

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 667 671**

51 Int. Cl.:

G01C 25/00 (2006.01)

H01Q 1/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2014 E 14191916 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018 EP 2869027**

54 Título: **Sistema y método para calibrar una unidad de medición inercial**

30 Prioridad:

05.11.2013 US 201314071844

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

14.05.2018

73 Titular/es:

**THINKOM SOLUTIONS, INC. (100.0%)
20000 Mariner Avenue Suite, 500
Torrance, CA 90503, US**

72 Inventor/es:

ORZECHOWSKI, PAWEL

74 Agente/Representante:

RIZZO, Sergio

ES 2 667 671 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema y método para calibrar una unidad de medición inercial

CAMPO TÉCNICO

5 [0001] La presente invención se refiere generalmente a unidades de medición inercial, y en particular a métodos y sistemas para calibrar unidades de medición inercial.

ANTECEDENTES

10 [0002] Una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) proporciona mediciones inerciales (mediante la utilización de giroscopios) y mediciones de aceleración. Sin embargo, los giroscopios y acelerómetros son sensores inherentemente corrompidos por errores de medición. Las fuentes de errores de medición incluyen un sistema de circuitos electrónicos de postprocesamiento del sensor, variación en la energía suministrada, variaciones inducidas térmicamente, etc. La calibración del sensor se utiliza para eliminar errores de medición estimando un error del sensor y proporcionando correcciones de ajustes a la IMU a fin de mejorar su funcionamiento (p. ej., la precisión).

15 [0003] Para IMU con tres ejes de medición ortogonales, los métodos convencionales de calibración de IMU necesitan que los ejes de medición de la IMU se reposicionen sucesivamente a lo largo de las tres dimensiones ortogonales para entrenar adecuadamente cada eje de medición. Para pequeños paquetes de IMU autónomas, esto se realiza con elementos fijos reconfigurables y tablas de velocidad precisas. En el caso de velocidades angulares, la salida del giroscopio se compara con una salida de una tabla de velocidad, en la que el eje de medición del giroscopio está alineado con el eje de rotación de la tabla. Los métodos convencionales para
20 calibrar una salida de un acelerómetro se basan en comparar la salida del acelerómetro con el campo gravitatorio previsto. Por consiguiente, a fin de calibrar con precisión los acelerómetros, se necesita un conocimiento preciso de la orientación del eje de medición del acelerómetro en relación con el campo gravitatorio. Para caracterizar las variaciones de error inducidas térmicamente, la tabla de velocidades junto con el elemento fijo montado en la IMU se coloca dentro de una cámara térmica y la temperatura se varía mientras se repite la calibración de la
25 IMU.

30 [0004] Para grandes sistemas con IMU integradas, como antenas en suspensión cardán, una calibración eficaz necesita tablas de velocidad considerablemente más complicadas e irregulares, y elementos fijos capaces de soportar el peso aumentado y las complicadas formas de los grandes sistemas. Si la cámara térmica no puede soportar el peso, el tamaño y/o la complicada forma del sistema integrado, la calibración de la IMU en relación con la temperatura se evita a expensas de una reducción del rendimiento. El documento US 2011/301902 A1 expone un sistema de calibración para una unidad de medición inercial. El documento US 8 259 020 B1 expone un sistema de antena para la comunicación por satélite. El documento US 3 599 495 A expone sistemas para estabilizar giroscópicamente y controlar el equipo montado en vehículos.

RESUMEN DE LA INVENCION

35 [0005] La presente invención dispone un aparato, y un método para calibrar la salida de un giroscopio y la salida de un acelerómetro de una IMU utilizando como referencia la velocidad rotacional.

40 [0006] Según un aspecto de la invención tal como se describe en la reivindicación 1, se dispone un aparato de calibración para calibrar una unidad de medición inercial (IMU) que presenta un eje de medición y produce una salida representativa de una orientación del eje de medición. El aparato de calibración incluye un buje rotacional, un buje de elevación, y un sistema de control. El buje rotacional está configurado para hacer girar la IMU en torno a un primer eje de rotación. El buje de elevación está configurado para hacer girar la IMU en torno a un segundo eje de rotación perpendicular al primer eje de rotación. La orientación del eje de medición en relación con el primer eje puede controlarse mediante la rotación de la IMU en torno al segundo eje. El sistema de control está configurado en combinación con el buje rotacional y el buje de elevación para hacer girar la IMU en torno al
45 primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una primera elevación en relación con el segundo eje de rotación. El sistema de control también se configura en combinación con el buje de rotación y el buje de elevación para hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una segunda elevación en relación con el segundo eje de rotación, siendo la segunda elevación distinta a la primera elevación. El sistema de control está configurado de forma
50 adicional en combinación con el buje de rotación y el buje de elevación a fin de, basándose en la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la segunda elevación, determinar un factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU. De manera opcional, el sistema de control está configurado para determinar el factor de corrección de la IMU comparando la salida de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación con una salida prevista de la IMU en la primera elevación y una salida prevista de la IMU en la segunda elevación. La salida prevista está
55 basada en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje y la elevación conocida de la IMU

relativa al segundo eje. De manera opcional, aplicar el factor de corrección de la IMU a la salida de la IMU en la primera elevación y a la salida de la IMU en la segunda elevación calibra la salida de la IMU de manera que: la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida calibrada de la IMU en la primera elevación sea menor que la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la primera elevación; y la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación es menor que la diferencia entre la salida de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación. De manera opcional, la IMU incluye uno o más giroscopios y uno o más acelerómetros y determinar la salida prevista de la IMU incluye de manera adicional: determinar una salida prevista del uno o más acelerómetros basándose en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU; y determinar una salida prevista del uno o más giroscopios basándose en la velocidad de rotación conocida. De manera opcional, la fuerza centrípeta experimentada por la IMU depende de una posición de la IMU relativa al primer eje y la posición de la IMU relativa al primer eje depende de manera adicional de una posición de la IMU en torno al segundo eje de rotación. De manera opcional, la IMU se monta a una distancia desfasada respecto al segundo eje de rotación. De manera opcional, el aparato de calibración incluye de manera adicional una cámara. El sistema de control está configurado para controlar la temperatura en la cámara y el buje rotacional, el buje de elevación y la IMU están situados dentro de la cámara. De manera opcional, el sistema de control está configurado para establecer la temperatura de la cámara antes de determinar el factor de corrección de la IMU. De manera opcional, el sistema de control está configurado para establecer la temperatura de la cámara en múltiples temperaturas diferentes y determinar el factor de corrección de la IMU para cada temperatura de las múltiples temperaturas diferentes. De manera opcional, el sistema de control está configurado además para determinar la relación entre la temperatura y la salida de la IMU y/o el factor de corrección de la IMU. De manera opcional, la relación entre la temperatura y la salida real de la IMU y/o del factor de corrección de la IMU se determina estimando coeficientes de un polinomio de grado n . De manera opcional, los coeficientes se estiman de forma recursiva. De manera opcional, el factor de corrección de la IMU se determina ajustando un polinomio racional a la salida real de la IMU.

[0007] Según otro aspecto de la invención, se proporciona una antena en suspensión cardán autocalibrable configurada para calibrar una unidad de medición inercial (IMU), comprendiendo la antena en suspensión cardán la IMU, un buje de rotación, un buje de elevación, y un sistema de control. La IMU tiene un eje de medición y produce una salida representativa de una orientación del eje de medición. El buje rotacional está configurado para hacer girar la IMU en torno a un primer eje de rotación. El buje de elevación está configurado para hacer girar la IMU en torno a un segundo eje de rotación perpendicular al primer eje de rotación. La orientación del eje de medición en relación con el primer eje puede controlarse mediante la rotación de la IMU en torno al segundo eje. El sistema de control está configurado en combinación con el buje rotacional y el buje de elevación para hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una primera elevación en relación con el segundo eje de rotación. El sistema de control también se configura en combinación con el buje de rotación y el buje de elevación para hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una segunda elevación en relación con el segundo eje de rotación, siendo la segunda elevación distinta a la primera elevación. El sistema de control está configurado de forma adicional en combinación con el buje de rotación y el buje de elevación a fin de, basándose en la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la segunda elevación, determinar un factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU. De manera opcional, el sistema de control está configurado para determinar el factor de corrección de la IMU comparando la salida de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación con una salida prevista de la IMU en la primera elevación y una salida prevista de la IMU en la segunda elevación. La salida prevista está basada en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje y la elevación conocida de la IMU relativa al segundo eje. De manera opcional, aplicar el factor de corrección de la IMU a la salida de la IMU en la primera elevación y a la salida de la IMU en la segunda elevación calibra la salida de la IMU de manera que: la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida calibrada de la IMU en la primera elevación sea menor que la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la primera elevación; y la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación es menor que la diferencia entre la salida de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación. De manera opcional, la IMU incluye uno o más giroscopios y uno o más acelerómetros y determinar la salida prevista de la IMU incluye de manera adicional: determinar una salida prevista del uno o más acelerómetros basándose en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU; y determinar una salida prevista del uno o más giroscopios basándose en la velocidad de rotación conocida. De manera opcional, la fuerza centrípeta experimentada por la IMU depende de una posición de la IMU relativa al primer eje y la posición de la IMU relativa al primer eje depende de manera adicional de una posición de la IMU en torno al segundo eje de rotación. De manera opcional, la IMU se monta a una distancia desfasada respecto al segundo eje de rotación. De manera opcional, la antena en suspensión cardán autocalibrable incluye de manera adicional una antena de placa plana. La IMU se instala sobre una superficie de la antena de placa plana. De manera opcional, la antena en suspensión cardán autocalibrable incluye de manera adicional un sensor de temperatura. El sistema de control está configurado de manera adicional para asociar el factor de corrección de la IMU determinado con una temperatura actual medida mediante la utilización del sensor de temperatura.

[0008] Según un aspecto adicional de la invención tal como se describe en la reivindicación 9, se proporciona un método para calibrar una unidad de medición inercial (IMU) que presenta un eje de medición y que produce una salida representativa de una orientación del eje de medición. El método incluye hacer girar la IMU en torno a un primer eje de rotación y en torno a un segundo eje de rotación perpendicular al primer eje de rotación, siendo la orientación del eje de medición relativa a un primer eje de rotación controlable mediante la rotación de la IMU en torno al segundo eje. El método también incluye girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la primera elevación en relación con el segundo eje de rotación. El método incluye además girar la IMU en segundo eje de rotación hacia una segunda elevación y girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la segunda elevación en relación con el segundo eje de rotación. El método también incluye determinar, basándose en la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU durante la rotación en la segunda elevación, un factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU. De manera opcional, un sistema de control está configurado para determinar el factor de corrección de la IMU comparando la salida de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación con una salida prevista de la IMU en la primera elevación y una salida prevista de la IMU en la segunda elevación. La salida prevista está basada en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje y la elevación conocida de la IMU relativa al segundo eje. De manera opcional, aplicar el factor de corrección de la IMU a la salida de la IMU en la primera elevación y a la salida de la IMU en la segunda elevación calibra la salida de la IMU de manera que: la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida calibrada de la IMU en la primera elevación sea menor que la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la primera elevación; y la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación es menor que la diferencia entre la salida de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación. De manera opcional, la IMU incluye uno o más giroscopios y uno o más acelerómetros y determinar la salida prevista de la IMU incluye de manera adicional: determinar una salida prevista del uno o más acelerómetros basándose en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU; y determinar una salida prevista del uno o más giroscopios basándose en la velocidad de rotación conocida. De manera opcional, la fuerza centrípeta experimentada por la IMU depende de una posición de la IMU relativa al primer eje y la posición de la IMU relativa al primer eje depende de manera adicional de una posición de la IMU en torno al segundo eje de rotación. De manera opcional, el método incluye además, antes de girar la IMU en torno al segundo eje de rotación hacia la primera elevación, establecer una temperatura actual para una temperatura de medición. De manera opcional, el método incluye además cambiar la temperatura actual entre una serie de temperaturas de medición y, para cada temperatura de medición, determinar el factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU en la temperatura de medición.

[0009] Para el cumplimiento de lo anterior y objetivos relacionados, la invención comprende las características descritas por completo en lo sucesivo y especialmente destacadas en las reivindicaciones. La siguiente descripción y los dibujos anexos exponen con detalle determinados modos de realización ilustrativos de la invención. No obstante, estos modos de realización son indicativos de solo unas pocas de las varias formas en las que se pueden emplear los principios de la invención. Otros objetos, ventajas y nuevas características de la invención surgirán de la siguiente descripción detallada de la invención cuando se analice junto con los dibujos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0010] En los dibujos anexos, las mismas referencias indican las mismas partes o características:
 La FIG. 1A es un gráfico que muestra (un) ejemplo(s) de (una) salida(s) de la IMU;
 La FIG. 1B es un gráfico que muestra (un) ejemplo(s) de (una) salida(s) prevista(s) de la IMU;
 La FIG. 1C es un gráfico que muestra (una) salida(s) de la FIG. 1A que se han calibrado;
 Las FIGS. 2A y 2B son vistas alternativas de un diagrama esquemático de un aparato de calibración;
 La FIG. 3 es un diagrama de bloques que muestra las conexiones entre los distintos componentes del aparato de calibración;
 La FIG. 4 es un diagrama esquemático del aparato de calibración de la FIG. 2 con la IMU situada en una elevación diferente; y
 La FIG. 5 es un diagrama de bloques de un método para calibrar una IMU mediante la utilización del aparato de calibración.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

[0011] La presente invención se describirá ahora en detalle haciendo referencia a los dibujos. En los dibujos, cada elemento con un número de referencia es similar a otros elementos con el mismo número de referencia, independientemente de la designación de letra que siga al número de referencia. En el texto, un número de referencia con una designación de letra específica que sigue al número de referencia hace referencia al elemento específico con el número y la designación de letra y un número de referencia sin una designación de letra

específica hace referencia a todos los elementos con el mismo número de referencia, independientemente de la designación de letra que siga al número de referencia en los dibujos.

5 **[0012]** Cabe señalar que muchos de los elementos descritos en esta especificación pueden implementarse en un circuito(s) *hardware*, un procesador que ejecuta un código de *software* o instrucciones que están codificadas en un medio de lectura por ordenador al que puede acceder el procesador, o una combinación de un circuito(s) *hardware* y un procesador o un bloque de control de un circuito integrado que ejecute código legible por ordenador codificado en un medio de lectura por ordenador. De este modo, el término circuito, módulo, servidor, aplicación u otra descripción equivalente de un elemento tal como se utiliza a lo largo de esta especificación, a menos que se indique de otro modo, tiene el propósito de abarcar un circuito *hardware* (tanto elementos independientes como un bloque de circuitos integrados), un procesador o bloque de control que ejecute código codificado en un medio de lectura por ordenador, o una combinación de circuito(s) *hardware* y un procesador y/o bloque de control que ejecute dicho código.

10 **[0013]** La presente invención proporciona un aparato de calibración y un método para calibrar una salida de un giroscopio y una salida de un acelerómetro de una IMU mediante la utilización de una velocidad rotacional como referencia. La calibración de la(s) salida(s) de la IMU se lleva a cabo comparando la(s) salida(s) de la IMU con la salida prevista de la IMU, en el que la salida prevista se determina con base en una velocidad de rotación conocida de la IMU y la fuerza centrípeta que actúa en la IMU debido a la velocidad de rotación conocida. Al analizar las diferencias entre la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU y la(s) salida(s) de la IMU, es posible determinar el factor(es) de corrección que, cuando se aplica a la(s) salida(s) de la IMU, calibra la(s) salida(s) de la IMU corrigiendo los errores de medición.

15 **[0014]** En la presente solicitud, la velocidad de rotación puede referirse a, por ejemplo, la tasa angular, la rapidez angular, la frecuencia angular, la frecuencia circular, la frecuencia orbital o la frecuencia en radianes.

20 **[0015]** Los métodos convencionales de calibración de IMU se basan en la gravedad como una referencia para compensar los errores de medición de los acelerómetros y en las velocidades angulares para compensar los errores de medición de los giroscopios. La mayor parte de las IMU utilizadas para determinar la actitud emplean giroscopios de tres ejes y acelerómetros de tres ejes, que necesitan hacer girar la IMU en las tres direcciones para calibrar los tres ejes de medición mediante la utilización de métodos de calibración convencionales. Mediante la utilización de la velocidad rotacional como referencia para calibrar las salidas del acelerómetro y las salidas del giroscopio de una IMU, el aparato de calibración y el método descritos en esta solicitud simplifica el proceso de calibración al reducir el número de orientaciones del sensor que se necesitan para la calibración.

25 **[0016]** Volviendo inicialmente a la FIG. 1A, se muestran ejemplos de la(s) salida(s) de una IMU que gira a una velocidad de rotación constante. En este ejemplo, la IMU incluye tres acelerómetros, cada uno con un eje de medición orientado perpendicularmente a los ejes de medición de los otros acelerómetros. La salida de la IMU consiste en tres salidas 100a, 102a, 104a, una salida por cada acelerómetro. La salida de cada acelerómetro (etiquetada 100a, 102a y 104a respectivamente) representa el componente de la fuerza centrípeta que actúa a lo largo del eje de medición de dicho acelerómetro. Por ejemplo, la salida 100a puede corresponder al componente de fuerza centrípeta que actúa a lo largo del eje x (perpendicular al vector de fuerza gravitacional), la salida 102a puede corresponder al componente de fuerza centrípeta que actúa a lo largo del eje y (perpendicular al eje x y al vector de fuerza gravitacional), y la salida 104a puede corresponder al componente de fuerza centrípeta que actúa a lo largo del eje z (perpendicular al eje x y al eje y y paralelo al vector de fuerza gravitacional). En este ejemplo, la(s) salida(s) de la IMU (que consiste en tres salidas de los acelerómetros 100a, 102a, 104a) se muestra en la FIG. 1A, donde –durante aproximadamente 75 segundos– se hace girar la IMU en torno a un eje de rotación en una una velocidad rotacional variable con los ejes de medición de los acelerómetros situados en una orientación fija en relación al eje de rotación (por ejemplo, la IMU está situada tal como se muestra en la FIG. 2A y tal como se describirá a continuación). Pasados 75 segundos, mientras que la IMU sigue girando, se cambia la orientación de la IMU en aproximadamente 90° de manera que la orientación de los ejes de medición de los tres acelerómetros cambia (p. ej., la IMU se cambia de posición a la que se muestra en la FIG. 4 tal como se describirá a continuación). El cambio en la orientación de los ejes de medición resulta en un cambio abrupto en la fuerza experimentada por cada acelerómetro a lo largo de su eje de medición. Este cambio es mostrado en la FIG. 1A por el cambio en la salida de la aceleración 100a, 102a, 104a de cada acelerómetro. Por ejemplo, en las FIGS. 1A-1C, el acelerómetro que produce la salida 100 estaba alineado con el vector de fuerza gravitacional durante aproximadamente los primeros 75 segundos. Después de que se cambiara la orientación de la IMU pasados aproximadamente 75 segundos, el acelerómetro que produce la salida 102 se alinea con el vector de fuerza gravitacional. Esto se desprende de la FIG. 1B, donde la salida 100b es aproximadamente igual a la aceleración gravitacional (9.8 m/s²) durante los primeros 75 segundos, y la salida 102b es aproximadamente igual a la aceleración gravitacional tras los primeros 75 segundos.

30 **[0017]** Volviendo a la FIG. 1B, puesto que se conoce la velocidad de rotación y la orientación de los ejes de medición del acelerómetro en relación al eje de rotación, la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de los acelerómetros (p. ej., las fuerzas teóricas experimentadas por la IMU) respectivamente, pueden estimarse basándose en la fuerza centrípeta experimentada por la IMU. Las salidas previstas 100b, 102b, 104b de la IMU se muestran en la FIG. 1B. Se desprende de una comparación de las FIGS. 1A y 1B que la(s) salida(s) 100a,

102a, 104a de la IMU no coinciden con la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU. Las diferencias entre la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la FIG. 1B y la(s) salida(s) real(es) de la IMU 100a, 102a, 104a de la FIG. 1A se deben a los errores de medición inherentes al acelerómetro. Por lo general, los errores de medición son constantes para una temperatura determinada y pueden calibrarse para obtener salida(s) de la IMU mejorada(s). Los errores de medición más comunes son errores de factor de escala y sesgos que, en general, varían con la temperatura.

[0018] Al comparar las salidas de la IMU 100a, 102a, 104a con la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU 100b, 102b, 104b, es posible determinar el factor(es) de corrección que corrige los errores de medición (es decir, sesgos y factores de escala). El factor(es) de corrección puede incluir uno o más componentes específicos para cada salida de la IMU a fin de corregir los errores de medición. De este modo, tal como se muestra en la FIG. 1C, al aplicar los factores de corrección a la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a, se generan la(s) salida(s) de la IMU calibrada(s) 100c, 102c, 104c que más se ajusten a la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU 100b, 102b, 104b en comparación con la(s) salida(s) de la IMU sin calibrar 100a, 102a, 104a mostrada(s) en la FIG. 1A.

[0019] Volviendo a las FIGS. 2A y 2B, un aparato de calibración 10 incluye un buje rotacional 12, un buje de elevación 14 y un sistema de control 16. El aparato de calibración 10 puede incluir de forma adicional un servo de cardán de acimut 22, un servo de cardán de elevación 24, y una IMU 20. El buje rotacional 12, el buje de elevación 14, el sistema de control 16, y la IMU 20 pueden ser cada uno componentes físicos independientes o uno o más componentes físicos que incluyan una combinación de uno o más bujes de rotación 12, bujes de elevación 14, sistemas de control 16, e IMU 20. La IMU 20 puede incluir uno o más acelerómetros y giroscopios. El sistema de control 16 puede enviar órdenes de rotación al buje rotacional 12 y al buje de elevación 14 y recibir salidas de la IMU 20. Las órdenes de rotación pueden incluir instrucciones para rotar en torno a un primer eje 30 (p. ej., un eje de acimut) a una velocidad conocida, y rotar en torno a un segundo eje (p.ej., un eje de elevación) hacia una elevación conocida. La(s) salida(s) recibida(s) de la IMU 20 pueden incluir mediciones de fuerzas que actúan a lo largo de uno o más ejes de medición 34, 36, 38 de la IMU 20. Por ejemplo, como en las FIGS. 1A y 1B, si el buje rotacional 12 gira en torno al primer eje 30 en una velocidad de rotación dada y la IMU 20 incluye tres acelerómetros organizados de tal manera que los ejes de medición 34, 36, 38 de los acelerómetros son perpendiculares uno respecto al otro, la IMU 20 puede tener tres salidas, donde cada salida representa el componente de la fuerza centrípeta que actúa en la IMU 20 en torno a cada eje de medición 34, 36, 38 debido a la rotación de la IMU 20.

[0020] Tal como se muestra en la FIG. 3, los varios componentes del aparato de calibración 10 pueden estar interconectados. Por ejemplo, tal como se ha descrito anteriormente, el sistema de control 16 puede controlar la velocidad de rotación del buje rotacional 12 y la rotación del buje de elevación 14 en torno al segundo eje de rotación 32. El buje rotacional 12 también puede informar al sistema de control 16 en lo referente a la velocidad de rotación actual en torno al primer eje de rotación 30 y a cualquier otra información que necesite el sistema de control 16. De manera similar, el buje de elevación 14 puede informar al sistema de control 16 en lo referente a la posición actual de la IMU en torno al segundo eje de rotación 32 y a cualquier otra información necesaria. El controlador 16 también puede recibir la(s) salida(s) de la IMU y, como se describe a continuación, una temperatura actual de una cámara 52 o un sensor de temperatura 53. El sistema de control 16 puede determinar si la(s) salida(s) previstas de la IMU basadas en la ecuación centrípeta para la fuerza y la diferenciación de las salidas de la IMU que corresponden a las mediciones angulares.

[0021] Mientras que las FIGS. 2A y 2B se describen como vistas de un aparato de calibración 10, el aparato de calibración puede comprender una antena en suspensión cardán. Al incluir la IMU 20 en la antena en suspensión cardán, la antena puede calibrarse automáticamente sin el uso de sensores y/o *hardware* adicionales. Esto es, si la IMU 20 está integrada con un sistema de antena en suspensión cardán de manera que la IMU 20 pueda moverse libremente en torno al primer eje 30 (es decir, el eje de acimut) y el segundo eje 32 (es decir, el eje de elevación), se elimina la necesidad de una tabla de velocidad y del montaje de elementos fijos adicionales. De manera adicional, mientras que el aparato se describe a lo largo de la solicitud como un aparato de calibración 10, se aplica la misma descripción si el aparato de calibración es una antena en suspensión cardán.

[0022] El buje rotacional 12 está configurado para hacer girar la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30. Tal como lo entenderá un experto en la materia, el buje rotacional 12 puede comprender cualquier aparato adecuado para hacer girar la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30. Por ejemplo, el buje rotacional 12 puede incluir una base 40, un servo de cardán de acimut 22, y una plataforma 42. La plataforma 42 puede montarse giratoriamente a la base 40 por el servo de cardán de acimut 22, de manera que la plataforma 42 gire en torno al primer eje 30 en el servo de cardán de acimut 22. Tal como se muestra en la FIG. 3, el buje rotacional 12 puede hacer girar la plataforma en torno al primer eje 30 a una velocidad de rotación conocida especificada por el sistema de control 16. El buje rotacional 12 puede informar al sistema de control 16 en relación con una velocidad de rotación actual de la plataforma 12 en torno al primer eje de rotación 30. El eje de rotación 12 puede incluir de manera adicional un sensor que mide la velocidad de rotación actual de la IMU y los brazos de soporte 44 que están unidos al buje de elevación 14.

[0023] El buje de elevación 14 está configurado para hacer girar la IMU 20 en torno un segundo eje de rotación 32 perpendicular al primer eje de rotación 30. La orientación de uno o más ejes de medición de la IMU 34, 36, 38

en relación con el primer eje 30 puede controlarse mediante la rotación de la IMU 20 en torno al segundo eje 32. Por ejemplo, la orientación de los ejes de medición de la IMU 34, 36, 38 en relación con el primer eje de rotación 30 se muestran en la FIG. 2A. En la FIG. 4, la orientación de los ejes de medición de la IMU 34, 36, 38 en relación con el primer eje de rotación 30 ha cambiado debido a la rotación de la IMU 20 en torno al segundo eje
5 de rotación 32. De este modo, al cambiar la orientación del uno o más ejes de medición de la IMU 34, 36, 38 en relación con el primer eje 30 antes de que o mientras la IMU 20 gira en torno al primer eje de rotación 30, el buje de elevación 14 altera las fuerzas que actúan a lo largo de uno o más ejes de medición 34, 36, 38 de la IMU 20.

[0024] Tal como lo entenderá un experto en la materia, el buje de elevación 14 puede comprender cualquier aparato adecuado para hacer girar la IMU 20 en torno al segundo eje de rotación 32. Por ejemplo, el buje de elevación 14 puede incluir un elemento de soporte 46 y un servo de cardán de elevación 24. El elemento de soporte 46 puede estar montado giratoriamente en el buje rotacional 12 por el servo de cardán de elevación 24, de manera que el elemento de soporte 46 rota en torno al segundo eje 32 del servo de cardán de elevación 24. El buje de elevación 14 puede incluir o soportar de manera adicional la IMU 20. Por ejemplo, en las FIGS. 2A y 2B, la IMU 20 está unida a y/o soportada en una superficie del elemento de soporte 46. El buje de elevación 14 puede hacer girar la IMU 20 en torno al segundo eje de rotación 32 hacia una elevación especificada por el sistema de control 16 (p. ej., la posición de la IMU 20 relativa al segundo eje 32 en la FIG. 2A corresponde a una elevación y la posición de la IMU 20 en la FIG. 4 corresponde a otra elevación). De esta forma, el sistema de control 16 puede controlar la orientación del uno o más ejes de medición de la IMU 34, 36, 38 en relación con el primer eje de rotación 30. Tal como se muestra en la FIG. 3, el buje de elevación 14 puede informar al sistema de control 16 en relación con una elevación actual de la IMU 20.
10
15
20

[0025] El sistema de control 16 está configurado, en combinación con el buje de rotación 12 y el buje de elevación 14, para hacer girar la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30 a una velocidad conocida de rotación con la IMU 20 situada en una elevación específica en relación con el segundo eje de rotación. A fin de calibrar la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a, la IMU 20 se hace girar en torno al primer eje de rotación 30 en la primera elevación (p.ej., FIG. 2A) y en una segunda elevación diferente (p.ej., FIG. 4). Basándose en la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a durante la rotación en torno al primer eje 30 (1) en la primera elevación y (2) en la segunda elevación diferente, el sistema de control 16 determina el factor(es) de corrección de la IMU para calibrar la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a. El sistema de control 16 puede configurarse para determinar el factor(es) de corrección comparando la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a en la primera elevación y la segunda elevación con una(s) salida(s) prevista(s) de la IMU en la primera elevación y la segunda elevación. La(s) salida(s) prevista(s) pueden basarse en la velocidad de rotación conocida de la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30 y la elevación conocida de la IMU 20.
25
30

[0026] Tal como se ha descrito anteriormente, el sistema de control 16 puede determinar la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU basándose en la ecuación centrípeta para la fuerza y la diferenciación de las salidas de la IMU que corresponden a las mediciones angulares. En un modo de realización alternativo, el sistema de control 16 puede consultar la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU utilizando una tabla 54 almacenada en una memoria no transitoria en soporte informático 52. La memoria 52 puede almacenar adicionalmente instrucciones legibles por ordenador que son llevadas a cabo por el sistema de control 16. En otro modo de realización, p. ej., un modo de realización en el que el sistema de control 16 tenga un pequeño error del bucle de control, las órdenes proporcionadas al buje rotacional 12 pueden utilizarse junto con la ecuación centrípeta para la fuerza para determinar la(s) salida(s) de la IMU.
35
40

[0027] Tal como lo entenderá un experto en la materia, el sistema de control 16 puede tener muchas implementaciones. Por ejemplo, el sistema de control 16 puede incluir cualquier dispositivo adecuado o una combinación de dispositivos, como un circuito programable, un circuito integrado, circuitos de entrada y salida y de memoria, un circuito integrado para aplicaciones específicas, un microcontrolador, un dispositivo lógico programable complejo, otros circuitos programables, o similares. El sistema de control 16 también puede incluir un medio no transitorio legible por ordenador, como una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de solo lectura (ROM), una memoria de solo lectura programable borrable (EPROM o memoria flash), o cualquier otro medio adecuado. Las instrucciones para llevar a cabo el método que se describe a continuación pueden almacenarse en el buje no transitorio legible por ordenador y ejecutado por el sistema de control 16. Basándose en esta exposición, un experto en la materia entendería cómo programar el sistema de control 16 para que lleve a cabo los pasos descritos en el presente documento.
45
50

[0028] Mientras que el sistema de control 16 se muestra como parte del buje rotacional 12 en las FIGS. 2A y 2B, el sistema de control puede ser un componente separado del buje de elevación y/o puede formar parte de cualquier otro componente del aparato de calibración (p. ej., el buje de elevación).
55

[0029] Tal como se ha descrito previamente, la IMU 20 tiene uno o más ejes de medición 34, 36, 38 y produce una salida representativa de una orientación del uno o más ejes de medición. Por ejemplo, la IMU 20 puede comprender uno o más acelerómetros y giroscopios y puede producir una salida representativa de las fuerzas que actúan a lo largo del eje de medición de cada acelerómetro y giroscopio. A modo de ejemplo, si la IMU 20 incluye tres acelerómetros y tres giroscopios, la IMU generaría seis salidas, una por cada acelerómetro y una por cada giroscopio. Tal como lo entenderá un experto en la materia, la IMU 20 no se limita a acelerómetros y
60

giroscopios, sino que también puede incluir otros sensores (p. ej., otros sensores capaces de detectar fuerzas que actúan en la IMU 20 o la posición de la IMU 20). Del mismo modo, la IMU 20 no está limitada a un único componente, pero puede, por ejemplo, comprender sensores separados extendidos a lo largo de varias ubicaciones. Tal como se muestra en las FIGS. 2A y 2B, la IMU 20 puede instalarse en y/o puede estar soportada por el buje de elevación 14. De forma alternativa, la IMU 20 puede formar parte del buje de elevación 14.

[0030] Tal como se muestra en las FIGS. 2A y 2B, el aparato de calibración 10 puede incluir de manera adicional una cámara 52. El buje rotacional 12, el buje de elevación 14 y la IMU 20 pueden estar situados dentro de la cámara 52. La cámara 52 puede comprender una estructura aislada que incluye un elemento de calefacción y/o un elemento de refrigeración. Tal como lo entenderá un experto en la materia, la cámara 52 puede comprender cualquier dispositivo capaz de modular la temperatura de la IMU 20. La cámara 52 también puede incluir un controlador configurado para controlar la temperatura en la cámara 50. De manera alternativa, el sistema de control 16 puede controlar la temperatura en la cámara 52. Por ejemplo, el sistema de control 16 puede controlar la temperatura en la cámara 52 mediante la utilización de un sensor de temperatura 53 situado en un componente del aparato de calibración (p. ej., en la cámara térmica 52, la IMU 20, etc.). Al controlar la temperatura de la IMU durante la calibración, el aparato de calibración 10 puede determinar la relación entre la temperatura y el factor(es) de corrección y/o la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a. Por ejemplo, el sistema de control 16 puede estar configurado para establecer la temperatura de la cámara antes de determinar el factor(es) de corrección de la IMU. Al repetir este proceso, el sistema de control puede determinar y almacenar el factor(es) de corrección de la IMU para múltiples temperaturas diferentes. Tras determinar el factor(es) de corrección de la IMU para múltiples temperaturas diferentes, el sistema de control 16 puede determinar la relación entre la temperatura y la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a.

[0031] En un modo de realización que incluye una antena en suspensión cardán, si la antena en suspensión cardán está construida para encajar en la cámara térmica, puede llevarse a cabo una calibración a nivel del sistema completa. Una calibración precisa de la IMU a nivel del sistema permite la integración de sensores más rentables. Por ejemplo, en un modo de realización, la antena en suspensión cardán puede incluir la IMU 20, el buje rotacional 12, el buje de elevación 14, y el sistema de control 16. Por ejemplo, la IMU 20 puede estar instalada en una superficie (p. ej., la parte trasera) de la antena de placa plana que forma parte del buje de elevación 14 y puede rotar en torno al segundo eje de rotación 32.

[0032] Haciendo referencia a la FIG. 5, se muestra un diagrama de bloques que muestra un método para calibrar una IMU mediante la utilización de una velocidad rotacional como referencia. Las etapas del método descritas pueden ser llevadas a cabo y/o estar dirigidas solamente o en parte por el sistema de control 16.

[0033] En un bloque de decisión opcional 122, se lleva a cabo una revisión para determinar si se debe llevar a cabo una calibración de la temperatura. Si la calibración de la temperatura debe llevarse a cabo, se lleva a cabo otra revisión en el bloque de decisión opcional 124 para determinar si el barrido de temperatura se ha completado. Si el barrido de temperatura se ha completado, entonces el método se ha completado. Si el barrido de temperatura no se ha completado en el bloque de decisión opcional 124, entonces la temperatura se establece en un bloque de procesos opcional 126. La temperatura de medición puede ser una de una serie de temperaturas de medición para la que deben determinarse el factor(es) de corrección. Esto es, el método puede cambiar la temperatura actual entre una serie de temperaturas de medición y, para cada temperatura de medición, determinar el(los) factor(es) de corrección para calibrar la(s) salida(s) de la IMU en la temperatura de medición.

[0034] Tras establecer la temperatura de medición en el bloque de procesos opcional 126 o en el bloque de procesos opcional 122 si la calibración de la temperatura no se debe llevar a cabo, se lleva a cabo una revisión para determinar si el barrido del segundo eje se ha completado en el bloque de decisión 128. Por ejemplo, en otro modo de realización, la IMU 20 se gira a lo largo del segundo eje de rotación 32 hacia una primera elevación (p. ej., la posición de la IMU en la FIG. 2A en relación con el segundo eje 32) y después hacia una segunda elevación (p. ej., la posición de la IMU en la FIG. 4 en relación con el segundo eje 32) antes de que se haya completado el barrido del segundo eje. En este ejemplo, si la IMU 20 no se ha hecho girar aún a lo largo del segundo eje de rotación hacia la primera elevación y la segunda elevación, entonces el barrido del segundo eje no se ha completado. En este ejemplo, asumiendo que el método acaba de empezar, la IMU se haría girar a lo largo del segundo eje de rotación 32 hacia la primera elevación (FIG. 2A).

[0035] En el bloque de decisión 132, se lleva a cabo una revisión para determinar si se ha completado el barrido del primer eje. Por ejemplo, en un modo de realización del método, después de que la IMU se haya hecho girar en torno al segundo eje de rotación 32 hacia la primera elevación (FIG. 2A, la IMU se hace girar en torno al primer eje de rotación 30 a una velocidad de rotación conocida con la IMU 20 situada en la primera elevación relativa al segundo eje de rotación. En este ejemplo, si ya se ha hecho girar la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30 a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la primera elevación, el método volvería al bloque de decisión 128. Si aún no se ha hecho girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la primera elevación, entonces el método pasa al bloque de procesos 134.

[0036] En el bloque de procesos 134, se establece la velocidad de rotación de la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30. En el bloque de procesos opcional 136, el método estima la velocidad de rotación actual en torno al primer eje 30 y, tal como se muestra en el bloque de decisión 138 opcional, el método espera hasta que la velocidad de rotación en torno al primer eje haya alcanzado un estado estacionario antes de pasar al bloque de procesos 140.

[0037] Después del bloque de procesos 134 o del bloque de procesos opcional 138, se miden la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a. Después de la medición de la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a, la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a se almacenan de manera opcional en el bloque de procesos 141 y el método vuelve al bloque de decisión 132. La(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a pueden almacenarse en una memoria no transitoria legible por ordenador 52 separada de o que forme parte del sistema de control 16.

[0038] Si el barrido del primer eje se ha completado para la elevación dada, el procesamiento vuelve al bloque de decisión 128. En este ejemplo, si la(s) salida(s) de la IMU en la primera elevación se han recibido, pero la(s) salida(s) de la IMU en la segunda elevación aún no se ha recibido, el procesamiento pasa al bloque de procesos 130. En este ejemplo, se hace girar la IMU 20 en torno al segundo eje de rotación 32 hacia la segunda elevación (FIG. 4) en el bloque de procesos 130. A continuación, los pasos del método se repiten con la IMU 20 situada en la segunda elevación en relación con el segundo eje de rotación. Esto es, se hace girar la IMU 20 en torno al primer eje de rotación 30 a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la segunda elevación relativa al segundo eje de rotación 32.

[0039] Después de que se haya completado el barrido del segundo eje en el bloque de decisión 128, el procesamiento pasa al bloque de procesos 142 opcional. En el bloque de procesos 142 opcional, se lleva a cabo una revisión para determinar si se está llevando a cabo la calibración de la temperatura. Si se está llevando a cabo la calibración de la temperatura, el procesamiento pasa al bloque de decisión opcional 124. En el bloque de decisión 124 opcional, se lleva a cabo una revisión para determinar si se ha completado el barrido de la temperatura. Si el barrido de la temperatura aún no se ha completado, entonces el procesamiento pasa al bloque de procesos 126, en el que se establece una nueva temperatura. Después de que se haya completado el bloque de procesos opcional 126, el barrido del segundo eje y el barrido del primer eje se vuelven a completar en los bloques de decisión 128 y 132 respectivamente.

[0040] Después de que se haya completado el barrido del segundo eje en el bloque de decisión 128 o de que se haya completado el barrido de temperatura opcional en el bloque de decisión 124 opcional, el procesamiento pasa al bloque de procesos opcional 144. En el bloque de procesos opcional 114, se determinan la(s) salida(s) de la IMU 100b, 102b, 104b. Tal como lo entendería un experto en la materia, la determinación de la(s) salida(s) previstas de la IMU pueden determinarse mediante la utilización de cualquier método adecuado. Por ejemplo, la determinación de la(s) salida(s) prevista(s) puede incluir la consulta de la(s) salida(s) prevista(s) en una tabla 54 con base en una velocidad media de rotación y la orientación del eje de medición en relación con el eje de rotación. De manera alternativa, determinar la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU puede incluir el cálculo de la(s) salida(s) prevista(s) con base en la fuerza centrípeta que actúa en la IMU, la orientación del uno o más ejes de medición de la IMU en relación con el primer eje de rotación 30, y la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje de rotación 30.

[0041] La determinación de la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU en el bloque de procesos 144 opcional puede depender del tipo de sensores de la IMU. Por ejemplo, si la IMU incluye uno o más acelerómetros y uno o más giroscopios, determinar la(s) salida(s) prevista(s) puede incluir determinar por separado de la salida de cada acelerómetro y cada giroscopio. La determinación de la(s) salida(s) prevista(s) de los giroscopios puede basarse en la velocidad de rotación en torno al primer eje de rotación 30 y la orientación del eje de medición para la salida de cada giroscopio relativa al primer eje de rotación. La determinación de la(s) salida(s) prevista(s) de los acelerómetros puede basarse en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU. La fuerza centrípeta experimentada por la IMU puede depender de la ubicación de la IMU relativa al primer eje. Por ejemplo, como se muestra en las FIGS. 2A y 2B, la ubicación de la IMU relativa al primer eje puede ser igual a la longitud de los brazos de soporte 44. La ubicación de la IMU relativa al primer eje puede depender adicionalmente de una posición de la IMU en torno al segundo eje de rotación. Esto es, si la IMU está instalada a una distancia desfasada del segundo eje de rotación 32, la ubicación de la IMU relativa al primer eje puede no ser igual a la longitud de los brazos de soporte 44. Por ejemplo, como se muestra en las FIGS. 2A y 2B, la longitud de un vector de la fuerza centrípeta 50 no es igual a la longitud de los brazos de soporte 44, sino que depende también del posicionamiento de la IMU a lo largo del segundo eje de rotación y la posición de la IMU relativa al segundo eje de rotación (debido a la rotación de la IMU en torno al segundo eje de rotación). En este ejemplo, la fuerza centrípeta que actúa en la IMU 20 puede ser proporcional a la velocidad de rotación multiplicada por la distancia de la IMU hacia el primer eje de rotación 30.

[0042] En el bloque de procesos 146, el método determina –basándose en la(s) salida(s) de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la(s) salida(s) de la IMU durante la rotación en la segunda elevación– un factor(es) de corrección de la IMU para calibrar la(s) salida(s) de la IMU. El factor(es) de corrección de la IMU pueden incluir uno o más sesgos para corregir errores aditivos (es decir, errores de sesgo) en la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a y uno o más factores de escala para corregir errores multiplicativos

(es decir, errores de factor de escala) en la(s) salida(s) de la IMU 100a, 102a, 104a. Por ejemplo, el factor(es) de corrección puede incluir un sesgo y un factor de escala para cada acelerómetro y giroscopio de la IMU 20. Tal como lo entenderá un experto en la materia, el factor(es) de corrección no están limitados a dos factores para cada sensor en la IMU 20, sino que puede incluir cualquier número de términos.

5 **[0043]** Determinar el número de factor(es) de corrección de la IMU puede incluir la comparación de la(s) salida(s) de la IMU en la primera elevación y la(s) salida(s) de la IMU en la segunda elevación con la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU en la primera elevación y la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU en la segunda elevación. Por ejemplo, cada una de la(s) salida(s) de la IMU puede comprender un punto de datos igual a una media de la salida de la IMU a lo largo de un periodo de tiempo durante el cual la IMU rotaba en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida y a una elevación constante. En este ejemplo, el método podría
10 comparar cada media de la salida de la IMU con una salida prevista para determinar un factor de corrección que incluya un sesgo y un factor de escala. Tal como se ha descrito anteriormente, la(s) salida(s) prevista(s) pueden estar basadas en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje y la elevación conocida de la IMU.

15 **[0044]** Tal como se muestra en la FIG. 5, el factor(es) de corrección de la IMU pueden determinarse fuera de línea. Esto es, el factor(es) de corrección de la IMU puede determinarse después de que se haya completado el barrido del segundo eje. Cuando se determina fuera de línea, el factor(es) de corrección puede determinarse mediante la utilización de mínimos cuadrados por lotes o métodos similares. De manera alternativa, el factor(es) de corrección de la IMU puede estimarse y refinarse continuamente mediante la utilización de varios métodos de estimación de parámetros (p. ej., mínimos cuadrados recursivos, otros métodos de estimación no lineales que empleen soluciones minimax, etc.), Una vez completada la determinación de el factor(es) de corrección de la IMU, el factor(es) de corrección de la IMU pueden almacenarse en una EPROM o una memoria flash.

[0045] En un modo de realización alternativo mostrado en las FIGS. 1A-1C, a diferencia del uso de un único punto de datos, el método utiliza una serie de puntos de datos para cada salida de la IMU que representa la salida de la IMU en una serie de puntos temporales. En este modo de realización, tal como se muestra en la FIG. 1A, cada salida de la IMU representa una serie de puntos durante un periodo de tiempo determinado. En este ejemplo, si la velocidad de rotación y la orientación de la IMU en relación con el primer eje fuese constante, entonces la(s) salida(s) prevista(s) también deberían ser constantes. En el ejemplo que se muestra en las FIGS. 1A-1C, sin embargo, la velocidad de rotación varió ligeramente con el tiempo y, por tanto, el resultado previsto también varía ligeramente con el tiempo. En este modo de realización, el factor de corrección para cada salida de la IMU puede incluir, como en el ejemplo anterior, un sesgo y un factor de escala. El mismo método puede utilizarse para determinar el factor(es) de corrección para una salida de la IMU que comprenda un único punto de datos y una salida de la IMU que comprenda una serie de puntos de datos.

[0046] Tal como se muestra en las figuras 1A-1C, aplicar el factor(es) de corrección de la IMU a la(s) salida(s) 100a, 102a, 104a de la IMU calibra la(s) salida(s) de la IMU de manera que la diferencia entre la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU y la(s) salida(s) calibrada(s) 100c, 102c, 104c de la IMU sea menor que la diferencia entre la(s) salida(s) 100a, 102a, 104a de la IMU y la(s) salida(s) calibrada(s) 100c, 102c, 104c de la IMU. Tal como lo entenderá un experto en la materia, el factor de corrección puede determinarse de manera que:
35 (1) la(s) salida(s) calibrada(s) 100c, 102c, 104c de la IMU es aproximadamente igual a la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU o (2) la varianza, la desviación estándar y/o el error entre la(s) salida(s) calibrada(s) 100c, 102c, 104c de la IMU y la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU es menor que la varianza, la desviación estándar y/o el error entre la(s) salida(s) 100a, 102a, 104a de la IMU y la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU. Tal como lo entenderá un experto en la materia, el factor(es) de corrección de la IMU puede determinarse ajustando un polinomio racional a la salida de la IMU. De manera alternativa, el factor(es) de corrección puede determinarse para cada salida de la IMU utilizando expresiones algebraicas. Por ejemplo, la siguiente expresión puede utilizarse para hallar un factor de corrección:
40
45

$$\min_{a_N, a_{N-1}, \dots, a_0} || y - (a_N \omega^N + a_{N-1} \omega^{N-1} + \dots + a_1 \omega + a_0) ||_2$$

donde, a_N, a_{N-1}, \dots, a_0 son los coeficientes de un polinomio de calibración de grado n (el factor(es) de corrección de la IMU), y es la señal de referencia para la calibración (la salida prevista de la IMU), w es la señal de salida de la IMU (sin calibrar), y $|| \cdot ||_2$ designa la norma-2 utilizada para encontrar coeficientes polinómicos óptimos a_k , donde $k = 0, 1, \dots, N$.

[0047] Por ejemplo, a fin de calibrar una salida de la IMU que corresponda a las mediciones del acelerómetro, la salida prevista para la IMU puede derivarse de las fuerzas centrípetas experimentadas por la IMU. De manera adicional, a fin de calibrar una salida de la IMU que corresponda a las mediciones del giroscopio, la salida prevista para la IMU puede estar basada en las velocidades angulares medidas por el aparato de calibración 10. Por ejemplo, las velocidades angulares pueden derivarse de la diferenciación de las salidas de la IMU o de la información directa de un tacómetro. Si la calibración se lleva a cabo en lo que respecta a la temperatura, entonces cada factor de corrección de la IMU (a_k en la ecuación anterior) dependerá de la temperatura y la

ecuación de optimización está escrita en función de un polinomio matricial de dos dimensiones con un tamaño de N por M , donde M es la dimensión de un polinomio utilizado para compensar la variación de temperatura.

5 **[0048]** En el bloque de procesos opcional 148, se almacena el factor(es) de corrección. Por ejemplo, el factor(es) de corrección pueden almacenarse en un medio no transitorio legible por ordenador separado de o que forme parte del sistema de control 16.

[0049] Los pasos del método se muestran como operaciones secuenciales, pero los pasos no necesitan llevarse a cabo en el orden descrito. Por ejemplo, cuando se lleve a cabo la calibración de la temperatura, el factor(es) de corrección de la IMU podrá determinarse para una temperatura de medición antes de que se empiece otro barrido del segundo eje para otra temperatura de medición.

10 **[0050]** Tal como se ha descrito anteriormente en referencia al bloque de procesos opcional 144, la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU se determina sin hacer referencia a la gravedad. Tal como lo entenderá un experto en la materia, sin embargo, la gravedad puede utilizarse como entrada opcional para el método de calibración al determinar la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU 100b, 102b, 104b. Esto es, la(s) salida(s) prevista(s) 100b, 102b, 104b de la IMU pueden determinarse utilizando la gravedad además de la velocidad de rotación conocida y la orientación conocida del eje de medición de la IMU relativo al primer eje de rotación 30. Por ejemplo, la gravedad puede utilizarse para validar los resultados de la calibración. Esto es, tal como se muestra en la FIG. 1C, si un acelerómetro se alinea con el vector de fuerza gravitatoria y se calibra correctamente, la salida (la salida 100c para los primeros 75 segundos y la salida 102c tras los primeros 75 segundos) del acelerómetro debería ser aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$.

20 **[0051]** Tal como se ha descrito anteriormente haciendo referencia a los bloques opcionales 122, 124 y 126, pueden determinarse el factor(es) de corrección para múltiples temperaturas diferentes. De este modo, puede determinarse la relación entre la temperatura y la(s) salida(s) de la IMU (p. ej., las salidas de los giroscopios y los acelerómetros). Por ejemplo, la relación puede determinarse estimando los coeficientes de un polinomio racional de grado n utilizando la temperatura y al menos una de la(s) salida(s) de la IMU, la(s) salida(s) prevista(s) de la IMU, y el factor(es) de corrección. El polinomio estimado puede utilizarse para corregir simultáneamente la variación de la temperatura y términos de error de orden superior (es decir, que no están limitados a correcciones polinómicas de primer orden para errores de factor de escala y de sesgo). Los coeficientes polinómicos pueden estimarse de forma recursiva o utilizando cualquier otro método adecuado (mínimos cuadrados por lotes) tal como lo entendería un experto en la materia. El método no se limita a estimar coeficientes de polinomios. En su lugar, tal como lo entendería un experto en la materia, cualquier expresión algebraica adecuada puede utilizarse sin una pérdida de generalidad.

30 **[0052]** En un modo de realización, en lugar de poner el aparato de calibración o el satélite en suspensión cardán en una cámara térmica 52, el aparato de calibración y/o el satélite en suspensión cardán pueden incluir un sensor de temperatura 53. El sensor de temperatura 53 puede ser un componente de y estar unido al aparato de calibración o al satélite en suspensión cardán. De manera alternativa, el sensor de temperatura puede estar separado físicamente del aparato de calibración o del satélite en suspensión cardán, pero puede estar acoplado comunicativamente (p. ej., por cable o de manera inalámbrica) al aparato de calibración o al satélite en suspensión cardán. El sistema de control puede configurarse para asociar el factor(es) de corrección almacenado con una temperatura actual medida utilizando el sensor de temperatura. Al calibrar la antena en suspensión cardán cuando la IMU 20 experimenta las nuevas temperaturas, puede grabarse el factor(es) de corrección y/o la(s) salida(s) de la antena en suspensión cardán, permitiendo una calibración a nivel del sistema de la antena en suspensión cardán sin necesitar una cámara térmica 52.

35 **[0053]** Aunque se ha mostrado y descrito la invención con respecto a un determinado modo de realización o modos de realización, a otros expertos en la materia se les pueden ocurrir alteraciones y modificaciones equivalentes con la lectura y la comprensión de esta memoria y de los dibujos anexos. Con respecto especialmente a las varias funciones desempeñadas por los elementos descritos anteriormente (componentes, montajes, dispositivos, composiciones, etc.), los términos (incluyendo una referencia a un "medio") utilizados para describir tales elementos están destinados a corresponder, a menos que se indique lo contrario, a cualquier elemento que desempeñe la función especificada del elemento descrito (es decir, que sea funcionalmente equivalente), incluso aunque no sea estructuralmente equivalente a la estructura expuesta que desempeña la función en el modo o modos de realización de ejemplo de la invención expuestos en el presente documento.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de calibración (10) para calibrar una unidad de medición inercial, IMU (20), que presenta un eje de medición (34) y que produce una salida representativa de una orientación del eje de medición, comprendiendo el aparato de calibración:
 - 5 un buje rotacional (12) configurado para hacer girar la IMU en torno a un primer eje (30) de rotación, y **caracterizado por:**
 - un buje de elevación (14) configurado para hacer girar la IMU en torno un segundo eje (32) de rotación perpendicular al primer eje de rotación, siendo la orientación del eje de medición relativa al primer eje controlable por la rotación de la IMU en torno al segundo eje; y
 - 10 un sistema de control (16) configurado en combinación con el buje rotacional y el buje de elevación para:
 - hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una primera elevación relativa al segundo eje de rotación;
 - hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en una segunda elevación relativa al segundo eje de rotación, siendo la segunda elevación distinta a la primera elevación; y
 - basándose en la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la segunda elevación, determinar un factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU.
- 20 2. El aparato de calibración (10) de la reivindicación 1, en el que el sistema de control (16) está configurado para determinar el factor de corrección de la IMU comparando la salida de la IMU (20) en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación con una salida prevista de la IMU en la primera elevación y una salida prevista de la IMU en la segunda elevación, basándose la salida prevista en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje (30) y la elevación conocida de la IMU en relación con el segundo eje (32).
- 25 3. El aparato de calibración (10) de la reivindicación 2, en el que aplicar el factor de corrección de la IMU a la salida de la IMU (20) en una primera elevación y la salida de la IMU en una segunda elevación calibra la salida de la IMU de manera que:
 - 30 la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida calibrada de la IMU en la primera elevación es menor que la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la primera elevación; y
 - la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación es menor que la diferencia entre la salida de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación.
- 35 4. El aparato de calibración (10) según cualquiera de las reivindicaciones 2-3, en el que la IMU (20) incluye uno o más giroscopios y uno o más acelerómetros y determinar la salida prevista de la IMU incluye de manera adicional:
 - 40 determinar una salida prevista del uno o más acelerómetros con base en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU; y
 - determinar una salida prevista del uno o más giroscopios basándose en la velocidad de rotación conocida.
5. El aparato de calibración de la reivindicación 4, en el que la fuerza centrípeta experimentada por la IMU (20) depende de una ubicación de la IMU relativa al primer eje y la ubicación de la IMU relativa al primer eje depende adicionalmente de una posición de la IMU en torno al segundo eje de rotación.
- 45 6. El aparato de calibración (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, que comprende además una cámara (52), donde el sistema de control (16) está configurado para controlar la temperatura en la cámara, y el buje rotacional (12), buje de elevación (14), e IMU (20) están situados dentro de la cámara.
7. El aparato de calibración (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en el que el factor de corrección de la IMU se determina ajustando un polinomio racional a la salida real de la IMU (20).

8. Una antena en suspensión cardán autocalibrable configurada para calibrar una unidad de medición inercial, IMU (20), comprendiendo la antena en suspensión cardán el aparato de calibración de cualquier reivindicación anterior.
- 5 9. Un método para calibrar una unidad de medición inercial, IMU (20), que presenta un eje de medición (34) y que produce una salida representativa de una orientación del eje de medición, comprendiendo el método:
- 10 hacer girar la IMU en torno a un primer eje (30) de rotación y **caracterizado por:** hacer girar la IMU en torno a un segundo eje (32) de rotación perpendicular al primer eje de rotación, siendo la orientación del eje de medición relativa a un primer eje (30) de rotación controlable por la rotación de la IMU en torno al segundo eje; hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la primera elevación en relación con el segundo eje de rotación;
- 15 hacer girar la IMU a lo largo del segundo eje de rotación hacia una segunda elevación;
- hacer girar la IMU en torno al primer eje de rotación a una velocidad de rotación conocida con la IMU situada en la segunda elevación relativa al segundo eje de rotación;
- 15 determinar, con base en la salida de la IMU durante la rotación de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU durante la rotación en la segunda elevación, un factor de corrección de la IMU para calibrar la salida de la IMU.
- 20 10. El método de la reivindicación 9, en el que un sistema de control (16) está configurado para determinar el factor de corrección de la IMU al comparar la salida de la IMU (20) en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación con una salida prevista de la IMU en la primera elevación y una salida prevista de la IMU en la segunda elevación, estando basada la salida prevista en la velocidad de rotación conocida de la IMU en torno al primer eje (30) y la elevación conocida de la IMU relativa al segundo eje (32).
- 25 11. El método según cualquiera de las reivindicaciones 9-10, en el que la aplicación del factor de corrección de la IMU a la salida de la IMU (2) en la primera elevación y la salida de la IMU en la segunda elevación calibra la salida de la IMU de manera que:
- 25 la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida calibrada de la IMU en la primera elevación es menor que la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la primera elevación y la salida de la IMU en la primera elevación; y
- 30 la diferencia entre la salida prevista de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación es menor que la diferencia entre la salida de la IMU en la segunda elevación y la salida calibrada de la IMU en la segunda elevación.
- 35 12. El método según cualquiera de las reivindicaciones 9-11, en el que la IMU (20) incluye uno o más giroscopios y uno o más acelerómetros y determinar la salida prevista de la IMU incluye además:
- determinar una salida prevista del uno o más acelerómetros basándose en una fuerza centrípeta estimada experimentada por la IMU; y
- determinar una salida prevista del uno o más giroscopios basándose en la velocidad de rotación conocida.

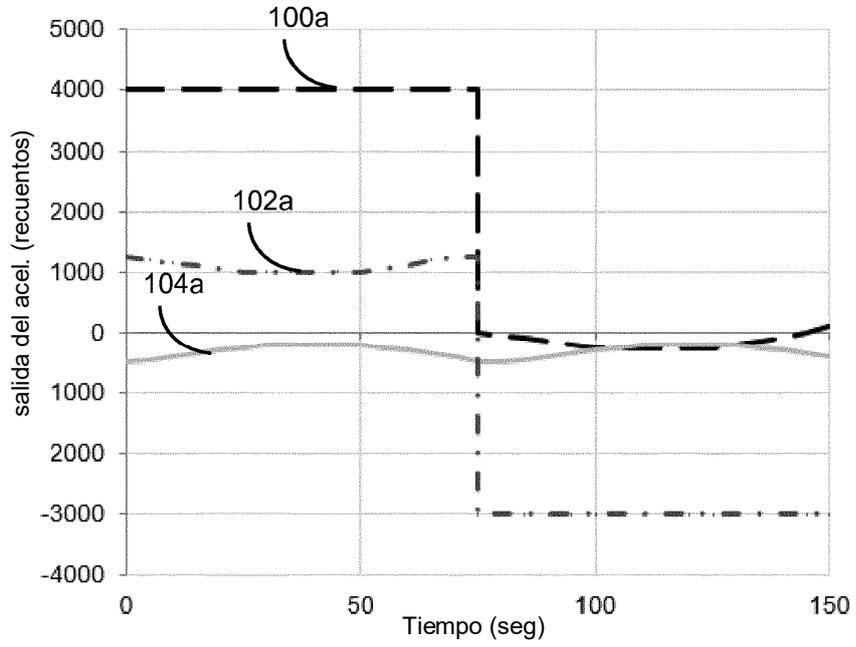


FIG. 1A

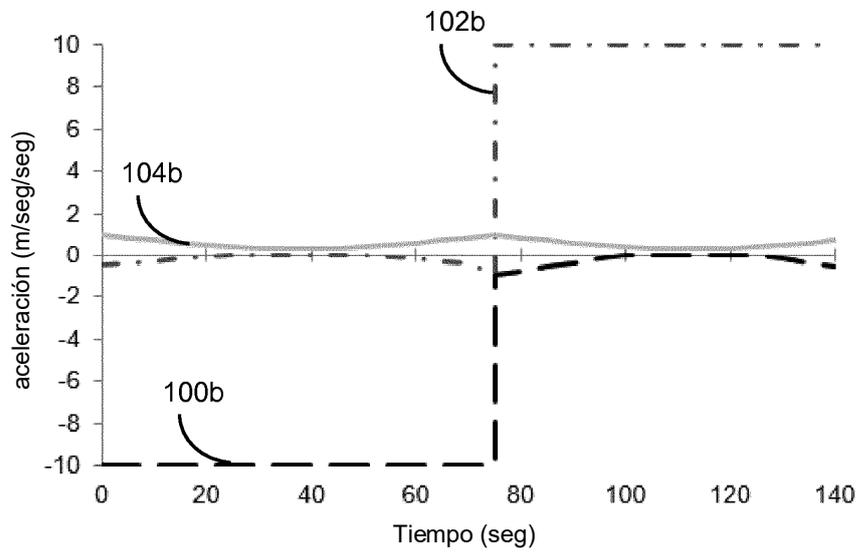


FIG. 1B

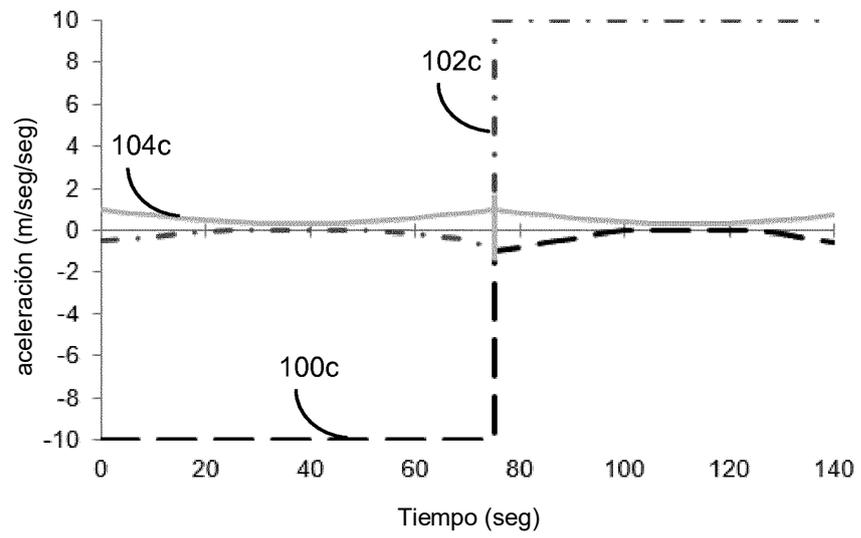


FIG. 1C

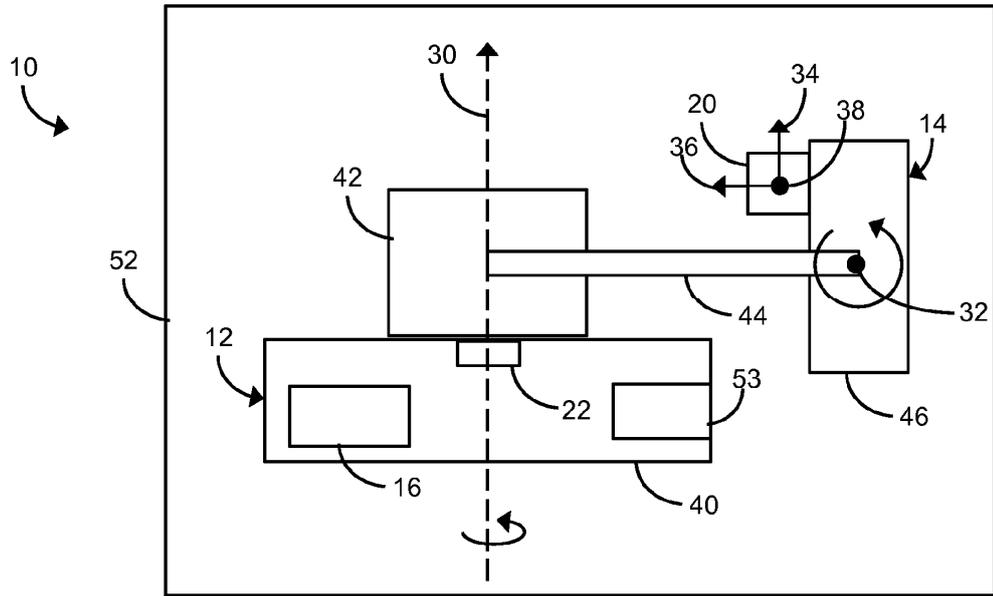


FIG. 2A

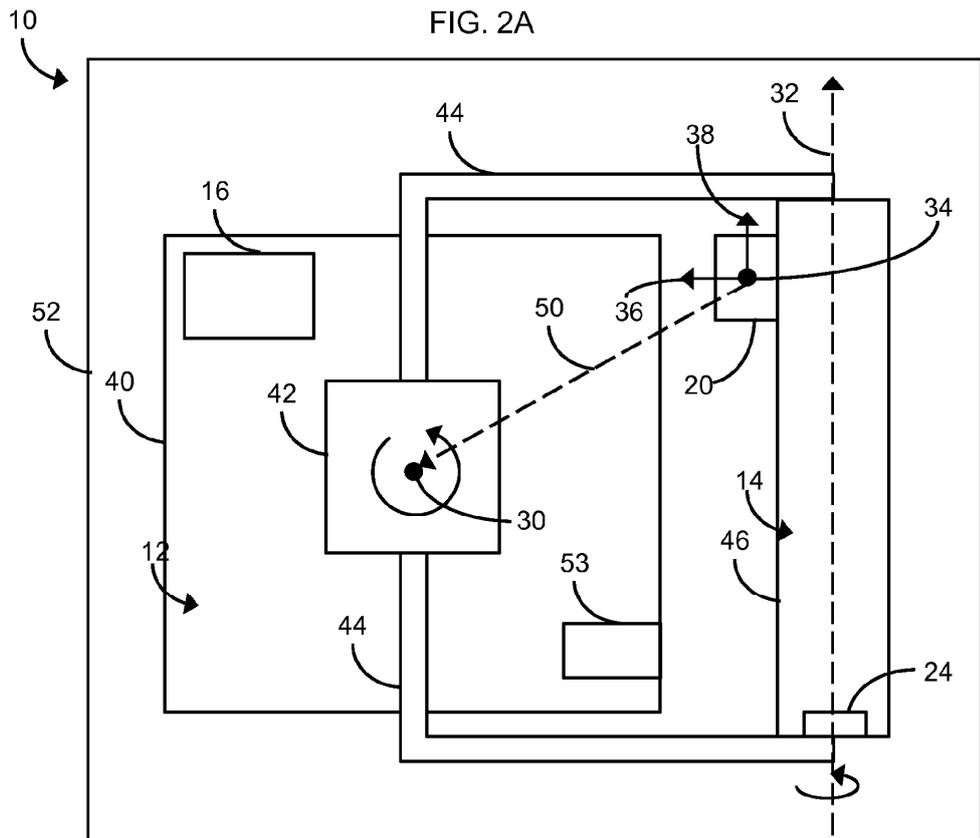


FIG. 2B

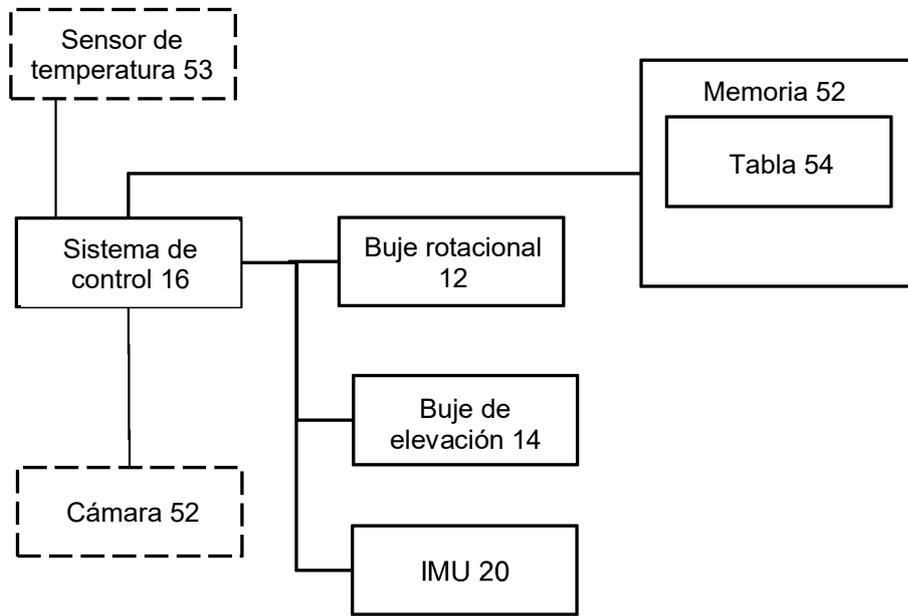


FIG. 3

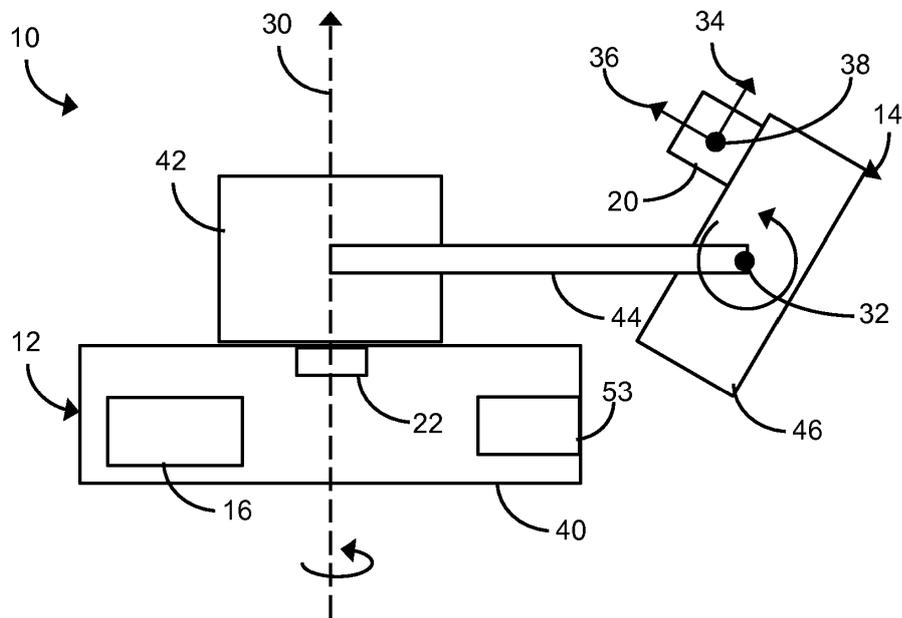


FIG. 4

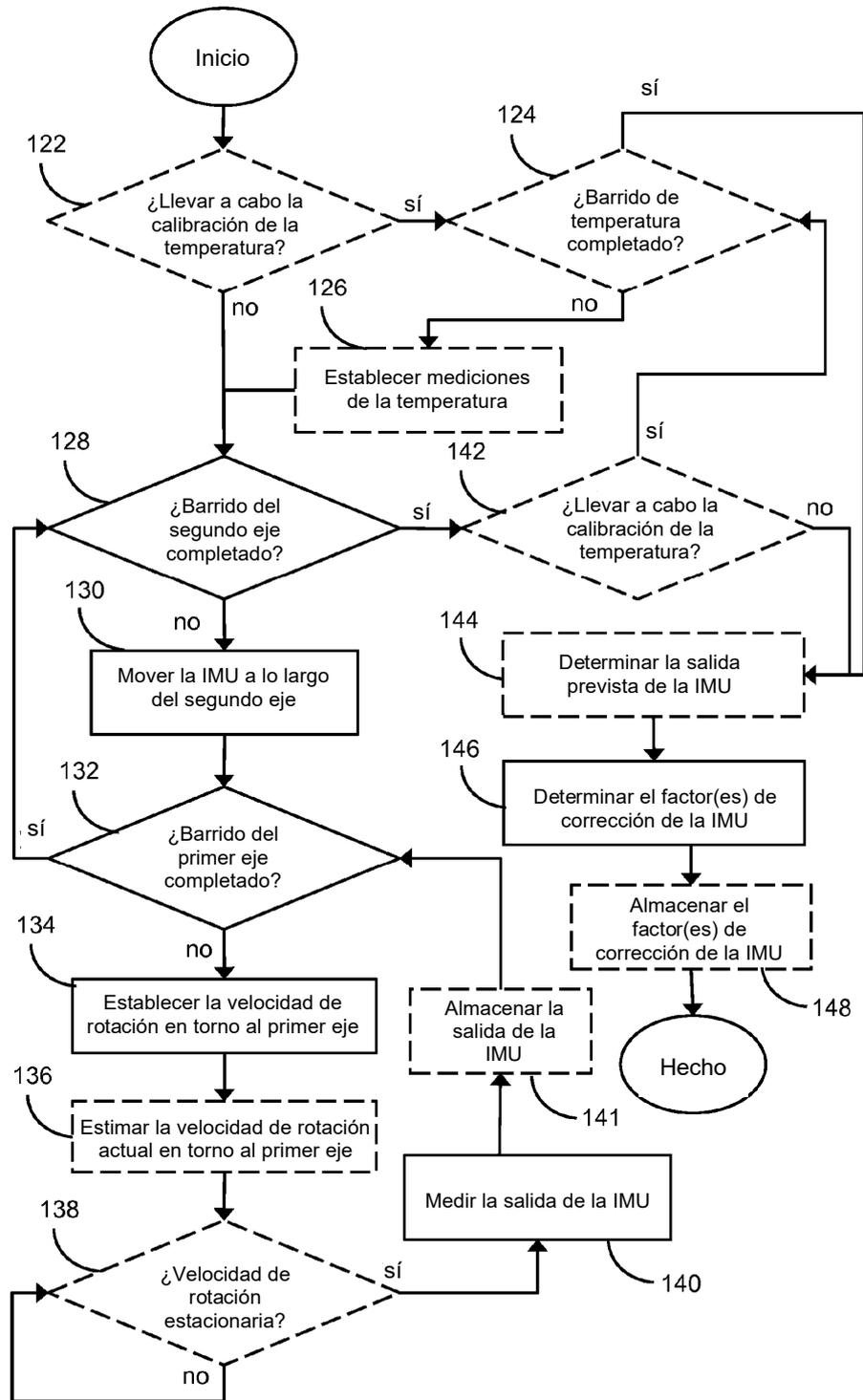


FIG. 5