las calzadas se registra de forma manual en diversas bases de datos de las Diputaciones Provinciales como en la de Ourense (Deputacion de Ourense, 2017), pero su cuantización es apreciativa, con estados como “Buena”, “Mala” o “Regular” sin una actualización permanente ni disponer de ningún criterio objetivo y cuantitativo.

Este proyecto pretende utilizar la alta capacidad de integración de los *smartphones* para medir de forma oportunista la posición y las vibraciones en tiempo real, y asociarlas con el grado de descomposición del estado de la carretera. Para ello propone el desarrollo de un sistema que permite asociar datos de posicionamiento con datos de rugosidad de la carretera mediante sensores de posición GNSS y vibraciones IMU. El sistema ofrece el envío de datos a la nube mediante comunicaciones 4G/5G, recalculando los

promedios de vibración de los móviles para optimizar las transmisiones.

La integración del *smartphone* en el vehículo ya se estudió en (Almazán et al., 2013) entre otros, donde se ofrece incluso un método de calibración del dispositivo fundamentalmente en su posicionamiento dentro del vehículo. Otros estudios ya utilizaron el IMU para la detección de irregularidades en las calzadas e incluso asociándolo a niveles de consumo de combustible El-Wakeel et al. (2018), Zhao et al. (2021), Yu et al. (2022) aunque no lo asocian de forma directa al posicionamiento ni para el registro del estado. En Barbieri and Lou (2024) se presenta un estado del arte en el uso de *smartphones* para la medida del estado de los firmes de calzadas. Este trabajo aporta una visión hacia un uso más generalizado, orientado a la recolección genérica de datos desde cualquier tipo de vehículo y el envío de la información hacia servicios de procesamiento de datos en el C-ITS que pudiesen determinar el estado de la calzada mediante técnicas de inteligencia artificial o similares.

El artículo está organizado de la siguiente forma: tras la presentación y contextualización de la propuesta realizada en esta Introducción 1 se presenta el marco teórico de trabajo en la sección 2 donde se definen los parámetros a medir. En la Sección 3 se presenta el sistema contextualizado y una topología basada en los estándares ITS, así como el proceso de calibración de la OBU y el tratamiento de datos. Los resultados se muestran en la Sección 4 y finalmente las conclusiones y líneas futuras aparecen en la Sección 5.

## 2. Marco teórico

En el acabado de una superficie se identifican:

- Defectos de forma, que pueden ser abultamientos o hendiduras, inclinaciones, en resumen, una falta de planitud. Afectan a su uso, como generación de ruidos y vibraciones.
- Rugosidad. La rugosidad es una característica más o menos constante de una superficie concreta, donde las diferencias entre picos y valles en un corte transversal siguen un patrón parecido a una onda. Afectan al rozamiento, rodadura, desgaste, etc, y también tienen un efecto en las vibraciones y los ruidos.

Este trabajo pretende identificar grados de defectos y rugosidades de la superficie de las calzadas mediante la medición de las vibraciones. La medición de rugosidades se hace mediante instrumentos llamados *rugosímetros*. Este trabajo aprovechará los términos de medición de rugosidades para su proyección sobre la medida del estado de calzadas.

A modo de recordatorio se enumeran los parámetros a tener en cuenta para la medición de rugosidades:

- rugosidad o textura primaria.
- ondulación o textura secundaria: desviación espacial media entre los defectos de forma  $O_n$ .
- Longitud de Corte o Cutoff: distancia de referencia para distinguir ondulación y rugosidad. Si  $l_c \leq O_n$  se mide la Ondulación; si  $l_c > O_n$  se mide la rugosidad.

- Longitud de evaluación normalizada ( $l_n$ ) es la longitud donde se realiza la medida y puede considerarse un valor en torno a  $5l_c$ .
- Línea Media ( $L_m$ ) es la línea localizada en la parte media del perfil transversal de la superficie donde la suma de las áreas de rugosidad por encima y por debajo de la misma son iguales.
- Rugosidad media ( $R_a$ ) como la media aritmética del perfil de rugosidad de la superficie en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición  $L_m$ . Se calcula como

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |y(x)| dx. \quad (1)$$

Por aproximación se puede calcular el valor de  $R_a$  mediante el sumatorio de un número discreto de ordenadas (componente  $y$ ) de puntos de perfil,

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (2)$$

donde  $n$  es la cantidad de datos.

- Se emplea también la Rugosidad media cuadrática, siendo mas utilizada cuando  $R_a$  presenta poca resolución. Se representa matemáticamente como:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} y^2(x) dx} \quad (3)$$

y mediante aproximaciones como:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2} \quad (4)$$

- Otra de las medidas de rugosidad utilizadas es la Rugosidad media  $R_z$  definida en la norma DIN 4768. Es la media aritmética de la rugosidad parcial  $Z_i$  de cada uno de los módulos que forman la Longitud de medición. La rugosidad parcial  $Z_i$  es la suma de las ordenadas de los picos y valles de perfil en cada módulo de medida.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (5)$$

Para la rugosidad de calzadas se suele utilizar el parámetro IRI (Índice de Rugosidad Internacional, o International Roughness Index), que divide el desplazamiento acumulado de una suspensión vehicular entre la distancia recorrida durante la medida cuando circula a 80km/h Sayers et al. (1986). Las unidades son mm/m o m/km. El IRI se hace no obstante impracticable en largos recorridos ante la necesidad de disponer de equipamiento normalizado capaz de medir el desplazamiento de un sistema de amortiguación.

La longitud de medición, o módulo de medición de la rugosidad de una calzada debe ser definido teniendo en cuenta varias particularidades, como la superficie de contacto del vehículo con la calzada y los tipos de calzada.

Al utilizarse un sistema de instrumentación radicalmente diferente del utilizado habitualmente para la medida de rugosidades, se proponen nuevos términos de referencia para la medición de rugosidades de calzada.

Se propone el uso de una nueva medida llamada Varianza Cinemática de Calzada (Kinematic Road Variance,  $R_V$ ) definida como el cuadrado de la desviación típica de la aceleración en el eje de la gravedad a lo largo de un tramo de calzada definido. La Varianza Cinemática de Calzada será relativa al dispositivo sensor y al vehículo que lo incorpore, por lo que no podrá considerarse un valor absoluto, sino indicativo de la rugosidad respecto a otras calzadas medida con el mismo elemento sensor. En la ecuación (6), la aceleración en el eje de la gravedad se representa por  $a_z$  teniendo en cuenta el posicionamiento del IMU en la figura 2 y la gravedad está representada por  $g$ .

$$R_V = \frac{\sum_{i=0}^n (a_{z_i} - g)^2}{n}. \quad (6)$$

Para la selección de un valor de  $n$  es necesario hacer uso del concepto de "Rational Subgroups", concepto definido por Shewart Nelson (1988); Wheeler (1995) y que permite normalizar el uso de un grupo de datos para la realización de todas las medidas sobre el mismo. Partiendo de la base de un muestreo periódico de los datos ( $T$ ) y de la necesidad de una distancia mínima ( $D$ ) para tener resultados representativos, el número de datos del "Rational Subgroup" ( $n$ ) dependerá de la velocidad del vehículo ( $v$ ) de la forma:

$$n = \frac{D}{vT} \quad (7)$$

Se define la Magnitud de bache  $M_b$  como la  $a_z$  máxima medida por encima de  $K$  veces la media de  $a_z = g$  sumada a la raíz cuadrada de  $R_V$ , es decir

$$M_b = \max\{a_z | a_z > K(g + \sqrt{R_V}), \forall a_z\}. \quad (8)$$

El parámetro  $K$  dependerá de la sensibilidad del IMU y determina un criterio de diferenciación entre una rugosidad y un defecto o bache.

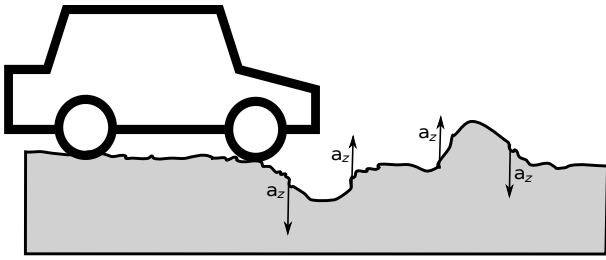


Figure 1: Detección de baches.

Como prueba de concepto, utilizando un dispositivo sensor con un periodo de muestreo de 20ms se considerarán medidas en tramos dependientes de la velocidad, basándose en el número de muestras recogidas, y manteniendo ese número en 500 muestras de aceleración ( $n = 500$ ). Así, para una velocidad de 50Km/h, el tramo de medida será de 140m.

### 3. Prototipado

El entorno de trabajo mantiene la nomenclatura habitual en ITS, donde la OBU (On Board Unit) y la RSU (Road Side Unit) son los dispositivos dentro del vehículo y fuera del vehículo respectivamente. Al utilizarse dispositivos *smartphone* con tecnología de comunicaciones 5G como OBU, la RSU es la BTS, por lo que no aplica ninguna acción sobre la misma al depender su mantenimiento y administración de los operadores 5G. En la topología ITS existe también un servidor en la nube que permite centralizar tanto el almacenamiento como el control de los servicios ITS; este servidor es llamado C-ITS (Vieira et al., 2023). Una topología de ejemplo se muestra en la figura 2.

En el C-ITS se almacenarán los desplazamientos. Un desplazamiento es un conjunto de registros de una tabla formada por los campos ID, Marca de Tiempo, Posición (coordenadas Geodésicas) e IMU (medidas de acelerómetro en 3 ejes). A cada desplazamiento se le añade un identificador único consistente en los campos ID y la primera marca de tiempo del conjunto de marcas de tiempo del desplazamiento. Los criterios para la determinación de un comienzo o un fin de desplazamiento pueden ser variados, dependiendo por un lado de triggers de estado (momento del arranque/parada del vehículo) o de la velocidad del vehículo (velocidad cero y aceleración cero durante un número determinado de minutos implica fin de desplazamiento).

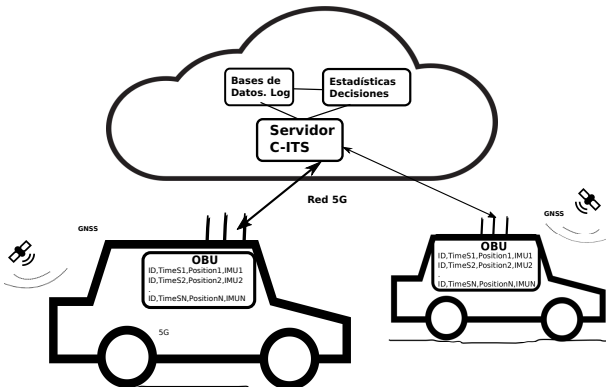


Figure 2: Sistema de captura de datos.

Se unificaron en un mismo eje de tiempos los datos capturados del IMU y del receptor GNSS. El receptor GNSS permite capturar datos con dos periodos fundamentales, 1 segundo o 0.1 segundos. En cambio el IMU realiza una captura de datos por eventos.

La técnica unificada para asociar un dato IMU con un dato GNSS fue aumentar la resolución del eje de tiempos al máximo que se disponía en los datos IMU, es decir, si se recogía un dato IMU en el instante 0.123 segundos, la resolución máxima era de 1ms.

Una vez determinada, se consideraron tanto los desplazamientos como las aceleraciones IMU como lineales y se realizó un interpolado First Order Hold (FOH). A efectos prácticos los datos se muestrean a 1ms, es decir, la mayor resolución temporal disponible.

El procesamiento de los datos referido al cálculo del  $R_V$  se realiza una vez que se reciben los registros en el servidor C-ITS. El procesado incluye el cálculo de la desviación típica de la aceleración vertical con media  $g$ , la identificación de baches y la respuesta en frecuencia de la aceleración en los tramos de medida.

#### 3.1. Calibración

Los teléfonos móviles inteligentes ofrecen dos tipos de mediciones. Las primeras magnitudes están referidas a la cinemática del dispositivo, como lo son los acelerómetros y los giroscopos integrados en una IMU. Las otras magnitudes están referidas a las coordenadas terrestres, como puede ser el magnetómetro y sobre todo las coordenadas geodésicas de los sensores GNSS.

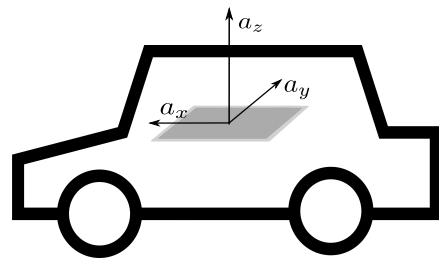


Figure 3: Posicionamiento OBU.

El proceso de calibración engloba dos procesos:

- Posicionamiento del sensor. Para el posicionamiento del sensor IMU de la OBU se parte del trabajo de (Almazán et al., 2013), donde se utiliza una aproximación gaussiana para la determinación del ángulo Yaw, a pesar de que en este trabajo no es necesaria la determinación de dicho ángulo.
- Establecimiento del patrón de vibraciones del sensor y el vehículo. La calibración del patrón de vibraciones del vehículo se establece a una velocidad constante en un firme en excelente estado, o directamente en un ralenti. Existen vehículos que pueden disponer de dos patrones, como son los vehículos híbridos, donde la huella de vibración del motor de combustión es muy diferente a la del motor eléctrico.

La aceleración medida en el eje vertical con dirección al centro de La Tierra (eje Z) en estado estacionario es la reacción a la aceleración de la gravedad, de forma que cuando el sensor está estable presenta un valor  $a_z = g$  y cuando cae su medida de aceleración Z es 0 ( $a_z = 0$ ).

Para el posicionamiento se recomienda hacer coincidir la orientación de la OBU con el vehículo (figura 3). Ello facilitará la determinación de las direcciones de movimiento, el Heading y los ángulos de Euler (Yaw, Pitch, Roll). Así, el *smartphone* tiene que ser fijado en el salpicadero del vehículo, o si fuese posible, en el chasis, en una posición relativa a algún punto reconocido en el vehículo.

### 3.2. Tratamiento de datos

Los diferentes sensores de la OBU, a pesar de utilizar el mismo reloj tienen diferentes frecuencias de muestreo o incluso tienen un muestreo por eventos. Para poder asociar los datos de la IMU con los datos de posición se uniformiza el eje de tiempos mediante interpolación en la mayor de las resoluciones disponible por los sensores usando la técnica ZOH. Existen trabajos previos de unificación de medidas en un solo fichero de muestras (Jiménez et al., 2019), aunque sin el aprovechamiento de la máxima frecuencia de muestreo.

Se generan dos ficheros en forma de registros indexados por una marca de tiempo. El primer fichero es el fichero de "Acc" que almacena las muestras de los tres ejes del IMU ( $a_x, a_y, a_z$ ) entre otros datos preprocesados. Puede verse su formato en la tabla 1. El segundo fichero es el fichero de posiciones (Pos) que guarda las coordenadas geodésicas (Latitud y Longitud). Este fichero es procesado para ser rellenado mediante técnicas de interpolación lineal (First Order Hold - FOH) a una resolución de milisegundos y poder así emparejar con los mismos valores de tiempo del fichero "Acc". El formato del fichero "Pos" puede verse en la tabla 2, y el formato del fichero resultante del emparejamiento se muestra en la tabla 3.

Table 1: Fichero Acc

Atributo	descripción
Time	Tiempo en formato UNIX
Ax ( $a_x$ )	Aceleración en la dirección longitudinal del dispositivo.
Ay ( $a_y$ )	Aceleración en la dirección transversal del dispositivo.
Az ( $a_z$ )	Aceleración en la dirección vertical del dispositivo.

Ax, Ay y Az coincidirán con la dirección del movimiento longitudinal, lateral y vertical del vehículo si la calibración se ha hecho según la figura 3.

Table 2: Fichero Pos

Atributo	descripción
Time	Tiempo en formato UNIX
Lat	Latitud medida o calculada como FOH
Lon	Longitud medida o calculada como FOH
Dist	Distancia métrica entre la posición anterior y la actual

Table 3: Fichero PosAcc

Atributo	descripción
Time	Tiempo en formato UNIX
Time0	Tiempo en segundos desde la primera muestra.
Lat	Latitud medida o calculada como FOH
Lon	Longitud medida o calculada como FOH
Dist	Distancia métrica entre la posición anterior y la actual.
Ax ( $a_x$ )	Aceleración en la dirección longitudinal del dispositivo.
Ay ( $a_y$ )	Aceleración en la dirección transversal del dispositivo.
Az ( $a_z$ )	Aceleración en la dirección vertical del dispositivo.

El proceso de emparejamiento basado en tiempo de los ficheros "Acc" y "Pos" se muestra en la figura 4.

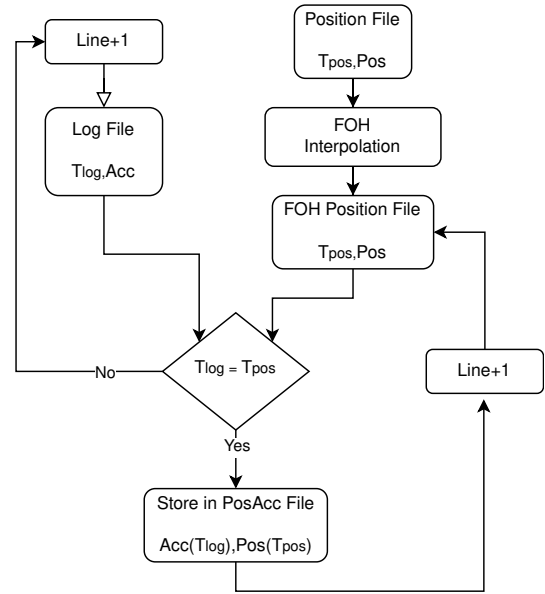


Figure 4: Diagrama de unión Posición-Aceleración

## 4. Resultados

En base al prototipado se creó la aplicación UGW compilada para sistemas Android. Como OBU se utilizó un Xiaomi M2101K9G con Android 13. Esta OBU utiliza una IMU Osmium MIMU22BT y un receptor GNSS qualcom MPSS.HI.4.3.c2-00105.3 integrado en el procesador SoC.

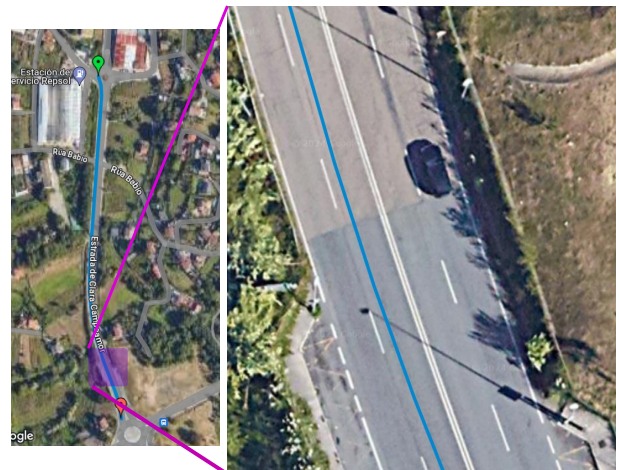


Figure 5: Tramo de carretera de pruebas.

Para conocer la viabilidad de la propuesta se seleccionó un tramo de carretera que incluyese un cambio de rasante y algún bache. De esa forma podría comprobarse si el prototipo desarrollado detectaría diferencias en la medida de la  $R_V$  entre ambos rasantes y si detectaría algún bache. El tramo seleccionado puede verse en la figura 5, donde también se muestra un detalle de la zona del cambio de rasante.

La figura 6 muestra el resultado de la medida de  $a_z$  en dos pruebas en diferentes días sobre el mismo trazado. Se da la particularidad de que el tramo de carretera dispone de dos carriles por sentido, y de que las pruebas se realizaron en el mismo sentido pero en carriles diferentes.

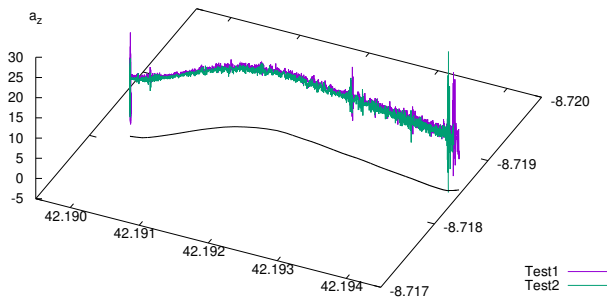


Figure 6: Medida de la aceleración vertical en el tramo estudiado.

Los resultados muestran una similitud entre ambas pruebas en dos aspectos:

- una menor variación (rugosidad) de  $a_z$  en el tramo con rasante más liso (hacia latitudes de 42.190 grados) y una mayor variación de  $a_z$  en el tramo con rasante en peor estado (en latitudes de 42.194 grados).
- la detección de un pico de  $a_z$  en las coordenadas (-8.7187, 42.1928) donde tras una inspección visual se encontraba una hendidura provocada por la instalación de una tapa de alcantarilla (figura 7).



Figure 7: Hendidura detectada por el sistema y provocada por una tapa de alcantarilla..

## 5. Conclusiones y líneas futuras

Este artículo presenta una prueba de concepto para la medición automática del estado de los firmes de las calzadas utilizando tecnologías de sensorización incluidas en dispositivos móviles. El objetivo es el de disponer de herramientas y criterios para el despliegue de este tipo de medidas de forma generalizada aprovechando dispositivos *smartphone*. Se presenta una implementación en cuatro etapas: i) identificación de las variables a medir, ii) adaptación de las técnicas de medición de rugosidad en superficies

a la medición automática de rugosidades en calzadas, iii) implementación del sistema OBU y iv) transmisión y procesado de los datos en el C-ITS.

Las líneas futuras abarcan múltiples aspectos, desde una ampliación de los dispositivos de sensorización, particularmente el espectro sonoro, hasta la implementación de técnicas de IA para generación de grados de peligro de conducción o accidentes. Otra línea futura apunta a la implementación de un filtro de Kalman que unifique las medidas de aceleración del IMU con las deducidas de la variación temporal en la posición y velocidad del vehículo basadas en los datos de posición muestreados de la sensorización GNSS.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el soporte de los proyectos INOU2024 (Integración de tecnologías de posicionamiento vehicular con sensorización de entorno) y SM-TMC (586035-EPP-1-2017-1-DZ-EPPKA2-CBHE-JP).

## References

- Almazán, J., Bergasa, L. M., Yebes, J. J., Barea, R., Arroyo, R., June 2013. Full auto-calibration of a smartphone on board a vehicle using imu and gps embedded sensors. In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). pp. 1374–1380. DOI: 10.1109/IVS.2013.6629658
- Barbieri, D. M., Lou, B., 2024. Instrumentation and testing for road condition monitoring – a state-of-the-art review. NDT & E International 146, 103161. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869524001269> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103161>
- Deputación de Ourense, 2017. Eiel xeoportall. URL: <https://eiel.depourense.es/>
- El-Wakeel, A. S., Li, J., Noureldin, A., Hassanein, H. S., Zorba, N., Dec 2018. Towards a practical crowdsensing system for road surface conditions monitoring. IEEE Internet of Things Journal 5 (6), 4672–4685. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2807408
- Jiménez, A. R., Seco, F., Torres-Sospedra, J., 2019. Tools for smartphone multi-sensor data registration and gt mapping for positioning applications. In: 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN.2019.8911784
- Nelson, L. S., 1988. Control charts: rational subgroups and effective applications. Journal of Quality Technology 20 (1), 73–75.
- Sayers, M., Gillespie, T., Paterson, W., 1986. Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. No. v. 23-46 in Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank. URL: <https://books.google.es/books?id=-Mk1AQAMAAJ>
- Vieira, E., Almeida, J., Ferreira, J., Dias, T., Vieira Silva, A., Moura, L., 2023. A roadside and cloud-based vehicular communications framework for the provision of c-its services. Information 14 (3). URL: <https://www.mdpi.com/2078-2489/14/3/153> DOI: 10.3390/info14030153
- Wheeler, D. J., 1995. Advanced topics in statistical process control. Vol. 470. SPC press Knoxville, TN.
- Yu, Q., Fang, Y., Wix, R., 2022. Pavement roughness index estimation and anomaly detection using smartphones. Automation in Construction 141, 104409. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522002825> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104409>
- Zhao, E., Walker, P. D., Ong, A., Al-Widyan, F., 2021. Measuring road conditions with an imu and gps monitoring system. In: Oberst, S., Halkon, B., Ji, J., Brown, T. (Eds.), Vibration Engineering for a Sustainable Future. Springer International Publishing, Cham, pp. 95–101.