(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **1 331 841**

(21) Número de solicitud: 202530305

(51) Int. CI.:

B61K 9/08	(2006.01)	***G01C 11/00***	(2006.01)
B61K 13/00	(2006.01)		
B61L 25/06	(2006.01)		
G01C 3/00	(2006.01)		

(12) SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD U

(22) Fecha de presentación:

25.02.2025

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

15.10.2026

(71) Solicitantes:

S.A DE OBRAS Y SERVICIOS, COPASA (90,00%)
C/ Paseo nº 25, entreplanta
32003 Ourense (Ourense) ES y
UNIVERSIDAD DE VIGO (10,00%)

(72) Inventor/es:

RÍOS OTERO, Eduardo;
ALDAO PENSADO, Enrique;
VEIGA LÓPEZ, Fernando;
GONZÁLEZ JORGE, Higinio;
DEL ARCO RODRÍGUEZ, Alberto José;
BAAMONDE ROCA, Antonio;
TALAVERA MORATO, Pablo José;
DÍEZ GARCÍA, Luis Manuel y
RENGEL SÁNCHEZ, Miguel Angel

(74) Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

(54) Título: **SISTEMA DE INSPECCIÓN FERROVIARIA EMBARCABLE EN UN VEHÍCULO FERROVIARIO**

ES 1 331 841 U

DESCRIPCIÓN

SISTEMA DE INSPECCIÓN FERROVIARIA EMBARCABLE EN UN VEHÍCULO FERROVIARIO

Campo técnico de la invención

El sistema propuesto pertenece al campo del mantenimiento ferroviario. Más concretamente, de componentes de la infraestructura vial (vías, balasto, pernos, etc.).

Estado de la Técnica

Las instalaciones ferroviarias precisan de mantenimiento tanto preventivo, como correctivo. En las tareas de mantenimiento, los sistemas de inspección son una pieza clave. Para la inspección de la geometría del balasto, empresas como RIEGL y OPTECH utilizan tecnología de tiempo de vuelo para crear modelos 3D de la superestructura ferroviaria [1,2]. Estos sistemas son especialmente útiles para evaluaciones geométricas de elementos como catenarias y perfiles de balasto. Sin embargo, su principal inconveniente radica en su elevado coste, que suele ascender a varios cientos de miles de euros.

En cuanto a la inspección de los elementos de apriete y de las traviesas, empresas como ENSCO emplean sistemas de imágenes de alta resolución montados en vehículos dedicados, los cuales permiten la inspección continua de las vías [3]. Estos sistemas son capaces de detectar defectos en componentes como traviesas de hormigón, pernos y clips, operando en diversas condiciones de iluminación y facilitando la digitalización de los datos. No obstante, requieren operadores capacitados para el análisis y clasificación de las imágenes. Por otro lado, el sistema V-CUBE de MERMEC mejora esta tecnología al integrar tres escáneres de triangulación láser, que permiten capturar con precisión la geometría de los componentes de la vía, incluido el balasto y los pernos de fijación [4]. Aunque este sistema es efectivo, su elevado coste y la necesidad de un procesamiento manual posterior por parte de personal especializado limitan su viabilidad.

Por otra parte, en años recientes, la industria de la automoción ha logrado avances significativos en el desarrollo de sistemas de detección ópticos, como cámaras y sensores LiDAR de estado sólido. Estos últimos permiten obtener reconstrucciones tridimensionales de alta resolución en tiempo real mediante la emisión y recepción de haces de luz pulsada. A diferencia de los sensores LiDAR tradicionales, la tecnología de estado sólido emite los haces de forma electrónica, sin necesidad de elementos

móviles. Esto no solo reduce considerablemente el coste de esta tecnología, sino que también mejora su robustez frente perturbaciones como vibraciones o movimiento [5]. Además, gracias a la producción a gran escala impulsada por el sector automotriz, en los últimos años se ha experimentado una significativa reducción en su precio, existiendo sensores comerciales con precisión centimétrica disponibles por unos pocos miles de euros [6].

[1] RIEGL: https://newsroom.riegl.international/2020/05/12/the-riegl-vmx-rail-triple-scanner-mobile-mapping-system/

[2] OPTECH: https://www.teledyneoptech.com/en/home/

[3] ENSCO: https://www.ensco.com/rail/track-imaging-systems

[4] MERMEC: https://www.mermecgroup.com/inspect/track-inspection/524/track-inspection-v-cube.php

[5] VELODYNE LIDAR VELARRAY H800: https://velodynelidar.com/press-release/velodyne-lidar-unveils-breakthrough-solid-state-lidar-sensor/

[6] LIVOX AVIA: https://www.livoxtech.com/avia

Breve descripción de la invención

Ante las limitaciones de las soluciones existentes, se presenta un sistema de inspección ferroviaria embarcable en un vehículo ferroviario que comprende una cámara para adquirir una pluralidad de imágenes de una infraestructura ferroviaria, un sensor LiDAR para medir distancias asociadas a la pluralidad de imágenes adquiridas, una unidad de geoposicionamiento para medir posiciones asociadas a las imágenes adquiridas, una unidad de procesamiento para la generación de un mapa de problemas georreferenciados de la infraestructura viaria, una unidad de acoplamiento con el vehículo ferroviario, donde la unidad de acoplamiento fija al menos la unidad de procesamiento, el sensor LiDAR, la unidad de geoposicionamiento y la cámara durante el desplazamiento del vehículo ferroviario.

Opcionalmente, la unidad de geoposicionamiento es multiconstelación GNSS RTK.

Opcionalmente, el sensor LiDAR tiene un láser de estado sólido.

Opcionalmente, la cámara monta un obturador global.

Opcionalmente, la unidad de acoplamiento incluye una conexión eléctrica a un tacómetro del vehículo ferroviario.

Opcionalmente, la unidad de acoplamiento incluye un primer módulo de acoplamiento para acoplar mecánicamente al menos la cámara al vehículo ferroviario, y un segundo módulo de acoplamiento para acoplar mecánicamente al menos el sensor LiDAR al vehículo ferroviario.

Opcionalmente, la unidad de procesamiento incluye un modelo de segmentación semántica de imágenes para clasificar los distintos elementos identificados en la infraestructura ferroviaria (traviesas, balastro, carriles, etc.) .

Opcionalmente, la unidad de procesamiento incluye un filtro de Kalman.

Breve descripción de las figuras

FIG. 1: Diagrama de bloques con los principales componentes de una realización del sistema.

FIG. 2: Diagrama esquemático de un aspecto del funcionamiento en una realización del sistema.

FIG. 3: Esquema del funcionamiento para la estimación de posición según una realización del sistema.

FIG. 4A: Ejemplo de representación de la infraestructura ferroviaria a partir del sensor LiDAR.

FIG. 4B: Ejemplo de representación de la elevación de la cama de balasto a partir del sensor LiDAR.

FIGs. 5A-5C: Ejemplo de un módulo de acoplamiento para el sensor LiDAR, mostrado aislado (FIG. 5A), en una topera (FIG. 5B) y en una imagen frontal del vehículo ferroviario (FIG. 5C).

FIG. 6A-6C Ejemplo de un módulo de acoplamiento para la cámara, mostrado aislado (FIG. 6A), en una topera (FIG. 6B) y en una imagen frontal del vehículo ferroviario (FIG. 6C).

Glosario de referencias numéricas:

100 Sistema.

110 Cámara.

120 Sensor LiDAR.

130 Unidad de procesamiento.

131 Estimación de posición.

133 Corrección de nubes de puntos.

135 Corrección de imágenes.

137 Análisis de nubes de puntos.

139 Análisis de imágenes.

140 Unidad de geoposicionamiento.

150 Unidad de comunicaciones.

175 Módulo de acoplamiento para LiDAR.

176 Módulo de acoplamiento para cámara.
200 Vehículo ferroviario.
202 Topera.
210 Tacómetro.
221 Medidas de velocidad lineal.
300 Infraestructura ferroviaria.
310 Carril.
320 Traviesa.
330 Elemento de sujeción.
340 Balasto.
500 Servidor.
600 Dispositivo de usuario.
410 Modelo digital georreferenciado de las vías.
420 Modelo dinámico del vehículo ferroviario.
412 Posición del carril.
413 Posición geográfica rectificada del carril.
414 Orientación del carril.
415 Vector de la velocidad.
421 Predicciones.
422 Ecuaciones de movimiento.
423 Estimaciones del estado
430 Filtro de Kalman.

Descripción detallada de la invención

Se describe sin carácter limitante y con referencia a las figuras anteriores varias realizaciones del sistema de inspección ferroviaria embarcable, en adelante, sistema 100. Su principal ámbito de aplicación son las vías sobre cama de balasto, tanto de ancho ibérico como de ancho métrico. El sistema 100 permite verificar el estado de los elementos de apriete y detectar grietas o corrosión en las traviesas de hormigón. Este sistema 100 preferentemente está destinado a empresas de mantenimiento ferroviario, ya que facilita la automatización de las operaciones de inspección, lo que resulta en una reducción de costes frente a las inspecciones tradicionales realizadas de forma manual.

La **FIG. 1** muestra un diagrama de bloques con los principales componentes de una realización del sistema 100. Las flechas indican flujo de información.

Esta realización del sistema 100 incluye un módulo de acoplamiento 175 con protecciones frente al entorno y sujeciones mecánicas al vehículo ferroviario 200 (p. ej., dresinas) donde se instala.

Esta realización del sistema 100 incluye una o más cámaras 110 que toman múltiples imágenes de las vías, por ejemplo, grabando un vídeo, preferiblemente, con obturador global ("global shutter" en terminología inglesa), evitando defectos por distorsión que dificulten o falseen la inspección del estado de la infraestructura ferroviaria 300, principalmente, de los raíles 310, traviesas 320 sobre balasto 340 y elementos de sujeción 330.

Además, la presente realización del sistema de inspección 100 incluye un sensor LiDAR 120, preferiblemente, de estado sólido ya que no precisa partes móviles. El sensor LiDAR 120 adquiere nubes de puntos 3D que pueden posteriormente ser procesados para analizar la morfología de la cama de balasto y detectar posibles deformaciones y/o desprendimientos.

La presente realización del sistema 100 incluye una unidad de geoposicionamiento 140, que preferiblemente implementa posicionamiento multimodal, basado por un lado en sistemas de navegación por satélite, GNSS, (Global Navigation Satellite System). Preferiblemente, aquellos sistemas GNSS que implementan RTK (Real-Time Kinematics). Preferentemente, la información obtenida con la unidad de geoposicionamiento 140 se complementa con un tacómetro 210 instalado en el vehículo ferroviario 200.

La información recogida por el sensor LiDAR 120 y la unidad de geoposicionamiento 140 se procesa en una unidad de procesamiento 130, por ejemplo, un ordenador embarcado. La unidad de procesamiento 130 aplica filtros de navegación, estima la posición y orientación del sistema 100 en tiempo real con precisión centimétrica. La unidad de procesamiento 130 puede, mediante una combinación de diferentes técnicas, corregir el efecto del movimiento del vehículo ferroviario 200 en los datos adquiridos y geolocalizarlo con precisión, por ejemplo, en un sistema GIS 160 (Geographical Information System). Esto facilita un posterior análisis y la toma de decisiones.

En algunas realizaciones, el sistema 100 incluye una unidad de comunicaciones 150 para enviar datos hasta un servidor 500, por ejemplo, para un post-procesamiento más exhaustivo, o bien, para enviar datos a un dispositivo de usuario 600, por ejemplo, para informar del estado de la infraestructura viaria de forma inmediata.

Algunas realizaciones del sistema 100, también pueden implementar técnicas de visión artificial e inteligencia artificial adaptadas para el análisis de defectos en la infraestructura ferroviaria. De esta forma, se puede obtener una clasificación automatizada del estado de la infraestructura. Por ejemplo, se pueden analizar perfiles

del balasto, detectar deformaciones o desprendimientos. En algunas realizaciones, el sistema 100 puede generar automáticamente informes georeferenciados con el estado de la infraestructura o, selectivamente sólo con los daños detectados.

La **FIG. 2** muestra un diagrama esquemático de un aspecto del funcionamiento en una realización del sistema 100 donde se emplean una unidad de geoposicionamiento 140 del tipo GNSS RTK, un tacómetro 210 y una pareja de cámaras 110 con obturador global.

La unidad de geoposicionamiento 140 del tipo GNSS RTK calcula la posición durante la inspección a lo largo de la vía, (por ejemplo, se puede implementar con un dispositivo del fabricante Ublox, modelo ZED-F9P-02B). Con una unidad de geoposicionamiento 140 de tipo multiconstelación se reciben señales de múltiples sistemas como GPS, GLONASS, Galileo y/o Beidou, y se calcula con precisión la posición geográfica. Estas características mejoran la exactitud de las mediciones implementando correcciones en tiempo real mediante la tecnología RTK. Las correcciones se reciben a través del protocolo NTRIP, que permite conectarse a estaciones de referencia virtuales mediante redes LTE (Long Term Evolution), por ejemplo, como las del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Con estas técnicas se logran precisiones de posicionamiento del orden de centímetros. En una realización particular, se implementa el protocolo CERCANA3M, que selecciona en tiempo real la estación más cercana para optimizar la precisión y la robustez del sistema 100.

Por robustez, para garantizar un geoposicionamiento incluso en áreas con recepción limitada de señales GNSS o con el protocolo LTE, el sistema 100 puede integrar información de un tacómetro 210 ya que el vehículo ferroviario 200 dispone habitualmente de uno. Mediante un conversor analógico-digital, las señales del tacómetro 210 se envían a la unidad de procesamiento 130, lo que permite determinar en tiempo real la velocidad del vehículo 200.

El sistema 100 emplea un sensor LiDAR 120 de estado sólido (por ejemplo, se puede implementar con el modelo HAP de Livox). Típicamente, un sensor LiDAR 120 de este tipo dispone de una tasa de muestreo de 450.000 puntos por segundo y genera nubes de puntos, con una precisión típica de 2 cm. La gestión de las nubes de puntos del sensor LiDAR 120 se puede llevar a cabo conectándolo a la unidad de procesamiento 130 (por ejemplo, mediante unas librerías de ROS2), lo que permite sincronizar la adquisición y referenciar las nubes de puntos utilizando un reloj interno de la unidad de procesamiento 130.

El sistema 100 emplea dos cámaras 110 con obturador global (global shutter), una para cada lado del carril. La ventaja de las cámaras 110 con obturador global frente a las

cámaras con sensores de barrido, (rolling shutter), es que capturan la información de todos los píxeles de la imagen al mismo tiempo. Esta característica hace a las cámaras de obturador global preferibles para la captura de imágenes en movimiento (por ejemplo, una cámara apropiada es el modelo VCXU.2-31C de Baumer conectable a la unidad de procesamiento 130 a través de librerías propias). Los instantes de adquisición se referencian con el reloj interno de la unidad de procesamiento 130. Se emplean algoritmos propios para la calibración del balance de blancos y la exposición. A partir de técnicas de colorimetría y análisis de imagen, se calculan los tiempos de exposición, así como la sensibilidad ISO del sensor necesaria para la correcta captura de las imágenes. La unidad de procesamiento 130 realiza varias operaciones intermedias para producir un primer análisis 139 de las imágenes y un segundo análisis 137 de las nubes de puntos. Una primera operación se refiere a la estimación 131 de la posición a partir de la unidad de geoposicionamiento 140 y del tacómetro 210. Otra operación se refiere a una primera corrección 133 de la nube de puntos del LiDAR 120 a partir de la estimación 131 de la posición. Otra operación se refiere a una segunda corrección 135 de las imágenes de las cámaras 110 también a partir de la estimación de la posición. Ambas correcciones 133, 135 se pueden realizar en paralelo y también ambos análisis 137, 139.

La **FIG. 3** muestra el esquema del funcionamiento para la estimación de posición según una realización del sistema que combina información multimodal y emplea un primer modelo digital georreferenciado ferroviario 410, y un segundo modelo dinámico 420 del vehículo ferroviario.

La unidad de procesamiento 130 del sistema recibe medidas de posición geográfica 141 de la unidad de geoposicionamiento 140 de tipo GNSS RTK y aplica una primera corrección a las medidas con el modelo digital georreferenciado ferroviario 410 para asignar, a cada medición 141, la posición de la vía 412 más cercana calculando así unas medidas de posición geográfica rectificadas 413. Adicionalmente, recibe también las medidas de velocidad lineal 221 a lo largo de la vía tomadas por un tacómetro 210 (puede estar incluido en el sistema o en el vehículo ferroviario) y, a partir de ellas, calcula el vector de la velocidad 415, teniendo en cuenta la orientación de los raíles 414 en cada punto de la vía (por ejemplo, mediante una correlación de las medidas tomadas 141, 221 y las estimaciones anteriores 423 con un mapa de vías del IGN incluido en el modelo digital georreferenciado ferroviario 410. Esto sirve para poder calcular la dirección del carril en cada punto de vía y ayuda a reducir los errores en la navegación.

La unidad de procesamiento 130 genera las predicciones del estado de navegación 421 con un modelo dinámico 420 del vehículo ferroviario mediante un conjunto de

ecuaciones de movimiento 422. El modelo dinámico del vehículo ferroviario 420 incluye una representación matemática y computacional que describe el movimiento del vehículo a lo largo de la vía y permite predecir su estado futuro a partir de su posición en un tiempo dado, considerando su velocidad, aceleraciones e interacciones con la vía. Las predicciones 421 se combinan linealmente con las medidas rectificadas de la posición de los carriles 413, y del vector velocidad 415 en un filtro de Kalman 430 modificado. El filtro de Kalman 430, además de considerar las variaciones en las desviaciones típicas de las predicciones del modelo dinámico 420, tiene en cuenta las variaciones en la incertidumbre en tiempo real, considerando la variabilidad en la precisión de los equipos, dada por la cobertura GNSS y LTE. De esta forma, se realiza una combinación lineal de mediciones de sensores y predicciones que minimiza los errores en las estimaciones del estado del sistema. Todas estas estimaciones se referencian con respecto al reloj interno de la unidad procesamiento 130 para la posterior geolocalización y corrección de los datos adquiridos de los sensores embarcados (LiDAR, cámaras u otros que se desee añadir). Para más información, se ofrece una explicación de la navegación al final de la descripción.

Volviendo a la **FIG. 2**, se detalla cómo se puede realizar la segunda corrección 135 de nubes de puntos. A partir de las estimaciones de la posición ($\boldsymbol{x}(t)$) y orientación ($\overline{\boldsymbol{R}}(t)$) del vehículo ferroviario 200 en cada instante de tiempo dadas por la unidad de geoposicionamiento 140, las coordenadas de las nubes de puntos 3D se corrigen aplicando la transformación de traslación y rotación dada por la Ecuación (1):

$$\boldsymbol{x_{geo}}(t) = \boldsymbol{x}(t) + \overline{\boldsymbol{R}}(t)\, \boldsymbol{x_{LIDAR}}(t) \qquad (1)$$

Donde $\boldsymbol{x_{geo}}(t)$ son las coordenadas geográficas de las nubes de puntos, una vez corregidos los efectos de movimiento.

Para los cálculos presentados en la ecuación (1) se emplea el sistema de coordenadas geográficas UTM (Universal Transversal Mercator), que se basa en una proyección cartográfica de tipo cartesiano que permite expresar las coordenadas geográficas en unidades métricas, facilitando así las transformaciones de coordenadas y la georreferenciación. Toda esta información se lleva a un dispositivo de almacenamiento para su posterior análisis (por ejemplo, en buffers de datos en un disco duro a intervalos, por ejemplo, de un minuto). Para reducir las necesidades de almacenamiento, la información se puede guardar comprimida, (por ejemplo, en un formato de código binario con un algoritmo de compresión sin pérdidas ZLIB).

Haciendo referencia también a la **FIG. 2**, se puede realizar la segunda corrección 139 de imágenes al igual que en el caso del sensor LiDAR 120. Esto es, las imágenes de

las cámaras 110 se georreferencian utilizando las estimaciones de la posición 131 del vehículo ferroviario 200 durante la inspección. A cada imagen, considerando su instante de adquisición, se le asigna la correspondiente posición geográfica en coordenadas UTM, empleando las estimaciones proporcionadas por el filtro Kalman (ver FIG. 3). Cada una de estas imágenes se almacena (por ejemplo, en formato .JPG con compresión) en un dispositivo de almacenamiento, (por ejemplo, un disco duro) para el posterior análisis 139 de las imágenes.

Análisis de las nubes de puntos y las imágenes:

La **FIG. 4A** ilustra un ejemplo de representación de la infraestructura ferroviaria 300 con las nubes de puntos del sensor LiDAR. La **FIG. 4B** ilustra un ejemplo de representación de la elevación de la cama de balasto en diferentes tonos de gris (más oscuro, más elevado; más claro, menos elevado), lo que permite identificar posibles desprendimientos, o movimientos. Por ejemplo, para detectar problemas, bien con la unidad de procesamiento a bordo del vehículo ferroviario o bien en un servidor remoto con mayor capacidad de computación, se comparan los modelos de elevaciones obtenidos con los de inspecciones previas a partir de algoritmos de procesado de imagen. De esta forma, se identifican de forma automatizada los elementos de la infraestructura ferroviaria 300, como traviesas 320, elemento de sujeción, balasto 340, carriles 310, etc. Se analizan en busca de problemas y se elabora un informe georreferenciado con ellos muy útil para las tareas de mantenimiento y prevención.

Respecto de las imágenes de las cámaras, se pueden analizar mediante técnicas de Deep Learning para detectar las diferentes patologías en los elementos de la infraestructura ferroviaria. En una realización, se aplica en primer lugar un modelo de segmentación semántica de imágenes (por ejemplo, según una red neuronal convolucional como DeepLab V3+), que identifica y clasifica los distintos elementos de la infraestructura ferroviaria. De esta forma, se pueden reconocer automáticamente los elementos y verificar su correcto posicionamiento.

Además, se realiza un análisis detallado del estado de las traviesas de hormigón. Para ello, se extraen las partes de las imágenes correspondientes a las traviesas y se les aplica un detector de objetos (por ejemplo, YOLO V8, un modelo de visión por computadora de Ultralytics), para identificar la formación de grietas u otras imperfecciones.

Como resultado, se genera un informe con todas los problemas detectados y una valoración de sus magnitudes, todos ellos georreferenciadas para facilitar la toma de decisiones y la planificación de las labores de mantenimiento.

A continuación, se describe una unidad de acoplamiento con unos elementos de anclaje mecánico del sistema al vehículo ferroviario mientras se realiza la inspección. En la realización, la unidad de acoplamiento tiene dos módulos de acoplamiento diferentes destinados al LiDAR y a la cámara. La unidad de proceso se puede incorporar en ambos.

En la **FIG. 5A** se ilustra aisladamente un primer módulo de acoplamiento 175 para alojar el sensor LiDAR dentro de una carcasa 172. El primer módulo de acoplamiento tiene una inclinación regulable a través de los brazos 173. En la **FIG. 5B** se ilustra el mismo primer módulo de acoplamiento 175 ya unido al foco 204 que se encuentra sobre una topera 202. En la **FIG. 5C** se ilustra la parte frontal de un vehículo ferroviario 200 con sus focos 204 situados encima las toperas 202 donde se instalaría el sensor LiDAR mediante el módulo de acomplamiento.

En la **FIG. 6A** se ilustra aisladamente un segundo módulo de acoplamiento 176 para alojar la cámara dentro de una carcasa 172. El segundo módulo de acoplamiento 176 se sitúa orientado verticalmente a través de los brazos 173 para captar imágenes de una zona alrededor de la vía. En la **FIG. 6B** se ilustra dicho segundo módulo de acoplamiento 176 ya unido a una topera 202. En la **FIG. 6C** se ilustra la parte frontal de un vehículo ferroviario 200 donde iría ubicado el segundo módulo de acoplamiento.

Explicación adicional de la navegación

Para mayor detalle de las operaciones que puede llevar a cabo el presente sistema, se ofrece una explicación extendida con referencia a la **FIG. 3**.

El tacómetro 210 provee, en tiempo real, a un modelo digital georreferenciado ferroviario 410 de medidas de velocidad lineal 221 v_k del vehículo ferroviario a lo largo de la vía en cada paso de discretización temporal k. Estas medidas 221 v_k están sujetas a incertidumbres debido a los errores del instrumento. Este error estadístico está dado por las especificaciones del fabricante y se denota como Δv.

La unidad de geoposicionamiento 140 del tipo GNSS RTK proporciona medidas de la posición geográfica 141 x_k^{GNSS} del vehículo ferroviario a lo largo de la vía, en cada paso de discretización temporal k. Para facilitar el tratamiento de datos, dichas coordenadas, se expresan preferiblemente en sistema de coordenadas UTM, en metros. El error de las medidas puede variar en los diferentes tramos de la vía, ya que la precisión depende de la cobertura LTE del módulo RTK, así como de la posición de las constelaciones de satélites. El error asociado a estas medidas 141 x_k^{GNSS}, se caracteriza a través del HDOP (Horizontal Dillution of Precision), una magnitud que reporta habitualmente la propia

unidad de geoposicionamiento 140. En cada instante de tiempo, este error se denota como $HDOP_k$.

El modelo digital georreferenciado ferroviario 410 incluye información de mapas de vías del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Es un modelo vectorial que expresa las coordenadas del punto central de las vías de todo el territorio nacional. Denotamos a esta curva del centro de la vía como *C*.

El filtro de Kalman 430 se inicializa en el primer paso de discretización temporal (k = 0) a partir del estado del sistema en el instante inicial $\hat{x}_{0|0} = [x_0, y_0, v^x_0, v^y_0]$, siendo $\hat{x}_{0|0}$ el vector que representa la posición y velocidad horizontales en coordenadas UTM del sistema. A partir de este valor de estado inicial, se emplea el modelo digital georreferenciado 410 y se calcula el valor del ángulo $\theta(\hat{x}_{0|0})$ que expresa la orientación de la vía de tren con respecto al norte geográfico en el punto inicial de la trayectoria. A partir de este valor, se calcula el vector velocidad (v^x_0, v^y_0) del vehículo ferroviario, así como sus incertidumbres (Δv^x_0, Δv^y_0), teniendo en cuenta los errores del tacómetro.

A partir de esta información, la unidad de procesamiento 130 calcula las predicciones del estado del sistema para el siguiente paso de discretización temporal empleando un modelo dinámico de movimiento lineal del vehículo de vía. Para los cálculos se escoge un paso de discretización constante, e igual al periodo de muestreo del sensor GNSS (Δt). Asimismo, también se calcula una matriz de covarianza asociada a dicha predicción $P_{1|0}$, considerando los errores del tacómetro, y las incertidumbres en el paso de tiempo anterior.

Posteriormente, las mediciones GNSS (x_1^{GNSS}) se corrigen asignando a cada observación el punto más cercano de la línea central de la vía que se denomina como z_1 ($z_1 \in C$). Además, para tener en cuenta la variabilidad en la precisión de GNSS, las incertidumbres de medición (Δx_1, Δy_1) se actualizan proyectando el círculo HDOP registrado a lo largo del eje central de la vía. Luego, estos valores se combinan con la predicción del estado a partir de la ganancia de Kalman óptima K_1, que calcula las estimaciones ´optimas del sistema minimizando el determinante de una matriz de covarianza S_1. Este proceso se realiza iterativamente para todos los pasos temporales k hasta completar la reconstrucción de la trayectoria.

Destacar que las mediciones de posición GNSS no están disponibles en todos los pasos temporales. En aquellos pasos donde la señal está ausente, se asigna un valor infinito a la matriz de covarianza de la medición S_k. En esta situación, la navegación depende únicamente de las predicciones del estado. Sin embargo, pueden experimentar deriva, lo que resulta en un incremento lineal de la incertidumbre de posición y de la matriz de covarianza $P_{k|k-1}$ con el tiempo. Si el trazado incluye secciones largas sin cobertura GNSS, esto podría causar discontinuidades en la estimación del estado. Cuando la

señal GNSS se restaura, las incertidumbres de medición suelen ser un orden de magnitud menores que las de las predicciones basadas en odometria. En consecuencia, el Filtro de Kalman (KF) asignaría una ganancia agresiva, confiando únicamente en los valores GNSS y provocando posibles discontinuidades entre pasos consecutivos.

Para mitigar este problema, se aplica un suavizador RTS. El proceso comienza con las estimaciones del estado filtradas por el Filtro de Kalman y realiza un barrido hacia atrás a lo largo de la trayectoria, actualizando el estado en cada paso temporal al incorporar información de pasos posteriores. Este barrido hacia atrás está regulado por una ganancia de suavizado, que minimiza la covarianza de los estados suavizados.

La ganancia se calcula en función de las covarianzas $P_{k|k}$ y $P_{k+1|n}$ para reducir la influencia de las estimaciones con alta varianza. De esta manera, se eliminan las discontinuidades en la propagación del estado, corrigiendo progresivamente la deriva en áreas sin señal GNSS.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de inspección ferroviaria (100) embarcable en un vehículo ferroviario (200) que comprende:

- una cámara (110) para adquirir una pluralidad de imágenes de una infraestructura ferroviaria (300);
- un sensor LiDAR (120) para medir distancias asociadas a la pluralidad de imágenes adquiridas;
- una unidad de geoposicionamiento (140) para medir una pluralidad de posiciones geográficas asociadas a la pluralidad de imágenes adquiridas;
- una unidad de procesamiento (130) configurada para generar un mapa de problemas georreferenciados de la infraestructura ferroviaria (300);
- una unidad de acoplamiento (175) con el vehículo ferroviario (200), donde la unidad de acoplamiento (175) fija mecánicamente al vehículo ferroviario (200) durante el desplazamiento al menos la unidad de procesamiento (130), la unidad de geoposicionamiento (140) y la cámara (110).

2. Sistema (100) según la reivindicación 1, donde la unidad de geoposicionamiento (140) es multiconstelación GNSS RTK.

3. Sistema (100) según la reivindicación 1 o 2, donde el sensor LiDAR (120) tiene un láser de estado sólido.

4. Sistema (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la cámara (110) monta un obturador global.

5. Sistema (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de acoplamiento incluye una conexión a un tacómetro del vehículo ferroviario (200) para trasladar la medida de la velocidad lineal de dicho vehículo ferroviario (200) a la unidad de procesamiento (130).

6. Sistema (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de acoplamiento incluye un primer módulo de acoplamiento (175) para acoplar mecánicamente al menos el sensor LiDAR (120) al vehículo ferroviario (200), y un segundo módulo de acoplamiento (176) para acoplar mecánicamente al menos la cámara (110) al vehículo ferroviario (200).

7. Vehículo ferroviario (200) que comprende el sistema de inspección ferroviaria (100) embarcable según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

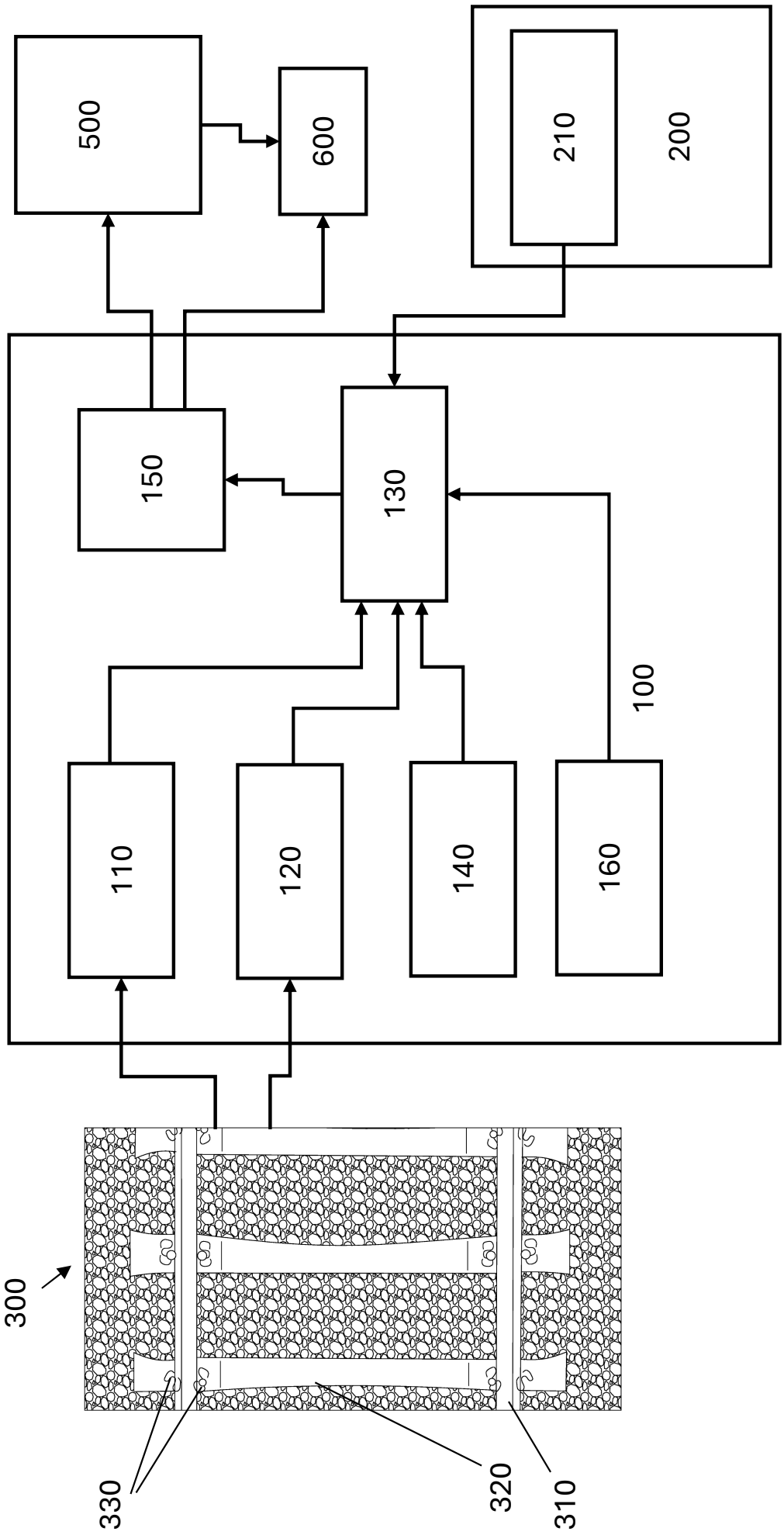


FIG. 1

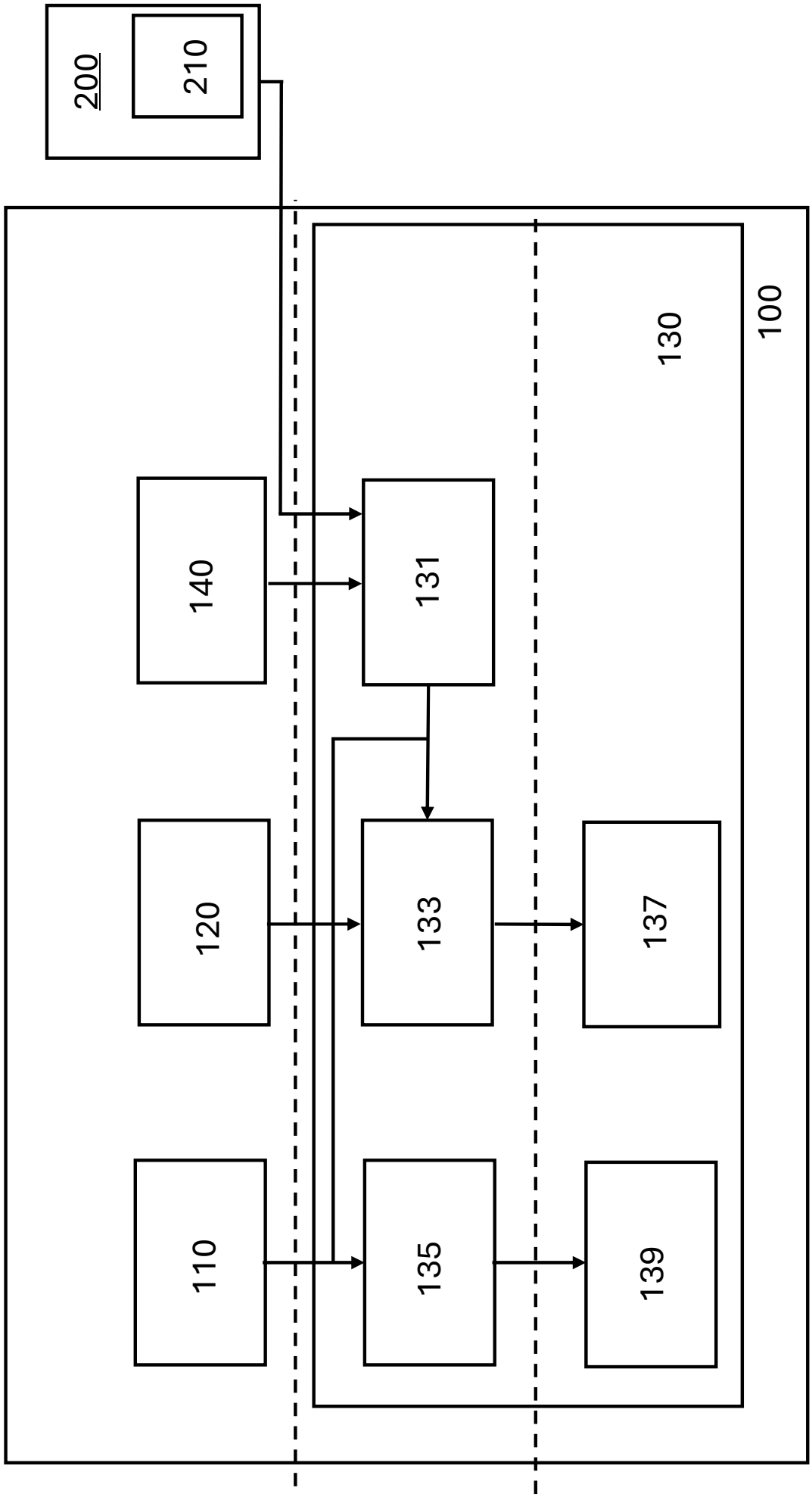


FIG. 2

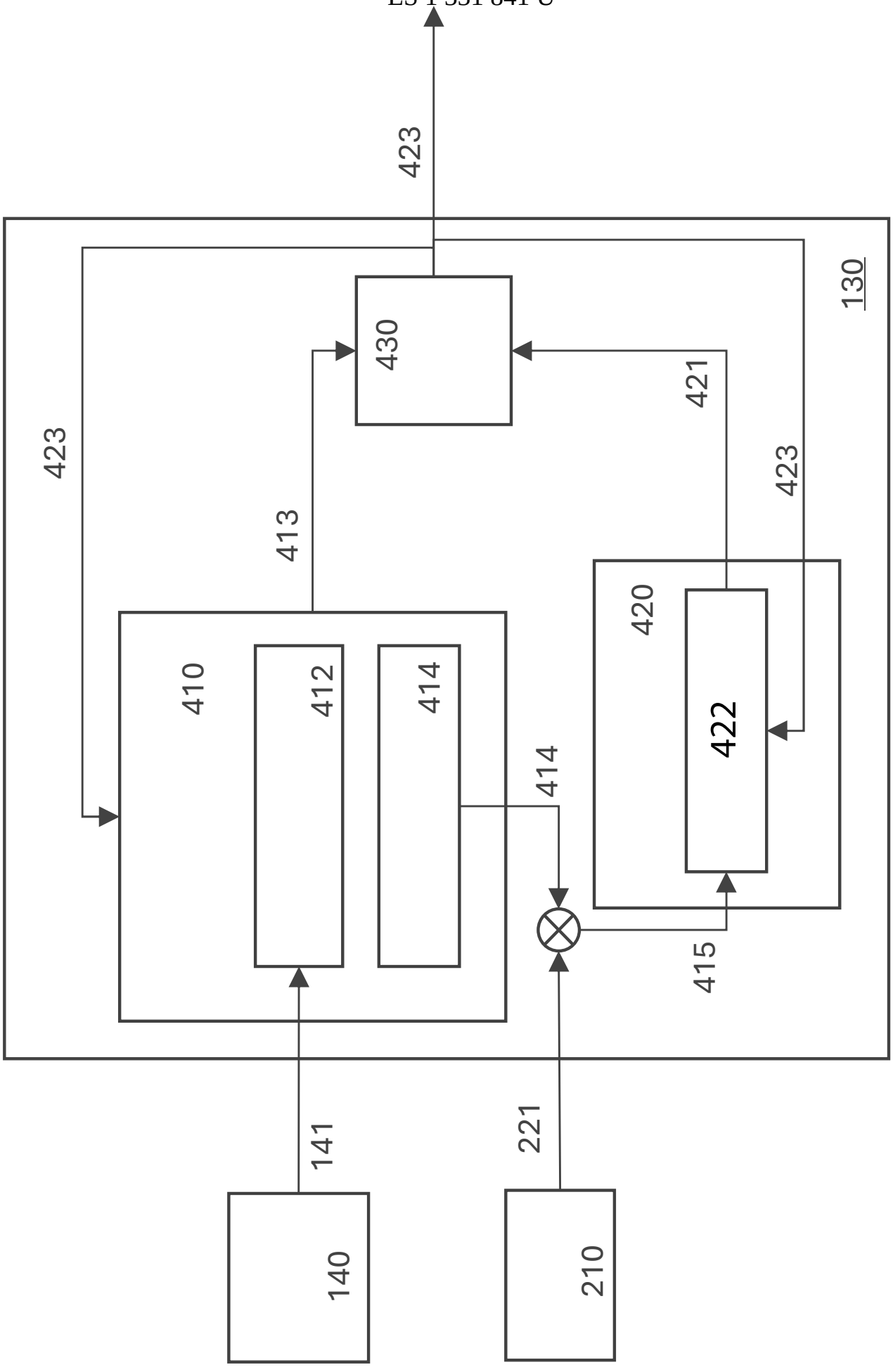

423
130
430
421
423
423
413
420
410
412
414
422
414
415
141
221
140
210

FIG. 3

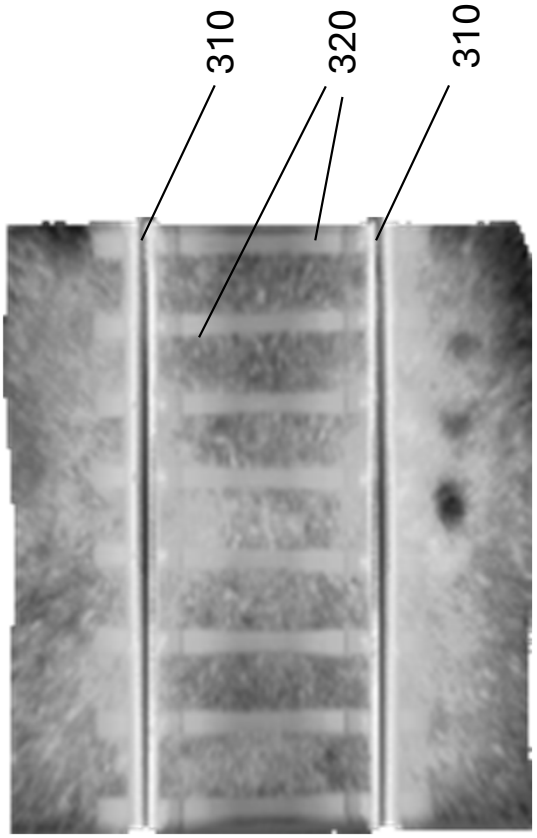


FIG. 4B

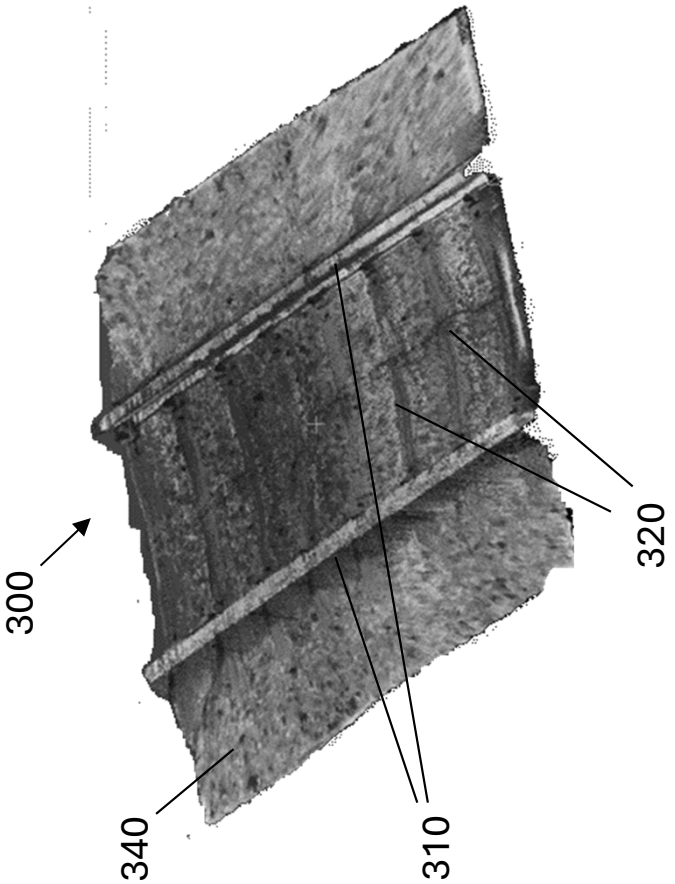


FIG. 4A

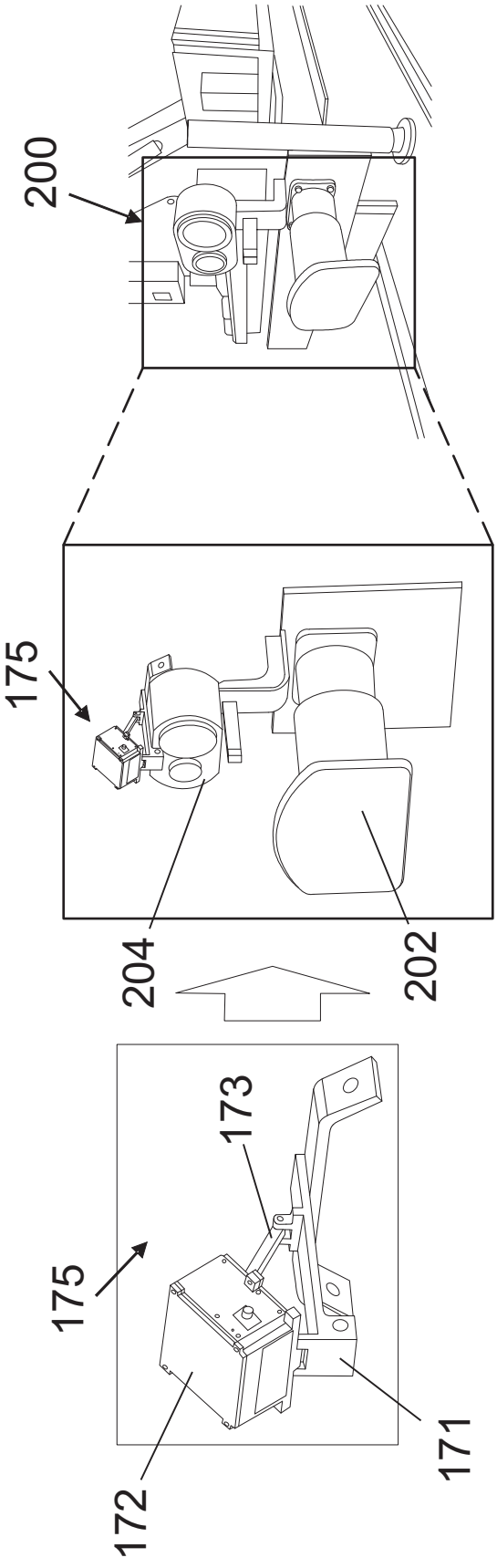


FIG. 5C

FIG. 5B

FIG. 5A

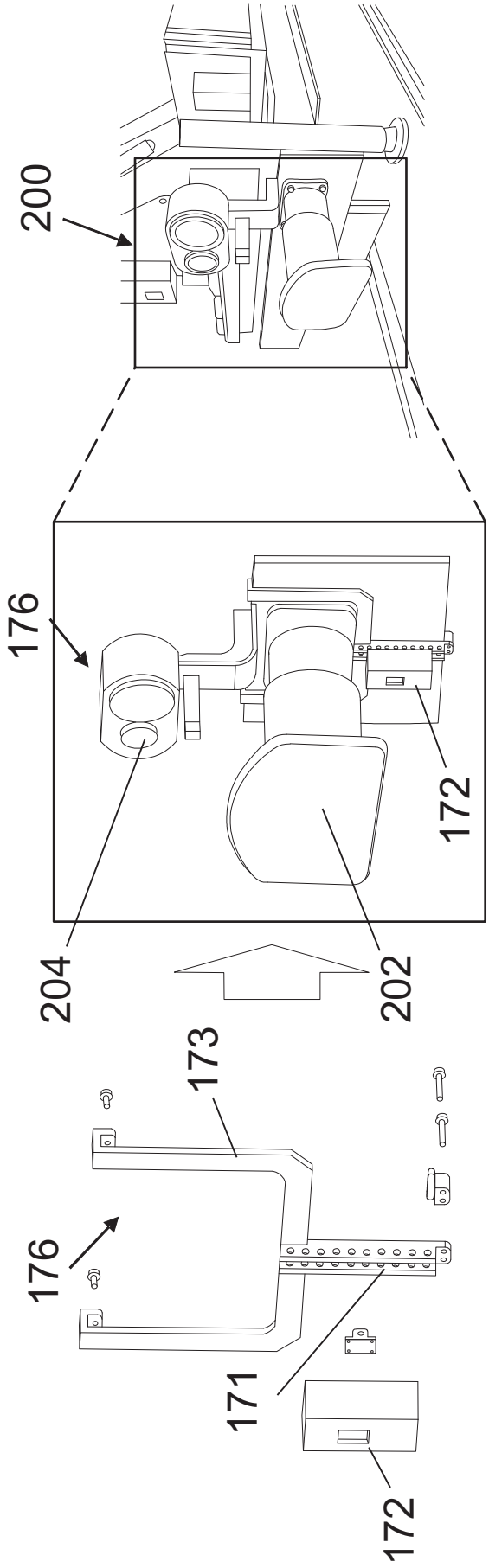


FIG. 6C

FIG. 6B

FIG. 6A