

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 774 781**

51 Int. Cl.:

G01C 19/56 (2012.01)

G01C 19/5776 (2012.01)

G01C 25/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.01.2013 E 13150472 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020 EP 2615416**

54 Título: **Compensación de sesgo electrónica para un giroscopio**

30 Prioridad:

11.01.2012 US 201213348263

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

22.07.2020

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**LIU, YONG y
CHALLONER, ANTHONY DORIAN**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 774 781 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

Compensación de sesgo electrónica para un giroscopio

Antecedentes

5 La presente divulgación se refiere de manera general a giroscopios vibratorios y, en particular, a un método y a un aparato para compensar electrónicamente el sesgo en giroscopios vibratorios.

10 Se usan giroscopios para medir y/o mantener la orientación. Tal como se usa en el presente documento, un "giroscopio" es un sensor configurado para detectar y medir el movimiento angular de un objeto con respecto a un sistema de referencia inercial. Además, tal como se usa en el presente documento, un "sistema de referencia inercial" puede ser un sistema de coordenadas o conjunto de ejes que no tiene aceleración. Dicho de otro modo, un sistema de referencia inercial es un sistema de referencia en el que se cumple la primera ley del movimiento de Newton. La primera ley del movimiento de Newton establece que la velocidad de un cuerpo permanece constante a menos que actúe una fuerza externa sobre el cuerpo.

15 Un giroscopio vibratorio de Coriolis (CVG) está configurado para accionarse para vibrar a lo largo de un primer eje. La vibración a lo largo del primer eje mientras está haciéndose rotar el giroscopio vibratorio de Coriolis alrededor de un eje de entrada fijo genera una fuerza de Coriolis que induce vibraciones a lo largo de un segundo eje. Estas vibraciones pueden medirse y usarse para determinar una velocidad angular para la rotación del giroscopio vibratorio de Coriolis alrededor del eje de entrada fijo.

20 Sin embargo, el sesgo puede contribuir a las medidas de las vibraciones. El sesgo puede ser el error en las medidas debido a factores tales como, por ejemplo, sin limitación, temperatura, faltas de sistematicidad de piezas y otros factores adecuados. La calibración de estos giroscopios durante la fabricación de los giroscopios puede ser menos precisa de lo deseado.

25 Por ejemplo, la calibración de estos giroscopios durante procedimientos de fabricación puede usar datos de prueba en comparación con datos sustancialmente en tiempo real. En particular, estas técnicas de calibración pueden no tener en cuenta los efectos de la temperatura en el entorno en el que está haciéndose funcionar un giroscopio y/o faltas de sistematicidad que pueden desarrollarse a lo largo del tiempo desde el momento en el que se fabricó el giroscopio. Además, puede que algunos sistemas actualmente disponibles para compensar este sesgo no puedan reducir el sesgo de estas medidas de vibración hasta dentro de tolerancias seleccionadas.

Por tanto, sería deseable tener un método y un aparato que tengan en cuenta una o más de las cuestiones comentadas anteriormente así como posiblemente otras cuestiones.

30 El documento US5969225 comenta un aparato de detección de la velocidad angular que incluye medios de generación de vibración correctora para hacer que el cuerpo vibratorio vibre para la corrección en la dirección del eje de detección.

El documento US2011/226056 comenta un método para la simulación del comportamiento operativo de un giroscopio vibratorio de Coriolis Coriolis, y en particular un método para estimar la influencia y/o magnitud de términos de sesgo en la salida de un giroscopio vibratorio de Coriolis.

35 **Sumario**

La presente invención proporciona un método según la reivindicación 1 y un aparato según la reivindicación 9. Además, en las reivindicaciones dependientes se exponen características opcionales de la presente invención.

40 Las características, funciones y beneficios pueden lograrse independientemente en diversas realizaciones de la presente divulgación o pueden combinarse en aún otras realizaciones en las que pueden observarse detalles adicionales con referencia a la siguiente descripción y dibujos.

Breve descripción de los dibujos

45 Las características de las realizaciones ilustrativas se exponen en las reivindicaciones adjuntas. Sin embargo, las realizaciones ilustrativas, así como un modo preferido de uso, objetivos adicionales y características de los mismos se entenderán mejor mediante referencia a la siguiente descripción detallada de una realización ilustrativa de la presente divulgación cuando se lea junto con los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una ilustración de un entorno de compensación de sesgo en forma de un diagrama de bloques según una realización ilustrativa;

la figura 2 es una ilustración de un modelo funcional para un giroscopio según una realización ilustrativa;

la figura 3 es una ilustración de la órbita de un elemento para un giroscopio según una realización ilustrativa;

la figura 4 es una ilustración de un procedimiento para compensar el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa;

la figura 5 es una ilustración de un procedimiento para identificar un conjunto de ecuaciones para el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa;

5 la figura 6 es una ilustración de un procedimiento para identificar un conjunto de valores para un conjunto de parámetros en un conjunto de ecuaciones para el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa; y

la figura 7 es una ilustración de un sistema de procesamiento de datos según una realización ilustrativa.

Descripción detallada

10 Las diferentes realizaciones ilustrativas reconocen y tienen en cuenta diferentes consideraciones. Por ejemplo, las diferentes realizaciones ilustrativas reconocen y tienen en cuenta que algunos métodos actualmente disponibles para compensar el sesgo de un giroscopio pueden usar un sistema mecánico para estimar el sesgo del giroscopio. En algunos casos, este sistema mecánico puede usarse para hacer funcionar el giroscopio y rotar el giroscopio a una velocidad angular. Además, este tipo de sistema mecánico puede introducir factores contribuyentes adicionales al sesgo del giroscopio. Por consiguiente, puede que estos tipos de sistemas no puedan estimar el sesgo del giroscopio dentro de un nivel de precisión deseado.

15 Por tanto, las diferentes realizaciones ilustrativas proporcionan un método y un aparato para compensar electrónicamente el sesgo de un giroscopio. En una realización ilustrativa, se proporciona un método para compensar el sesgo de un giroscopio. Se generan medidas de sesgo para una pluralidad de ángulos de accionamiento usando el giroscopio. Se identifica un conjunto de ecuaciones para el sesgo del giroscopio usando un modelo para el movimiento del giroscopio. El conjunto de ecuaciones incluye un conjunto de parámetros para el sesgo del giroscopio. Se identifica un conjunto de valores para el conjunto de parámetros usando las medidas de sesgo y el conjunto de ecuaciones.

20 Haciendo ahora referencia a la figura 1, se representa una ilustración de un entorno de compensación de sesgo en forma de un diagrama de bloques según una realización ilustrativa. En estos ejemplos ilustrativos, el entorno 100 de compensación de sesgo es un ejemplo de un entorno en el que pueden implementarse las diferentes realizaciones ilustrativas para compensar el sesgo 101 del giroscopio 102.

25 Tal como se representa, el giroscopio 102 adopta la forma de un giroscopio 106 vibratorio de Coriolis (CVG). En estos ejemplos ilustrativos, el giroscopio 102 es un sensor configurado para medir el movimiento angular con respecto al sistema 108 de referencia inercial. El sistema 108 de referencia inercial es un sistema de coordenadas o conjunto de ejes que no tiene aceleración.

30 Según la invención, el giroscopio 102 comprende un elemento 110 y un armazón 112. El elemento 110 puede ser una estructura que comprende varias aleaciones metálicas. El elemento 110 puede estar configurado para vibrar, o resonar, a varias frecuencias 114 resonantes para el elemento 110. En algunos casos, el número de frecuencias 114 resonantes puede ser sustancialmente igual al número de frecuencias 115 naturales para el elemento 110. Una frecuencia natural en el número de frecuencias 115 naturales puede ser la frecuencia a la que el elemento 110 vibra a lo largo de un eje particular cuando no está aplicándose una fuerza externa sustancialmente continua al elemento 110. En este ejemplo ilustrativo, el elemento 110 puede denominarse "masa efectiva" o resonador en algunos ejemplos ilustrativos.

35 El elemento 110 está asociado con el armazón 112. La asociación entre el elemento 110 y el armazón 112 es una asociación física en estos ejemplos representados. Puede considerarse que un primer componente, tal como el elemento 110, está asociado con un segundo componente, tal como el armazón 112, al fijarse al segundo componente, unirse al segundo componente, montarse en el segundo componente, soldarse al segundo componente, sujetarse al segundo componente y/o conectarse al segundo componente de alguna otra manera adecuada. El primer componente también puede conectarse al segundo componente usando un tercer componente. También puede considerarse que el primer componente está asociado con el segundo componente al formarse como parte y/o extensión del segundo componente.

40 El elemento 110 está asociado con el armazón 112 a través de un sistema 116 de resortes. El sistema 116 de resortes puede comprender un primer conjunto de resortes 118 y un segundo conjunto de resortes 119. Tal como se usa en el presente documento, un "conjunto de" elementos significa uno o más elementos. Por ejemplo, un conjunto de resortes significa uno o más resortes.

45 Como ejemplo específico, el primer conjunto de resortes 118 puede unir el elemento 110 al armazón 112 en una dirección a lo largo del primer eje 120. En particular, el primer conjunto de resortes 118 permite que el elemento 110 se mueva de manera lineal en una dirección a lo largo del primer eje 120. Además, el segundo conjunto de resortes 119 puede unir el elemento 110 al armazón 112 en una dirección a lo largo del segundo eje 122. El segundo conjunto de resortes 119 permite que el elemento 110 se mueva de manera lineal en una dirección a lo largo del segundo eje 122. De esta manera, el sistema 116 de resortes restringe el movimiento del elemento 110 al interior de un plano 124

formado por el primer eje 120 y el segundo eje 122. Dicho de otro modo, el elemento 110 puede tener dos grados de libertad.

El armazón 112, con el elemento 110 unido al armazón 112 a través del sistema 116 de resortes, puede estar configurado para moverse con respecto a un tercer eje 126. En particular, el armazón 112, con el elemento 110 unido al armazón 112, puede rotar alrededor del tercer eje 126. El tercer eje 126 es un eje fijo que es sustancialmente perpendicular al plano 124 formado por el primer eje 120 y el segundo eje 122. De esta manera, el primer eje 120, el segundo eje 122 y el tercer eje 126 son sustancialmente ortogonales entre sí. En algunos ejemplos ilustrativos, el primer eje 120, el segundo eje 122 y el tercer eje 126 pueden denominarse eje x, eje y, y eje z, respectivamente.

El armazón 112 puede rotar alrededor del tercer eje 126 con una velocidad 128 angular. La velocidad 128 angular también puede denominarse velocidad inercial. Dicho de otro modo, la velocidad 128 angular para el armazón 112, con el elemento 110 unido al armazón 112, es la velocidad de rotación para el armazón 112 con respecto al sistema 108 de referencia inercial. La velocidad 128 angular puede expresarse en radianes por segundo, revoluciones por segundo, grados por segundo o en otras unidades adecuadas.

Según la invención, el giroscopio 102 también incluye una unidad 130 de control. La unidad 130 de control está configurada para controlar el funcionamiento del giroscopio 102. La unidad 130 de control puede implementarse usando al menos uno de un procesador, un circuito, un circuito integrado (IC), un microchip, un microprocesador, un ordenador y algún otro tipo adecuado de controlador. Además, el giroscopio 102 puede incluir varios componentes adicionales, tales como, por ejemplo, al menos uno de un electrodo, un condensador y otros componentes adecuados.

Tal como se usa en el presente documento, la frase “al menos uno de”, cuando se usa con una lista de elementos, significa que pueden usarse diferentes combinaciones de uno o más de los elementos indicados y puede necesitarse solo uno de cada elemento en la lista. Por ejemplo, “al menos uno del elemento A, el elemento B y el elemento C” puede incluir, sin limitación, el elemento A, o el elemento A y el elemento B. Este ejemplo también puede incluir el elemento A, el elemento B y el elemento C, o el elemento B y el elemento C. En otros ejemplos, “al menos uno de” puede ser, por ejemplo, sin limitación, dos del elemento A, uno del elemento B y diez del elemento C; cuatro del elemento B y siete del elemento C; y otras combinaciones adecuadas.

La unidad 130 de control controla el giroscopio 102 de tal manera que el elemento 110 se mueve de manera lineal en una dirección a lo largo del eje 121 de accionamiento en el plano 124. Este movimiento del elemento 110 es la vibración del elemento 110 a lo largo del eje 121 de accionamiento. El ángulo del eje 121 de accionamiento con respecto al primer eje 120 se denomina ángulo de accionamiento. La unidad 130 de control controla el giroscopio 102 para funcionar a un ángulo de accionamiento seleccionado de tal manera que el ángulo de accionamiento real está dentro de tolerancias seleccionadas.

El eje 121 de accionamiento puede ser el primer eje 120 en algunos ejemplos ilustrativos. Por ejemplo, la unidad 130 de control puede accionar el elemento 110 para vibrar a lo largo del primer eje 120 a varias frecuencias 114 resonantes usando una señal 131 de control de accionamiento. En un ejemplo ilustrativo, la señal 131 de control de accionamiento puede enviarse a varios electrodos unidos al elemento 110 para hacer que el elemento 110 vibre a lo largo del primer eje 120 a varias frecuencias 114 resonantes.

La vibración del elemento 110 en la dirección a lo largo del primer eje 120, mientras que el armazón 112, con el elemento 110 unido al armazón 112, está rotando alrededor del tercer eje 126, genera una fuerza 132 en una dirección a lo largo del eje 123 de detección en el plano 124. La fuerza 132 es una fuerza de Coriolis en estos ejemplos. La fuerza 132 actúa a ángulos sustancialmente rectos con respecto a la velocidad 128 angular para el armazón 112.

El eje 123 de detección es un eje que es sustancialmente ortogonal al eje 121 de accionamiento. Dicho de otro modo, el eje 123 de detección está orientado a aproximadamente 90 grados con respecto al eje 121 de accionamiento. El eje 123 de detección es el eje a lo largo del cual se induce movimiento lineal del elemento 110 en respuesta a la fuerza 132. Por ejemplo, la vibración simultánea del elemento 110 en la dirección a lo largo del eje 121 de accionamiento y la rotación del armazón 112 alrededor del tercer eje 126 genera la fuerza 132, que induce la vibración del elemento 110 en la dirección a lo largo del eje 123 de detección. El eje 121 de accionamiento y el eje 123 de detección son sustancialmente ortogonales al tercer eje 126. Cuando el eje 121 de accionamiento es el primer eje 120, el eje 123 de detección puede ser el segundo eje 122.

Tal como se representa, la unidad 130 de control usa una señal 133 de reequilibrado de fuerza para hacer que la amplitud de vibraciones del elemento 110 a lo largo del segundo eje 122 sea sustancialmente cero. Dicho de otro modo, la unidad 130 de control usa la señal 133 de reequilibrado de fuerza para anular sustancialmente el movimiento del elemento 110 a lo largo del segundo eje 122 basándose en la señal 131 de control de accionamiento. La unidad 130 de control genera medidas 134 de la señal 133 de reequilibrado de fuerza. Las medidas 134 pueden usarse para determinar la velocidad 128 angular.

Las medidas 134 pueden ser menos precisas de lo deseado cuando el sesgo 101 del giroscopio 102 contribuye a las medidas 134. El sesgo 101 es el error para el giroscopio 102. Por ejemplo, el sesgo 101 es la diferencia entre las medidas 134 y las medidas que deben generarse realmente. El sesgo 101 puede ser la contribución a las medidas 134

cuando la velocidad 128 angular es sustancialmente cero. De esta manera, el sesgo 101 puede denominarse sesgo a velocidad cero.

El sesgo 101 puede estar provocado por varios factores diferentes. Estos factores pueden incluir, por ejemplo, sin limitación, temperatura, faltas de sistematicidad en la fabricación de los diferentes componentes para el giroscopio 102, características del elemento 110, características de un sistema de detección en el giroscopio 102, características de la unidad 130 de control y otros factores adecuados. Estos factores también pueden incluir asimetría de rigidez y amortiguación entre el primer eje 120 y el segundo eje 122, asimetría entre la alineación del eje 121 de accionamiento y el eje 123 de detección, y/u otros tipos adecuados de asimetría.

Puede usarse un sistema 136 de compensación para compensar electrónicamente el sesgo 101. El sistema 136 de compensación puede implementarse usando hardware, software o una combinación de los dos. Por ejemplo, el sistema 136 de compensación puede implementarse dentro de un sistema 138 informático. El sistema 138 informático puede comprender varios ordenadores. Cuando el sistema 138 informático comprende más de un ordenador, estos ordenadores pueden estar en comunicación entre sí.

El sistema 136 de compensación identifica un conjunto de ecuaciones 140 para el sesgo 101 del giroscopio 102 usando un modelo 142 para el movimiento del giroscopio 102 con respecto a un sistema 144 de referencia no inercial y una suposición 146. El sistema 144 de referencia no inercial es un sistema de referencia rotatorio. En este ejemplo ilustrativo, el sistema 144 de referencia no inercial puede estar formado por el primer eje 120 y el segundo eje 122. Dicho de otro modo, el plano 124 formado por el primer eje 120 y el segundo eje 122 puede rotar con respecto al sistema 108 de referencia inercial.

El modelo 142 puede ser un modelo para el movimiento del giroscopio 102 a lo largo del primer eje 120 y el segundo eje 122. En este ejemplo ilustrativo, el modelo 142 adopta la forma de varias ecuaciones que describen el movimiento del giroscopio 102 con respecto al primer eje 120 y al segundo eje 122.

La suposición 146 es una suposición de que la velocidad 128 angular para el giroscopio 102 es sustancialmente cero dentro de tolerancias seleccionadas. Dicho de otro modo, la suposición 146 supone que el armazón 112 no está rotando alrededor del tercer eje 126 y tiene una velocidad inercial de sustancialmente cero. El sistema 136 de compensación modifica el modelo 142 basándose en la suposición 146 para formar un modelo 148 modificado. En particular, el modelo 148 modificado está simplificado en comparación con el modelo 142.

El sistema 136 de compensación identifica el conjunto de ecuaciones 140 usando el modelo 148 modificado. El conjunto de ecuaciones 140 puede incluir una primera ecuación 150 y una segunda ecuación 152. La primera ecuación 150 es para la porción del sesgo 101 que es el sesgo 154 en fase. El sesgo 154 en fase puede ser la porción del sesgo 101 que está sustancialmente en fase con la velocidad lineal de las vibraciones del giroscopio 102. La segunda ecuación 152 es para la porción del sesgo 101 que es el sesgo 156 en cuadratura. El sesgo 156 en cuadratura puede ser la porción del sesgo 101 que está sustancialmente en cuadratura con la velocidad lineal de las vibraciones del giroscopio 102. El sesgo 156 en cuadratura también puede denominarse sesgo de cuadratura.

Tal como se representa, el conjunto de ecuaciones 140 incluye un conjunto de parámetros 158. El conjunto de parámetros 158 incluye uno o más parámetros que contribuyen al sesgo 101. Estos parámetros pueden incluir, por ejemplo, al menos uno de un ángulo de alineación errónea de eje de accionamiento, un ángulo de alineación errónea de eje de detección, un ángulo de acimut de amortiguación, un término de asimetría de amortiguación, una diferencia entre las frecuencias naturales del eje 121 de accionamiento y el eje 123 de detección, un ángulo de acimut del eje 121 de accionamiento con respecto al primer eje 120, y algunos otros parámetros adecuados. Pueden desconocerse los valores para estos parámetros.

El sistema 136 de compensación identifica un conjunto de valores 160 para el conjunto de parámetros 158 usando el conjunto de ecuaciones 140, las medidas 161 de sesgo y el algoritmo 162 iterativo. El sistema 136 de compensación identifica el conjunto de valores 160 para el conjunto de parámetros 158 dentro de tolerancias seleccionadas. Dicho de otro modo, el sistema 136 de compensación usa el conjunto de ecuaciones 140, las medidas 161 de sesgo y el algoritmo 162 iterativo para estimar el conjunto de valores 160 para el conjunto de parámetros 158.

Las medidas 161 de sesgo pueden ser medidas generadas por la unidad 130 de control a una pluralidad de ángulos 164 de accionamiento. Un ángulo de accionamiento en la pluralidad de ángulos 164 de accionamiento es el ángulo del eje 121 de accionamiento con respecto al primer eje 120 a lo largo del cual la unidad 130 de control acciona el elemento 110 para moverse de manera lineal. Por ejemplo, el ángulo de accionamiento puede seleccionarse de un intervalo de entre aproximadamente 0 grados y aproximadamente 360 grados con respecto al primer eje 120. En un ejemplo ilustrativo, la pluralidad de ángulos 164 de accionamiento puede incluir aproximadamente 0 grados, aproximadamente 45 grados y aproximadamente 90 grados con respecto al primer eje 120.

El algoritmo 162 iterativo puede ser, por ejemplo, sin limitación, un algoritmo de mínimos cuadrados. El algoritmo 162 iterativo puede usarse para resolver al menos un valor en el conjunto de valores 160 usando el conjunto de ecuaciones 140 y las medidas 161 de sesgo.

El conjunto de valores 160 puede usarse para identificar un ángulo de accionamiento particular al cual el sesgo 156 en cuadratura es sustancialmente cero. Dicho de otro modo, el conjunto de valores 160 puede usarse para identificar el ángulo de accionamiento que anula sustancialmente el sesgo 156 en cuadratura dentro de tolerancias seleccionadas. El giroscopio 102 puede hacerse funcionar a este ángulo de accionamiento particular para calibrar la salida del giroscopio 102 usando el conjunto de ecuaciones 140.

Además, con el conjunto de valores 160 para el conjunto de parámetros 158, el sistema 136 de compensación puede estimar el sesgo 101 del giroscopio 102 a un ángulo de accionamiento seleccionado usando el conjunto de ecuaciones 140 para formar un sesgo estimado. El sistema 136 de compensación puede restar el sesgo estimado a partir de medidas generadas por el giroscopio 102 para el ángulo de accionamiento seleccionado para compensar electrónicamente el sesgo 101 del giroscopio 102.

No se pretende que la ilustración del entorno de compensación de sesgo en la figura 1 implique limitaciones físicas o de arquitectura en cuanto a la manera en la que puede implementarse una realización ilustrativa. Pueden usarse otros componentes además y/o en lugar de los ilustrados. Algunos componentes pueden no ser necesarios. Además, los bloques se presentan para ilustrar algunos componentes funcionales. Uno o más de estos bloques pueden combinarse, dividirse o combinarse y dividirse para dar diferentes bloques cuando se implementan en una realización ilustrativa.

Por ejemplo, en algunos ejemplos ilustrativos, el giroscopio 102 puede tener elementos además del elemento 110. Además, en algún caso, el elemento 110 puede estar unido a una carcasa, un alojamiento, varias estructuras o algún otro tipo adecuado de estructura además del armazón 112.

Haciendo ahora referencia a la figura 2, se representa una ilustración de un modelo funcional para un giroscopio según una realización ilustrativa. El modelo 200 es un ejemplo de un modelo de función para un giroscopio, tal como, por ejemplo, el giroscopio 102 en la figura 1. En este ejemplo ilustrativo, el modelo 200 incluye el elemento 202 y el armazón 203. Evidentemente, en otros ejemplos ilustrativos, el modelo 200 puede incluir otros componentes para el giroscopio además de los descritos en la figura 2.

El elemento 202 está asociado con el armazón 203 mediante un primer conjunto de resortes 204 a lo largo de la dirección del eje 206 x. El elemento 202 está asociado con el armazón 203 mediante un segundo conjunto de resortes 208 a lo largo de la dirección del eje 210 y. En este ejemplo ilustrativo, el eje 206 x y el eje 210 y son ejemplos de implementaciones para el primer eje 120 y el segundo eje 122, respectivamente, en la figura 1.

Tal como se representa, el eje 206 x y el eje 210 y forman un plano 212. El elemento 202 puede vibrar a lo largo del eje 206 x a una primera frecuencia natural. Además, el elemento 202 puede vibrar a lo largo del eje y a una segunda frecuencia natural. La primera frecuencia natural puede ser igual a o diferente de la segunda frecuencia natural, dependiendo de la implementación. La vibración del elemento 202 a lo largo del eje 206 x puede ser un primer modo, mientras que la vibración del elemento 202 a lo largo del eje 210 y puede ser un segundo modo. El primer modo y el segundo modo pueden denominarse, por ejemplo, modo de accionamiento y modo de detección, respectivamente.

El elemento 202 puede vibrar a lo largo del eje 206 x y/o del eje 210 y independientemente del movimiento del armazón 203 en este ejemplo ilustrativo. En particular, el primer conjunto de resortes 204 y el segundo conjunto de resortes 208 pueden permitir que el elemento 202 se mueva a lo largo del eje 206 x y el eje 210 y independientemente del movimiento del armazón 203.

El movimiento del elemento 202 está restringido al interior de un plano 212 en este ejemplo ilustrativo. En un ejemplo ilustrativo, una unidad de control, tal como la unidad 130 de control en la figura 1, puede accionar el elemento 202 para vibrar a lo largo de la dirección del eje 206 x. El armazón 203 puede hacerse rotar alrededor de un eje 211 z que es sustancialmente perpendicular al plano 212. La rotación del armazón 203 alrededor del eje 211 z mientras el elemento 202 se mueve a lo largo de la dirección del eje 206 x genera una fuerza de Coriolis que provoca que elemento 202 vibre a lo largo de la dirección del eje 210 y.

Por ejemplo, si el elemento 202 se mueve en la dirección de la flecha 214 a lo largo del eje 206 x mientras el armazón 203 se hace rotar alrededor del eje 211 z en la dirección de la flecha 216, el elemento 202 puede moverse en la dirección de la flecha 218 a lo largo del eje 210 y. Si el elemento 202 se mueve en la dirección de la flecha 220 a lo largo del eje 206 x mientras el armazón 203 se hace rotar alrededor del eje 211 z en la dirección de la flecha 216, el elemento 202 puede moverse en la dirección de la flecha 222 a lo largo del eje 210 y.

De manera similar, si el elemento 202 se mueve en la dirección de la flecha 214 a lo largo del eje 206 x mientras el armazón 203 se hace rotar alrededor del eje 211 z en la dirección de la flecha 224, el elemento 202 puede moverse en la dirección de la flecha 222 a lo largo del eje 210 y. Si el elemento 202 se mueve en la dirección de la flecha 220 a lo largo del eje 206 x mientras el armazón 203 se hace rotar alrededor del eje 211 z en la dirección de la flecha 224, el elemento 202 puede moverse en la dirección de la flecha 218 a lo largo del eje 210 y.

Haciendo ahora referencia a la figura 3, se representa una ilustración de la órbita de un elemento para un giroscopio según una realización ilustrativa. En este ejemplo ilustrativo, se representa una órbita 300 de un elemento, tal como el elemento 202 de la figura 2, con respecto a un eje 302 x y un eje 304 y. El eje 302 x es el mismo que el eje 206 x en la figura 2. El eje y es el mismo que el eje 210 y en la figura 2.

El elemento 202 puede oscilar alrededor de un origen 305 en la intersección del eje 302 x y el eje 304 y. La oscilación del elemento 202 puede seguir un comportamiento de tipo péndulo. De esta manera, la órbita 300 puede ser una órbita de péndulo en este ejemplo ilustrativo.

5 Los parámetros para la órbita 300 incluyen ángulo 306 de péndulo, amplitud 308 principal, amplitud 310 de cuadratura y fase 312. Tal como se representa, el ángulo 306 de péndulo, θ , es un ángulo con respecto al eje 302 x y define un eje con respecto al eje 302 x a lo largo del cual puede vibrar el elemento 202. La amplitud 308 principal, A, es la amplitud de vibraciones para el elemento 202 a lo largo del eje definido por el ángulo 306 de péndulo.

10 La amplitud 310 de cuadratura, q, es la amplitud de vibraciones para el elemento 202 a lo largo del eje en cuadratura con respecto al eje definido por el ángulo 306 de péndulo. Dicho de otro modo, la amplitud 310 de cuadratura es la amplitud de vibraciones para el elemento 202 a lo largo del eje sustancialmente ortogonal al eje definido por el ángulo 306 de péndulo. Además, la fase 312, ϕ' , es la fase para la órbita 300.

15 Una unidad de control, tal como la unidad 130 de control en la figura 1, puede estar configurada para controlar componentes de fuerzas externas aplicadas al elemento 202 y/o al armazón 203 en la figura 2 para controlar el ángulo 306 de péndulo, la amplitud 308 principal, la amplitud 310 de cuadratura y la fase 312. Por ejemplo, la unidad de control puede controlar fuerzas ejercidas sobre el elemento 202 de tal manera que estas fuerzas tienen una fase igual que la fase de la frecuencia natural para el elemento 202.

20 Además, la unidad de control puede controlar fuerzas ejercidas sobre el elemento 202 de tal manera que la amplitud 308 principal, A, permanece sustancialmente constante durante el funcionamiento del giroscopio contra cualquier fuerza de amortiguación. La tasa a la que disminuye la amplitud 308 principal, A, debido a la amortiguación es proporcional a A/τ , en la que τ es una constante de tiempo de amortiguación. Adicionalmente, la unidad de control puede controlar las fuerzas ejercidas sobre el elemento 202 de tal manera que el ángulo 306 de péndulo y la amplitud 310 de cuadratura permanecen sustancialmente de cero con tolerancias seleccionadas durante el funcionamiento del giroscopio.

25 Haciendo ahora referencia a la figura 4, se representa una ilustración de un procedimiento para compensar el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa. El procedimiento ilustrado en la figura 4 puede implementarse usando el sistema 136 de compensación para compensar el sesgo 101 del giroscopio 102 en la figura 1.

El procedimiento comienza generando medidas de sesgo para una pluralidad de ángulos de accionamiento usando el giroscopio (operación 400). En la operación 400, las medidas de sesgo se generan con la velocidad angular para el giroscopio sustancialmente igual a cero dentro de tolerancias seleccionadas.

30 Después, el procedimiento identifica un conjunto de ecuaciones para el sesgo del giroscopio usando un modelo para el movimiento del giroscopio con respecto a un sistema de referencia no inercial y una suposición de que la velocidad angular para el giroscopio es sustancialmente cero dentro de tolerancias seleccionadas (operación 402). La velocidad angular para el giroscopio es con respecto a un sistema de referencia inercial. El conjunto de ecuaciones incluye un conjunto de parámetros. El uno o más parámetros en el conjunto de parámetros tienen valores desconocidos. En este ejemplo ilustrativo, en la operación 402, el conjunto de ecuaciones incluye una primera ecuación para el sesgo en fase del giroscopio y una segunda ecuación para el sesgo en cuadratura del giroscopio.

Después de eso, el procedimiento identifica un conjunto de valores para el conjunto de parámetros usando las medidas de sesgo y el conjunto de ecuaciones (operación 404). La operación 404 puede realizarse usando un algoritmo iterativo, tal como, por ejemplo, sin limitación, un algoritmo de mínimos cuadrados.

40 A continuación, el procedimiento estima el sesgo del giroscopio a un ángulo de accionamiento seleccionado usando el conjunto de ecuaciones con el conjunto de valores identificados para el conjunto de parámetros para formar un sesgo estimado (operación 406). El ángulo de accionamiento seleccionado puede ser, por ejemplo, el ángulo de accionamiento actual al que está haciéndose funcionar el giroscopio. De esta manera, el sesgo del giroscopio puede estimarse sustancialmente en tiempo real durante el funcionamiento del giroscopio.

45 Después, el procedimiento resta el sesgo estimado a partir de una o más medidas generadas por el giroscopio para el ángulo de accionamiento seleccionado para compensar sustancialmente el sesgo del giroscopio (operación 408), terminando el procedimiento después de eso. En la operación 408, se resta el sesgo estimado a partir de una medida para retirar sustancialmente la contribución del sesgo del giroscopio a partir de la medida dentro de tolerancias seleccionadas. De esta manera, el sesgo del giroscopio puede compensarse electrónicamente sustancialmente en tiempo real.

Haciendo ahora referencia a la figura 5, se representa una ilustración de un procedimiento para identificar un conjunto de ecuaciones para el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa. El procedimiento ilustrado en la figura 5 puede ser un ejemplo de un procedimiento que puede usarse para implementar la operación 402 en la figura 4.

El procedimiento comienza identificando un modelo para el movimiento del giroscopio (operación 500). El giroscopio comprende un elemento asociado con un armazón. En este ejemplo ilustrativo, el modelo comprende las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \ddot{x} - k(2\Omega\dot{y} + \dot{\Omega}y) + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{y}\sin 2\theta_\tau + \dot{x}\cos 2\theta_\tau) + (\omega^2 - k'\Omega^2)x - \omega\Delta\omega(x\cos 2\theta_\omega + y\sin 2\theta_\omega) = f_x + \gamma_x g_x \\ \ddot{y} + k(2\Omega\dot{x} + \dot{\Omega}x) + \frac{2}{\tau}\dot{y} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{y}\cos 2\theta_\tau - \dot{x}\sin 2\theta_\tau) + (\omega^2 - k'\Omega^2)y + \omega\Delta\omega(y\cos 2\theta_\omega - x\sin 2\theta_\omega) = f_y + \gamma_y g_y \end{cases} \quad (1)$$

5 donde
$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad \omega^2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}, \quad \omega\Delta\omega = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2}, \quad (2)$$

donde
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right) \quad \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}\right) \quad (3)$$

10 donde x es una posición del elemento en el giroscopio con respecto a un eje x, \dot{x} es la primera derivada de x con respecto al tiempo, \ddot{x} es la segunda derivada de x con respecto al tiempo, y es una posición del elemento en el giroscopio con respecto a un eje y, \dot{y} es la primera derivada de y con respecto al tiempo, \ddot{y} es la segunda derivada de y con respecto al tiempo, Ω es la velocidad angular del giroscopio con respecto a un sistema de referencia inercial, k es una ganancia, τ es una constante de tiempo de amortiguación, 1 indica un eje de accionamiento para el elemento, 2 indica un eje de detección para el elemento, τ_1 es la constante de tiempo de amortiguación con respecto al eje de accionamiento, τ_2 es la constante de tiempo de amortiguación con respecto al eje de detección, ω es la frecuencia natural del elemento en el giroscopio, ω_1 es la frecuencia natural para el eje de accionamiento, ω_2 es la frecuencia natural para el eje de detección, Δ indica una diferencia, θ_τ es el acimut del eje de amortiguación de τ_1 con respecto al eje x y también puede denominarse ángulo de acimut de amortiguación, k' es una ganancia, θ_ω es el acimut del eje de accionamiento con respecto al eje x, f_x es una componente de fuerza externa ejercida sobre el elemento a lo largo del eje x, f_y es una componente de fuerza externa ejercida sobre el elemento a lo largo del eje y para una señal de reequilibrado de fuerza, γ_x es una ganancia con respecto al eje x, γ_y es una ganancia con respecto al eje y, g_x es una componente de aceleración lineal para el armazón con respecto al eje x, g_y es una componente de aceleración lineal para el armazón con respecto al eje y, K es la constante de resorte para el resorte que conecta el elemento al armazón

del giroscopio a lo largo del eje x, y m es la masa del elemento en el giroscopio. El término $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)$ puede denominarse término de asimetría de amortiguación.

25 Después, el procedimiento modifica el modelo para el movimiento del giroscopio basándose en una suposición de que la velocidad angular para el giroscopio es sustancialmente cero dentro de tolerancias seleccionadas para formar un modelo modificado (operación 502). En la operación 502, también se realiza una suposición de que la contribución de las componentes de aceleración lineal para el armazón son despreciables. El modelo modificado comprende las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{y}\sin 2\theta_\tau + \dot{x}\cos 2\theta_\tau) + \omega^2 x - \omega\Delta\omega(x\cos 2\theta_\omega + y\sin 2\theta_\omega) = f_x \\ \ddot{y} + \frac{2}{\tau}\dot{y} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{y}\cos 2\theta_\tau - \dot{x}\sin 2\theta_\tau) + \omega^2 y + \omega\Delta\omega(y\cos 2\theta_\omega - x\sin 2\theta_\omega) = f_y \end{cases} \quad (4)$$

30 Después de eso, el procedimiento identifica un modelo de alineación errónea para la alineación errónea del eje de accionamiento (operación 504). La alineación errónea del eje de accionamiento se produce cuando el eje a lo largo del cual se acciona el elemento del giroscopio para vibrar es diferente del eje de accionamiento indicado por la señal de control de accionamiento generada por la unidad de control para el giroscopio.

35 Dicho de otro modo, la unidad de control puede generar una señal de control de accionamiento para controlar el elemento para moverse a lo largo del eje de accionamiento. Sin embargo, el movimiento real del elemento puede ser a lo largo de un eje desviado con respecto al eje de accionamiento en un ángulo a. Este ángulo, a, puede denominarse un ángulo de alineación errónea de eje de accionamiento. Además, con este tipo de alineación errónea, el eje a lo largo del cual se induce que vibre el elemento en respuesta a una fuerza de Coriolis puede estar desviado con respecto al eje de

detección en un ángulo b . Este ángulo, b , puede denominarse ángulo de alineación errónea de eje de detección. En este ejemplo ilustrativo, estos ángulos, a y b , pueden estar en radianes (rads).

El modelo de alineación errónea puede definirse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} f_{x, real} \\ f_{y, real} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix}}_{E(a,b)} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = E(a,b) \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

5 donde $f_{x,real}$ es la fuerza real ejercida a lo largo del eje x y $f_{y,real}$ es la fuerza real ejercida a lo largo del eje y .

Después, el procedimiento identifica varias transformaciones para transformar el modelo para el movimiento del giroscopio para tener en cuenta un eje de accionamiento entre el eje x y el eje y (operación 506). Por ejemplo, el giroscopio puede accionarse para vibrar a lo largo de un eje entre el eje x y el eje y . El ángulo entre este eje de accionamiento y el eje x es el ángulo de accionamiento. El eje de accionamiento y el eje de detección que es sustancialmente ortogonal al eje de accionamiento forman un sistema de referencia rotado con respecto al sistema de referencia formado por el eje x y el eje y .

Una primera transformación se define de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \text{sen}\varphi \\ -\text{sen}\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

15 donde φ es el ángulo de accionamiento, x_s es la posición del elemento con respecto al eje de accionamiento, y_s es la posición del elemento con respecto al eje de detección, \cos es la función coseno, y sen es la función seno.

Una segunda transformación necesaria para derivar el modelo para el movimiento del giroscopio con respecto al sistema de referencia rotado se define de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\text{sen}\varphi \\ \text{sen}\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = M(\varphi) \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

Además,

$$20 \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \frac{dM(\varphi)}{dt} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + M(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \frac{d^2M(\varphi)}{dt^2} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + 2 \frac{dM(\varphi)}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} + M(\varphi) \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} f_{x, real} \\ f_{y, real} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix}}_{E(a,b)} M(\varphi) \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} = EM(\varphi) \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

25 donde \dot{x}_s es la primera derivada de x_s con respecto al tiempo, \ddot{x}_s es la segunda derivada de x_s con respecto al tiempo, \dot{y}_s es la primera derivada de y_s con respecto al tiempo, \ddot{y}_s es la segunda derivada de y_s con respecto al tiempo, f_{x_s} es la componente de fuerza externa ejercida sobre el elemento en la dirección del eje de accionamiento a través de x_s , y f_{y_s} es la componente de fuerza externa ejercida sobre el elemento en la dirección del eje de detección a través de y_s .

El procedimiento usa el modelo modificado para el movimiento del giroscopio y las varias transformaciones identificadas para formar un modelo transformado para el movimiento del giroscopio (operación 508). En la operación 508, se realiza una suposición de que la velocidad angular para el giroscopio está a una velocidad inferior a la velocidad a la que están midiéndose las vibraciones del eje de detección.

Por consiguiente, las derivadas primera y segunda en las ecuaciones (8) y (9) pueden ser despreciables. Las ecuaciones (8) y (9) pueden simplificarse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = M(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = M(\varphi) \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix}. \quad (12)$$

5 El modelo transformado puede definirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2}{\tau} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\cos 2\theta_\tau & \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\text{sen}2\theta_\tau \\ \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\text{sen}2\theta_\tau & \frac{2}{\tau} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\cos 2\theta_\tau \end{bmatrix}}_{D(\tau, \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right), \theta_\tau)} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega^2 - \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\omega & -\omega\Delta\omega\text{sen}2\theta_\omega \\ -\omega\Delta\omega\text{sen}2\theta_\omega & \omega^2 + \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\omega \end{bmatrix}}_{S(\omega, \Delta\omega, \theta_\omega)} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ = E(a, b)M(\varphi) \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

reescribiéndose el modelo transformado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \underbrace{M^{-1}(\varphi)DM(\varphi)}_H \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} + \underbrace{\left(M^{-1}(\varphi)SM(\varphi) - \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)}_G \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \\ = \underbrace{M^{-1}(\varphi)E(a, b)M(\varphi)}_K \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

Las nuevas matrices pueden definirse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} H = M^{-1}(\varphi)DM(\varphi) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \\ G = M^{-1}(\varphi)SM(\varphi) - \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \\ K = M^{-1}(\varphi)E(a, b)M(\varphi) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

y el modelo transformado para el movimiento del giroscopio simplificarse adicionalmente de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{11}\dot{x}_s + h_{12}\dot{y}_s \\ h_{21}\dot{x}_s + h_{22}\dot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{11}x_s + g_{12}y_s \\ g_{21}x_s + g_{22}y_s \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Después de eso, el procedimiento identifica un modelo de reequilibrado de fuerza para la señal de reequilibrado de fuerza que anula sustancialmente las vibraciones con respecto al eje de detección (operación 510). Por ejemplo, cuando se anulan sustancialmente las vibraciones con respecto al eje de detección,

$$\begin{cases} \ddot{y}_s = 0 \\ \dot{y}_s = 0 \\ y_s = 0 \end{cases} \quad \text{y} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{y}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Por consiguiente, la señal de reequilibrado de fuerza puede resolverse usando la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} h_{11}\dot{x}_s \\ h_{21}\dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{11}x_s \\ g_{21}x_s \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix}, \quad \text{que puede simplificarse para dar} \quad (19)$$

$$5 \quad \begin{bmatrix} h_{11}\dot{x}_s + g_{11}x_s \\ h_{21}\dot{x}_s + g_{21}x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & h_{11} \\ g_{21} & h_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Resolver la señal de reequilibrado de fuerza proporciona la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} f_{x_s} \\ f_{y_s} \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} g_{11} & h_{11} \\ g_{21} & h_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix}, \quad \text{que puede expandirse para dar} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_{y_s} = & \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{sen}(2\varphi - 2\theta_\tau) \dot{x}_s - \frac{a}{2} \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{cos}(2\varphi - 2\theta_\tau) \dot{x}_s + \frac{b}{2} \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{cos}(2\varphi - 2\theta_\tau) \dot{x}_s \\ & + \frac{3a}{4} \omega \Delta \omega \text{cos}(2\varphi - 2\theta_\omega) x_s + \frac{a}{2} \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{cos}(2\theta_\tau) \dot{x}_s + \frac{b}{2} \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{cos}(2\theta_\tau) \dot{x}_s \\ & - \frac{1}{\tau(1-ab)} (b\dot{x}_s - a\dot{x}_s + a \text{cos}(2\varphi) \dot{x}_s + b \text{cos}(2\varphi) \dot{x}_s) - \omega \Delta \omega \text{sen}(2\varphi - 2\theta_\omega) x_s \\ & + \frac{a}{4} \omega \Delta \omega \text{cos}(2\varphi + 2\theta_\omega) x_s - \frac{a}{4} \omega \Delta \omega \text{cos}(2\varphi - 2\theta_\omega) x_s + \frac{b}{4} \omega \Delta \omega \text{cos}(2\varphi + 2\theta_\omega) x_s \\ & - \frac{a}{ab-1} \omega \Delta \omega \text{cos}(2\theta_\omega) x_s. \end{aligned} \quad (22)$$

- 10 Después, el procedimiento usa el modelo de reequilibrado de fuerza para identificar el conjunto de ecuaciones para el sesgo del giroscopio (operación 512), terminando el procedimiento después de eso. En la operación 512, se realiza la siguiente suposición:

$$\begin{cases} x_s = c_0 \text{cos}(\omega_x t) \\ \dot{x}_s = -c_0 \omega_x \text{sen}(\omega_x t) \end{cases}, \quad (23)$$

donde c_0 es la componente de amplitud en fase con el eje de accionamiento, y ω_x es la frecuencia natural del elemento con respecto al eje x.

- 15 El conjunto de ecuaciones identificado en la operación 512 incluye una primera ecuación para un sesgo en fase y una segunda ecuación para un sesgo en cuadratura. El sesgo en fase puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{B}{-c_0\omega_x} = \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\text{sen}(2\varphi - 2\theta_\tau) + \frac{a+b}{2}\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\cos(2\theta_\tau) - \cos(2\varphi - 2\theta_\tau)) - \frac{b(1 + \cos(2\varphi)) - a(1 - \cos(2\varphi))}{\tau(1-ab)},$$

(24)

donde B es el sesgo en fase. En la ecuación (24), el sesgo en fase, B, se ajusta a escala mediante el término, $c_0\omega_x$. La ecuación (24) puede simplificarse adicionalmente de la siguiente manera:

$$\frac{B}{-c_0\omega_x} = \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\text{sen}(2\varphi - 2\theta_\tau) + \frac{a+b}{2}\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\cos(2\theta_\tau) - \cos(2\varphi - 2\theta_\tau)) - \frac{b(1 + \cos(2\varphi)) - a(1 - \cos(2\varphi))}{\tau(1-ab)}$$

(25)

5 El sesgo en cuadratura puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{quad}{c_0} = -(1+a)\omega\Delta\omega\text{sen}(2\varphi - 2\theta_\omega) + \frac{a+b}{4}\omega\Delta\omega\cos(2\varphi + 2\theta_\omega) - \frac{a}{ab-1}\omega\Delta\omega\cos(2\theta_\omega)$$

(26)

De esta manera, el procedimiento ilustrado en la figura 5 proporciona un método para identificar un conjunto de ecuaciones, tales como la ecuación (25) y la ecuación (26) para el sesgo del giroscopio. Los parámetros desconocidos

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right),$$

10 en estas ecuaciones incluyen a, b, θ_τ , $\Delta\omega$ y θ_ω . En un ejemplo ilustrativo, estas ecuaciones pueden usarse en la operación 404 en la figura 4 para identificar valores para estos parámetros.

Haciendo ahora referencia a la figura 6, se representa una ilustración de un procedimiento para identificar un conjunto de valores para un conjunto de parámetros en un conjunto de ecuaciones para el sesgo de un giroscopio en forma de un diagrama de flujo según una realización ilustrativa. El procedimiento ilustrado en la figura 6 puede ser un ejemplo de un procedimiento que puede usarse para implementar la operación 404 en la figura 4.

15 El procedimiento comienza realizando un grupo de suposiciones (operación 600). En la operación 600, el grupo de suposiciones incluye suposiciones con respecto al sesgo en fase del giroscopio. Estas suposiciones son de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} ab \approx 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)a \approx 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)b \approx 0 \\ \cos 2\theta_\tau \approx 1 \\ \text{sen} 2\theta_\tau \approx 2\theta_\tau \\ \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(2\theta_\tau) \approx 0 \end{array} \right. \quad (27)$$

20 Además, el grupo de suposiciones también incluye suposiciones con respecto al sesgo en cuadratura del giroscopio. Estas suposiciones son de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_\omega = 90 + \theta_{\omega 0} \\ \text{sen} 2\theta_\omega = -\text{sen} 2\theta_{\omega 0} \approx -2\theta_{\omega 0} \\ \cos 2\theta_\omega = -\cos 2\theta_{\omega 0} \approx -1 \\ a\Delta\omega \approx 0 \\ b\Delta\omega \approx 0 \\ ab \approx 0 \end{array} \right. \quad (28)$$

Después, el procedimiento usa el conjunto de suposiciones para modificar el conjunto de ecuaciones para formar un conjunto modificado de ecuaciones (operación 602). El conjunto modificado de ecuaciones incluye una primera ecuación

modificada para el sesgo en fase y una segunda ecuación modificada para el sesgo en cuadratura. La primera ecuación modificada para el sesgo en fase se define de la siguiente manera:

$$\frac{B}{-c_0\omega_x} = \begin{bmatrix} \sin(2\varphi) & \frac{1-\cos(2\varphi)}{\tau} & -\frac{1+\cos(2\varphi)}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (29)$$

La segunda ecuación modificada para el sesgo en cuadratura se define de la siguiente manera:

$$\frac{quad}{c_0} = -\omega\Delta\omega(\sin(2\varphi)\cos(2\theta_{\omega_0}) - \cos(2\varphi)\sin(2\theta_{\omega_0})) \approx -\omega\Delta\omega\sin(2\varphi) \quad (30)$$

5

Después, el procedimiento identifica un conjunto de valores para el conjunto de parámetros en el conjunto modificado de ecuaciones usando las medidas de sesgo para la pluralidad de ángulos de accionamiento y un algoritmo iterativo (operación 604), terminando el procedimiento después de eso. Las medidas de sesgo en la operación 604 pueden ser las medidas de sesgo generadas por el giroscopio para la pluralidad de ángulos de accionamiento en la operación 400 en la figura 4.

10

Como un ejemplo ilustrativo, la pluralidad de ángulos de accionamiento puede incluir ángulos de aproximadamente 0 grados, aproximadamente 45 grados y aproximadamente 90 grados con respecto al eje x. Evidentemente, en otros ejemplos ilustrativos, puede seleccionarse cualquier ángulo entre aproximadamente 0 grados y aproximadamente 90 grados con respecto al eje x.

15

Para los ángulos de aproximadamente 0 grados, aproximadamente 45 grados y aproximadamente 90 grados con respecto al eje x, la ecuación (29) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\frac{1}{-c_0\omega_x} \begin{bmatrix} B(\varphi=0) \\ B(\varphi=45) \\ B(\varphi=90) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{2}{\tau} \\ 1 & \frac{1}{\tau} & -\frac{1}{\tau} \\ 0 & \frac{2}{\tau} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \\ a \\ b \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (31)$$

con

$$\det(C) = \frac{4}{\tau^2} \neq 0 \quad (32)$$

20

La solución para los parámetros, a, b y $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)$, viene dada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \\ a \\ b \end{bmatrix} = C^{-1} \left(\frac{1}{-c_0\omega_x} \begin{bmatrix} B(\varphi=0) \\ B(\varphi=45) \\ B(\varphi=90) \end{bmatrix} \right) = \frac{1}{-c_0\omega_x} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{\tau}{2} \\ -\frac{\tau}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_0 \\ B_{45} \\ B_{90} \end{bmatrix} \quad (33)$$

donde B_0 es la medida de sesgo para el ángulo de accionamiento de aproximadamente 0 grados con respecto al eje x, B_{45} es la medida de sesgo para el ángulo de accionamiento de aproximadamente 45 grados con respecto al eje x y B_{90} es la medida de sesgo para el ángulo de accionamiento de aproximadamente 90 grados con respecto al eje x.

25

Además, en la operación 604, la ecuación (25) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\left(\frac{B_{\text{medio}}}{-c_0 \omega_x} + \frac{b(1 + \cos(2\varphi)) - a(1 - \cos(2\varphi))}{\tau(1 - ab)} \right)}{\Delta \left(\frac{1}{\tau} \right)} = \sin(2\hat{\varphi} - 2\theta_\tau) + \frac{a+b}{2} (\cos(2\theta_\tau) - \cos(2\hat{\varphi} - 2\theta_\tau))$$

(34)

donde el ángulo de acimut de amortiguación, θ_τ , es el único parámetro desconocido. Puede usarse el algoritmo iterativo para resolver θ_τ .

- 5 Además, al resolver los parámetros en la segunda ecuación modificada para el sesgo en cuadratura, la ecuación (30), pueden seleccionarse medidas de sesgo para los ángulos de aproximadamente 0 grados y aproximadamente 45 grados con respecto al eje x. Por consiguiente, la ecuación (30) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \frac{quad(\varphi = 45)}{c_0} = -\omega \Delta \omega \cos(2\theta_{\omega 0}) \\ \frac{quad(\varphi = 0)}{c_0} = \omega \Delta \omega \sin(2\theta_{\omega 0}) \end{cases} \quad (35)$$

Si las frecuencias naturales en el eje de accionamiento y el eje de detección son asimétricas, $\Delta \omega \neq 0$, entonces el ángulo de acimut, $\theta_{\omega 0}$, puede estimarse de la siguiente manera:

$$10 \quad \hat{\theta}_{\omega 0} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{q_0}{-q_{45}} \right), \quad (36)$$

donde $\hat{\theta}_{\omega 0}$ es el ángulo de acimut estimado y q_0 y q_{45} son los sesgos en cuadratura a los ángulos de accionamiento de aproximadamente 0 grados y aproximadamente 45 grados, respectivamente, con respecto al eje x. La asimetría de frecuencia natural para cualquier ángulo de accionamiento puede estimarse de la siguiente manera:

$$\Delta \hat{\omega} = \frac{quad(\varphi)}{-c_0 \omega \sin(2\varphi - 2\hat{\theta}_{\omega 0})}, \quad (37)$$

- 15 donde $\Delta \hat{\omega}$ es la diferencia estimada entre las frecuencias naturales para el eje de accionamiento y el eje de detección.

El conjunto de valores identificados en la operación 604 para el conjunto de parámetros en el conjunto de ecuaciones para el sesgo del giroscopio puede usarse para estimar el sesgo del giroscopio para cualquier ángulo de accionamiento. En particular, pueden estimarse el sesgo en fase y el sesgo en cuadratura para cualquier ángulo de accionamiento.

- 20 Además, en estos ejemplos ilustrativos, el ángulo de acimut estimado, $\hat{\theta}_{\omega 0}$, puede usarse para identificar el ángulo de accionamiento particular identificado en la operación 406 en la figura 4. Por ejemplo, el ángulo de accionamiento particular puede identificarse de la siguiente manera:

$$\varphi = 90 + \hat{\theta}_{\omega 0} = 90 + \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{q_0}{-q_{45}} \right) \quad (38)$$

Pueden usarse los valores estimados para a y b para resolver la siguiente ecuación para el ángulo de accionamiento:

$$-(1+a)\sin(2\varphi - 2\theta_\omega) + \frac{a+b}{4}\cos(2\varphi + 2\theta_\omega) - \frac{a}{ab-1}\cos(2\theta_\omega) = 0 \quad (39)$$

- 25 Todavía adicionalmente, la salida del giroscopio puede calibrarse durante el funcionamiento del giroscopio en la operación 408 en la figura 4 usando la siguiente ecuación:

$$\frac{B}{-c_0 \omega_x} = \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \sin(2\hat{\varphi}) + \frac{a+b}{2} \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) (1 - \cos(2\hat{\varphi})) - \frac{b(1 + \cos(2\hat{\varphi})) - a(1 - \cos(2\hat{\varphi}))}{\tau(1 - ab)} \quad (40)$$

Los diagramas de flujo y los diagramas de bloques en las diferentes realizaciones representadas ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de algunas implementaciones posibles de aparatos y métodos en una realización

5 ilustrativa. Con respecto a esto, cada bloque en los diagramas de flujo o los diagramas de bloques puede representar un módulo, segmento, función y/o una porción de una operación o etapa. Por ejemplo, uno o más de los bloques pueden implementarse como código de programa, en hardware o una combinación del código de programa y hardware. Cuando se implementan en hardware, el hardware puede adoptar la forma, por ejemplo, de circuitos integrados que se fabrican o configuran para realizar una o más operaciones en los diagramas de flujo o los diagramas de bloques.

10 En algunas implementaciones alternativas de una realización ilustrativa, la función o funciones indicadas en los bloques pueden producirse fuera del orden indicado en las figuras. Por ejemplo, en algunos casos, dos bloques mostrados en sucesión pueden ejecutarse de manera sustancialmente simultánea, o los bloques pueden realizarse algunas veces en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. Además, pueden añadirse otros bloques además de los bloques ilustrados en un diagrama de flujo o un diagrama de bloques.

Pasando ahora a la figura 7, se representa una ilustración de un sistema de procesamiento de datos según una realización ilustrativa. El sistema 700 de procesamiento de datos puede usarse para implementar el sistema 138 informático en la figura 1.

15 En este ejemplo ilustrativo, el sistema 700 de procesamiento de datos incluye un entramado 702 de comunicaciones, que proporciona comunicaciones entre una unidad 704 de procesador, una memoria 706, un almacenamiento 708 persistente, una unidad 710 de comunicaciones, una unidad 712 de entrada/salida (I/O) y un elemento 714 de visualización.

20 La unidad 704 de procesador sirve para ejecutar instrucciones para software que pueden cargarse en la memoria 706. La unidad 704 de procesador puede ser varios procesadores, un núcleo de múltiples procesadores o algún otro tipo de procesador, dependiendo de la implementación particular. "Varios", tal como se usa en el presente documento con referencia a un elemento, significa uno o más elementos. Además, la unidad 704 de procesador puede implementarse usando varios sistemas de procesadores heterogéneos en los que está presente un procesador principal con procesadores secundarios en un único chip. Como otro ejemplo ilustrativo, la unidad 704 de procesador puede ser un sistema de múltiples procesadores simétrico que contiene múltiples procesadores del mismo tipo.

25 La memoria 706 y el almacenamiento 708 persistente son ejemplos de dispositivos 716 de almacenamiento. Un dispositivo de almacenamiento es un elemento de hardware que puede almacenar información, tal como, por ejemplo, sin limitación, datos, código de programa en forma funcional y otra información adecuada o bien de manera temporal o bien de manera permanente. Los dispositivos 716 de almacenamiento también pueden denominarse dispositivos de almacenamiento legibles por ordenador en estos ejemplos. La memoria 706, en estos ejemplos, puede ser, por ejemplo, una memoria de acceso aleatorio o cualquier otro dispositivo de almacenamiento volátil o no volátil adecuado. El almacenamiento 708 persistente puede adoptar diversas formas, dependiendo de la implementación particular.

30 Por ejemplo, el almacenamiento 708 persistente puede contener uno o más componentes o dispositivos. Por ejemplo, el almacenamiento 708 persistente puede ser un disco duro, una memoria flash, un disco óptico regrabable, una cinta magnética regrabable o alguna combinación de los anteriores. Los medios usados por el almacenamiento 708 persistente también pueden ser extraíbles. Por ejemplo, puede usarse un disco duro extraíble para el almacenamiento 708 persistente.

35 La unidad 710 de comunicaciones, en estos ejemplos, proporciona comunicaciones con otros dispositivos o sistemas de procesamiento de datos. En estos ejemplos, la unidad 710 de comunicaciones es una tarjeta de interfaz de red. La unidad 710 de comunicaciones puede proporcionar comunicaciones mediante el uso de cualquiera de o ambos enlaces de comunicaciones físicos e inalámbricos.

40 La unidad 712 de entrada/salida permite la entrada y salida de datos con otros dispositivos que pueden estar conectados al sistema 700 de procesamiento de datos. Por ejemplo, la unidad 712 de entrada/salida puede proporcionar una conexión para la entrada de usuario a través de un teclado, un ratón y/o algún otro dispositivo de entrada adecuado. Además, la unidad 712 de entrada/salida puede enviar una salida a una impresora. El elemento 714 de visualización proporciona un mecanismo para visualizar información a un usuario.

45 Instrucciones para el sistema operativo, aplicaciones y/o programas pueden estar ubicadas en los dispositivos 716 de almacenamiento, que están en comunicación con la unidad 704 de procesador a través del entramado 702 de comunicaciones. En estos ejemplos ilustrativos, las instrucciones están en una forma funcional en el almacenamiento 708 persistente. Estas instrucciones pueden cargarse en la memoria 706 para su ejecución por la unidad 704 de procesador. Los procedimientos de las diferentes realizaciones pueden realizarse mediante la unidad 704 de procesador usando instrucciones implementadas por ordenador, que pueden estar ubicadas en una memoria, tal como la memoria 706.

50 Estas instrucciones se denominan código de programa, código de programa utilizable por ordenador o código de programa legible por ordenador que puede leerse y ejecutarse por un procesador en la unidad 704 de procesador. El código de programa en las diferentes realizaciones puede implementarse en diferentes medios de almacenamiento legibles por ordenador o físicos, tales como la memoria 706 o el almacenamiento 708 persistente.

El código 718 de programa está ubicado en una forma funcional en medios 720 legibles por ordenador que pueden extraerse de manera selectiva y pueden cargarse en el, o transferirse al, sistema 700 de procesamiento de datos para su ejecución por la unidad 704 de procesador. El código 718 de programa y los medios 720 legibles por ordenador forman un producto 722 de programa informático en estos ejemplos. En un ejemplo, los medios 720 legibles por ordenador pueden ser medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador o medios 726 de señal legibles por ordenador.

Los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador pueden incluir, por ejemplo, un disco óptico o magnético que se inserta o se coloca en un disco u otro dispositivo que forma parte del almacenamiento 708 persistente para su transferencia a un dispositivo de almacenamiento, tal como un disco duro, que forma parte del almacenamiento 708 persistente. Los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador también pueden adoptar la forma de un almacenamiento persistente, tal como un disco duro, una memoria miniatura o una memoria flash, que se conecta al sistema 700 de procesamiento de datos. En algunos casos, los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador pueden no ser extraíbles del sistema 700 de procesamiento de datos.

En estos ejemplos, los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador son un dispositivo de almacenamiento físico o tangible usado para almacenar el código 718 de programa en vez de un medio que propaga o transmite el código 718 de programa. Los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador también se denominan dispositivo de almacenamiento tangible legible por ordenador o dispositivo de almacenamiento físico legible por ordenador. Dicho de otro modo, los medios 724 de almacenamiento legibles por ordenador son unos medios que puede tocar una persona.

Alternativamente, el código 718 de programa puede transferirse al sistema 700 de procesamiento de datos usando los medios 726 de señal legibles por ordenador. Los medios 726 de señal legibles por ordenador pueden ser, por ejemplo, una señal de datos propagada que contiene el código 718 de programa. Por ejemplo, los medios 726 de señal legibles por ordenador pueden ser una señal electromagnética, una señal óptica y/o cualquier otro tipo adecuado de señal. Estas señales pueden transmitirse sobre enlaces de comunicaciones, tales como enlaces de comunicaciones inalámbricos, cable de fibra óptica, cable coaxial, un hilo y/o cualquier otro tipo adecuado de enlace de comunicaciones. Dicho de otro modo, el enlace de comunicaciones y/o la conexión pueden ser físicos o inalámbricos en los ejemplos ilustrativos.

En algunas realizaciones ilustrativas, el código 718 de programa puede descargarse por una red al almacenamiento 708 persistente a partir de otro dispositivo o sistema de procesamiento de datos a través de los medios 726 de señal legibles por ordenador para su uso dentro del sistema 700 de procesamiento de datos. Por ejemplo, un código de programa almacenado en un medio de almacenamiento legible por ordenador en un sistema de procesamiento de datos de servidor puede descargarse por una red desde el servidor hasta el sistema 700 de procesamiento de datos. El sistema de procesamiento de datos que proporciona el código 718 de programa puede ser un ordenador servidor, un ordenador cliente o algún otro dispositivo que puede almacenar y transmitir el código 718 de programa.

No se pretende que los diferentes componentes ilustrados para el sistema 700 de procesamiento de datos proporcionen limitaciones físicas o de arquitectura a la manera en la que pueden implementarse diferentes realizaciones. Las diferentes realizaciones ilustrativas pueden implementarse en un sistema de procesamiento de datos que incluye componentes además, o en lugar, de los ilustrados para el sistema 700 de procesamiento de datos. Otros componentes mostrados en la figura 7 pueden variarse con respecto a los ejemplos ilustrativos mostrados. Las diferentes realizaciones pueden implementarse usando cualquier sistema o dispositivo de hardware que puede ejecutar código de programa. Como un ejemplo, el sistema de procesamiento de datos puede incluir componentes orgánicos integrados con componentes inorgánicos y/o puede estar compuesto totalmente por componentes orgánicos excluyendo un ser humano. Por ejemplo, un dispositivo de almacenamiento puede estar compuesto por un semiconductor orgánico.

En otro ejemplo ilustrativo, la unidad 704 de procesador puede adoptar la forma de una unidad de hardware que tiene circuitos que están fabricados o configurados para un uso particular. Este tipo de hardware puede realizar operaciones sin necesidad de que se cargue código de programa en una memoria a partir de un dispositivo de almacenamiento para configurarse para realizar las operaciones.

Por ejemplo, cuando la unidad 704 de procesador adopta la forma de una unidad de hardware, la unidad 704 de procesador puede ser un sistema de circuito, un circuito integrado específico de aplicación (ASIC), un dispositivo lógico programable o algún otro tipo adecuado de hardware configurado para realizar varias operaciones. Con un dispositivo lógico programable, el dispositivo está configurado para realizar las varias operaciones. El dispositivo puede reconfigurarse en un momento posterior o configurarse de manera permanente para realizar las varias operaciones. Los ejemplos de dispositivos lógicos programables incluyen, por ejemplo, una matriz lógica programable, una matriz lógica programable en campo, una matriz de compuertas programable en campo y otros dispositivos de hardware adecuados. Con este tipo de implementación, el código 718 de programa puede omitirse porque los procedimientos para las diferentes realizaciones se implementan en una unidad de hardware.

En todavía otro ejemplo ilustrativo, la unidad 704 de procesador puede implementarse usando una combinación de procesadores encontrados en ordenadores y unidades de hardware. La unidad 704 de procesador puede tener varias unidades de hardware y varios procesadores que están configurados para ejecutar el código 718 de programa. Con este

ejemplo representado, algunos de los procedimientos pueden implementarse en las varias unidades de hardware, mientras que otros procedimientos pueden implementarse en los varios procesadores.

5 En otro ejemplo, puede usarse un sistema de bus para implementar el entramado 702 de comunicaciones y puede estar compuesto por uno o más buses, tales como un bus de sistema o un bus de entrada/salida. Evidentemente, el sistema de bus puede implementarse usando cualquier tipo adecuado de arquitectura que proporciona una transferencia de datos entre diferentes componentes o dispositivos acoplados al sistema de bus.

10 Adicionalmente, una unidad de comunicaciones puede incluir varios dispositivos que transmiten datos, reciben datos o transmiten y reciben datos. Una unidad de comunicaciones puede ser, por ejemplo, un módem o un adaptador de red, dos adaptadores de red o alguna combinación de los mismos. Además, una memoria puede ser, por ejemplo, la memoria 706, o una memoria caché, tal como se encuentra en un concentrador de controlador de memoria e interfaz, que puede estar presente en el entramado 702 de comunicaciones.

15 La descripción de las diferentes realizaciones ilustrativas se ha presentado con fines de ilustración y descripción y no se pretende que sea exhaustiva o se limite a las realizaciones en la forma dada a conocer. Muchas modificaciones y variaciones resultarán evidentes para los expertos habituales en la técnica. Además, diferentes realizaciones ilustrativas pueden proporcionar diferentes características en comparación con otras realizaciones ilustrativas. La realización o realizaciones seleccionadas se eligen y describen con el fin de explicar mejor los principios de las realizaciones, la aplicación práctica y para permitir que otros expertos habituales en la técnica entiendan la divulgación para diversas realizaciones con diversas modificaciones según sean adecuadas para el uso particular contemplado.

REIVINDICACIONES

1. Método para compensar el sesgo (101) de un giroscopio (106) vibratorio de Coriolis que tiene una unidad (130) de control, un armazón (112) y un elemento (110) unido al armazón (122) mediante un sistema (116) de resortes que restringe el movimiento del elemento (110) al interior de un plano (124) formado por un primer eje (120) y un segundo eje (122), en el que la unidad (130) de control está dispuesta para mover el elemento (110) de manera lineal en una dirección a lo largo de un eje (121) de accionamiento, comprendiendo el método:
- 5 generar medidas (161) de sesgo en una dirección a lo largo de un eje (123) de detección para una pluralidad de ángulos (164) de accionamiento usando el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis, en el que cada ángulo de accionamiento en la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento es el ángulo del eje (121) de accionamiento con respecto al primer eje (120), y en el que el eje (121) de accionamiento y el eje (123) de detección que es sustancialmente ortogonal al eje (121) de accionamiento forman un sistema de referencia rotado con respecto a un sistema de referencia formado por el primer eje (120) y el segundo eje (122) que es ortogonal al primer eje (120), siendo la rotación del sistema de referencia rotado alrededor de un tercer eje (126) que es sustancialmente perpendicular al plano (124) formado por el primer eje (120) y el segundo eje (122);
- 10 identificar un conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando un modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis en el que el conjunto de ecuaciones incluye un conjunto de parámetros (158) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis; e
- 15 identificar un conjunto de valores (160) para el conjunto de parámetros (158) usando las medidas (161) de sesgo, un algoritmo (162) iterativo y el conjunto de ecuaciones (140).
- 20 2. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis comprende:
- 25 identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y una suposición (146) de que una velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero.
3. Método según la reivindicación 1, que comprende además:
- estimar el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis a un ángulo de accionamiento seleccionado usando el conjunto de ecuaciones (140) con el conjunto de valores (160) para el conjunto de parámetros (158) para formar un sesgo estimado.
- 30 4. Método según la reivindicación 3, que comprende además:
- restar el sesgo estimado a partir de una medida generada por el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis para el ángulo de accionamiento seleccionado para compensar sustancialmente el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis.
- 35 5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 2-4, en el que la etapa de identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero comprende:
- identificar el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis;
- 40 modificar el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis basándose en la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero para formar un modelo (148) modificado; e
- identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (148) modificado para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis.
- 45 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 2-4, en el que la etapa de identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero comprende:
- 50 identificar una primera ecuación (150) en el conjunto de ecuaciones para un sesgo (154) en fase del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, en el que el sesgo (154) en fase es la porción del sesgo (101) que está sustancialmente en fase con la velocidad lineal de las vibraciones de giroscopio (102); e

- identificar una segunda ecuación (152) en el conjunto de ecuaciones (140) para un sesgo (156) en cuadratura del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, en el que el sesgo (156) en cuadratura es la porción del sesgo (101) que está sustancialmente en cuadratura con la velocidad lineal de las vibraciones de giroscopio (102).
- 5
7. Método según la reivindicación 6, que comprende además:
- identificar un ángulo de accionamiento al que el sesgo (156) en cuadratura del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, usando el conjunto de ecuaciones (140); y
- hacer funcionar el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis al ángulo de accionamiento identificado.
- 10
8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que la etapa de generar las medidas (161) de sesgo para la pluralidad de ángulos de accionamiento usando el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis comprende:
- generar las medidas (161) de sesgo para la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento usando el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis, en el que la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento incluye ángulos seleccionados de un intervalo de entre aproximadamente 0 grados y aproximadamente 360 grados con respecto al primer eje (120).
- 15
9. Aparato que comprende:
- un sistema de compensación para compensar el sesgo (101) de un giroscopio (106) (136) vibratorio de Coriolis configurado para:
- recibir medidas (161) de sesgo en una dirección a lo largo de un eje (123) de detección para una pluralidad de ángulos (164) de accionamiento a partir del giroscopio (106) vibratorio de Coriolis que tiene una unidad (130) de control, un armazón (112) y un elemento (110) unido al armazón (122) mediante un sistema (116) de resortes que restringe el movimiento del elemento (110) al interior de un plano (124) formado por un primer eje (120) y un segundo eje (122), en el que la unidad (130) de control está dispuesta para mover el elemento (110) de manera lineal en una dirección a lo largo de un eje (121) de accionamiento, en el que cada ángulo de accionamiento en la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento es el ángulo del eje (121) de accionamiento con respecto al primer eje (120), y en el que el eje (121) de accionamiento y el eje (123) de detección que es sustancialmente ortogonal al eje (121) de accionamiento forman un sistema de referencia rotado con respecto a un sistema de referencia formado por el primer eje (120) y el segundo eje (122) que es ortogonal al primer eje (120), siendo la rotación del sistema de referencia rotado alrededor de un tercer eje (126) que es sustancialmente perpendicular a un plano (124) formado por el primer eje (120) y el segundo eje (122);
- 20
- 25
- 30
- identificar un conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando un modelo para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis en el que el conjunto de ecuaciones (140) incluye un conjunto de parámetros (158) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis; e
- identificar un conjunto de valores (160) para el conjunto de parámetros (158) usando las medidas (161) de sesgo, un algoritmo (162) iterativo y el conjunto de ecuaciones (140).
- 35
10. Aparato según la reivindicación 9, en el que al estar configurado para identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis, el sistema (136) de compensación está configurado para identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y una suposición (146) de que una velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero.
- 40
11. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 9 o 10, en el que el sistema (136) de compensación está configurado además para estimar el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis a un ángulo de accionamiento seleccionado usando el conjunto de ecuaciones (140) con el conjunto de valores (160) para el conjunto de parámetros (158) para formar un sesgo estimado.
- 45
12. Aparato según la reivindicación 11, en el que el sistema (136) de compensación está configurado además para restar el sesgo (101) estimado a partir de una medida generada por el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis para el ángulo de accionamiento seleccionado para compensar sustancialmente el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis.
- 50
13. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 10-12, en el que al estar configurado para identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, el sistema (136) de compensación está configurado para:
- identificar el modelo (142) para el movimiento del giroscopio vibratorio de Coriolis;

modificar el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis basándose en la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero para formar un modelo (148) modificado; e

5 identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (148) modificado para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis.

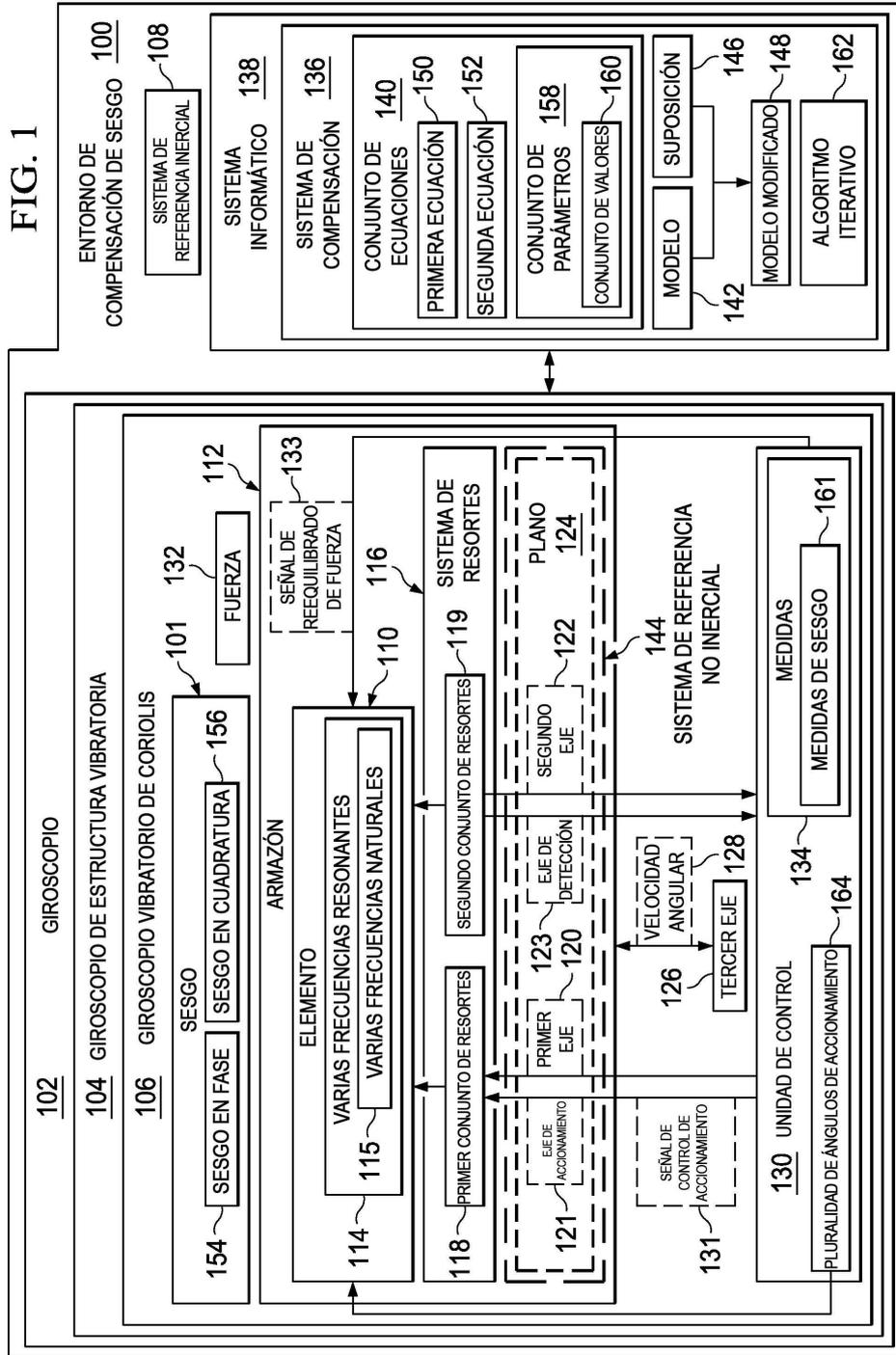
14. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 10-12, en el que al estar configurado para identificar el conjunto de ecuaciones (140) para el sesgo (101) del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, el sistema (136) de compensación está configurado para:

10 identificar una primera ecuación (150) en el conjunto de ecuaciones (140) para un sesgo (154) en fase del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, en el que el sesgo (154) en fase es la porción del sesgo (101) que está sustancialmente en fase con la velocidad lineal de las vibraciones de giroscopio (102); e

15 identificar una segunda ecuación (152) en el conjunto de ecuaciones (140) para un sesgo (156) en cuadratura del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis usando el modelo (142) para el movimiento del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis y la suposición (146) de que la velocidad inercial para el giroscopio (102) vibratorio de Coriolis es sustancialmente cero, en el que el sesgo (156) en cuadratura es la porción del sesgo (101) que está sustancialmente en cuadratura con la velocidad lineal de las vibraciones de giroscopio (102).

20 15. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 9-14, en el que al estar configurado para recibir las medidas (161) de sesgo para la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento a partir del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis, el sistema (136) de compensación está configurado para recibir las medidas (161) de sesgo para la pluralidad de ángulos (164) de accionamiento a partir del giroscopio (102) vibratorio de Coriolis, en el que la pluralidad de ángulos de accionamiento incluye ángulos seleccionados de un intervalo de entre aproximadamente 0 grados y aproximadamente

25 360 grados con respecto al primer eje (120).



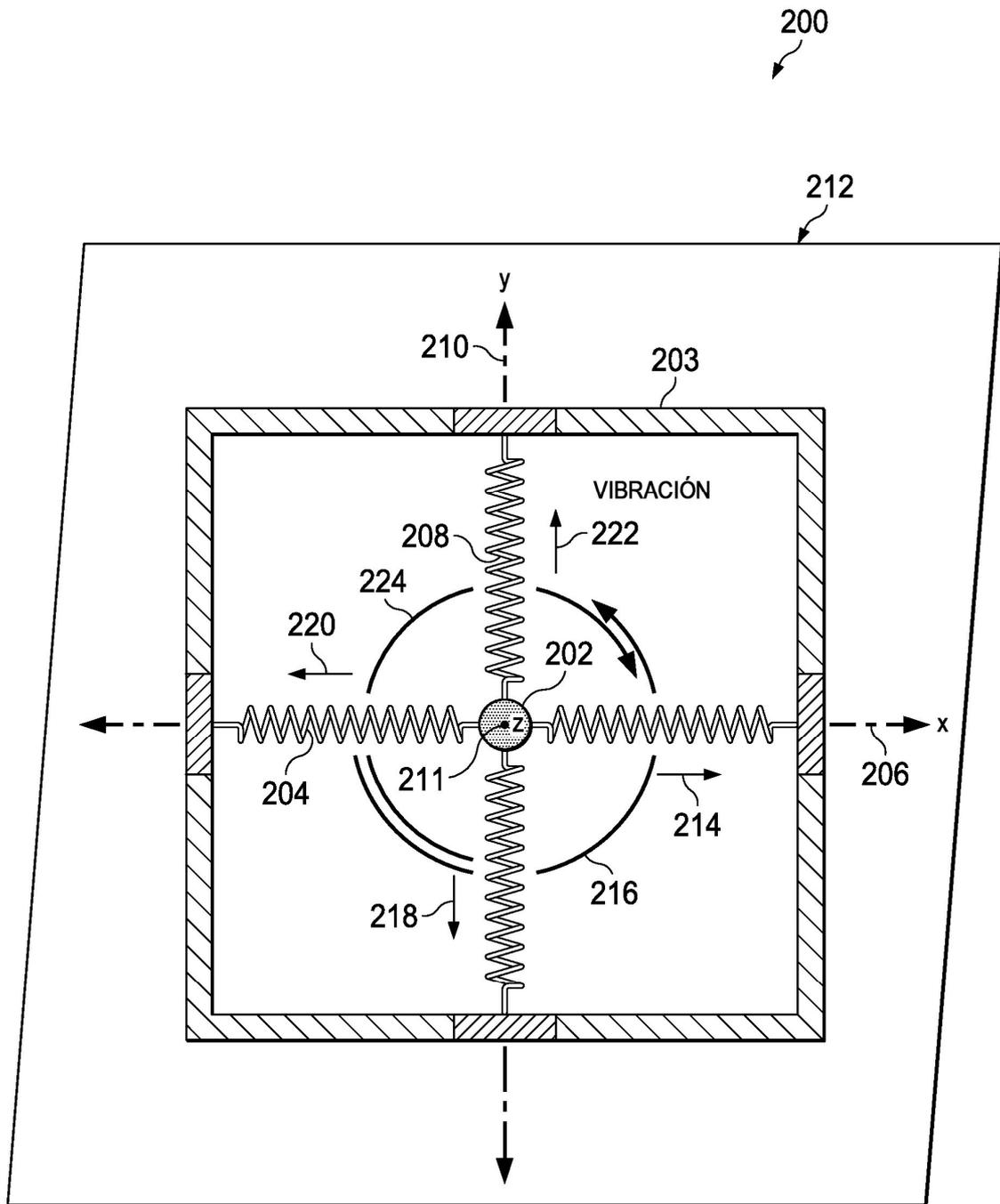


FIG. 2

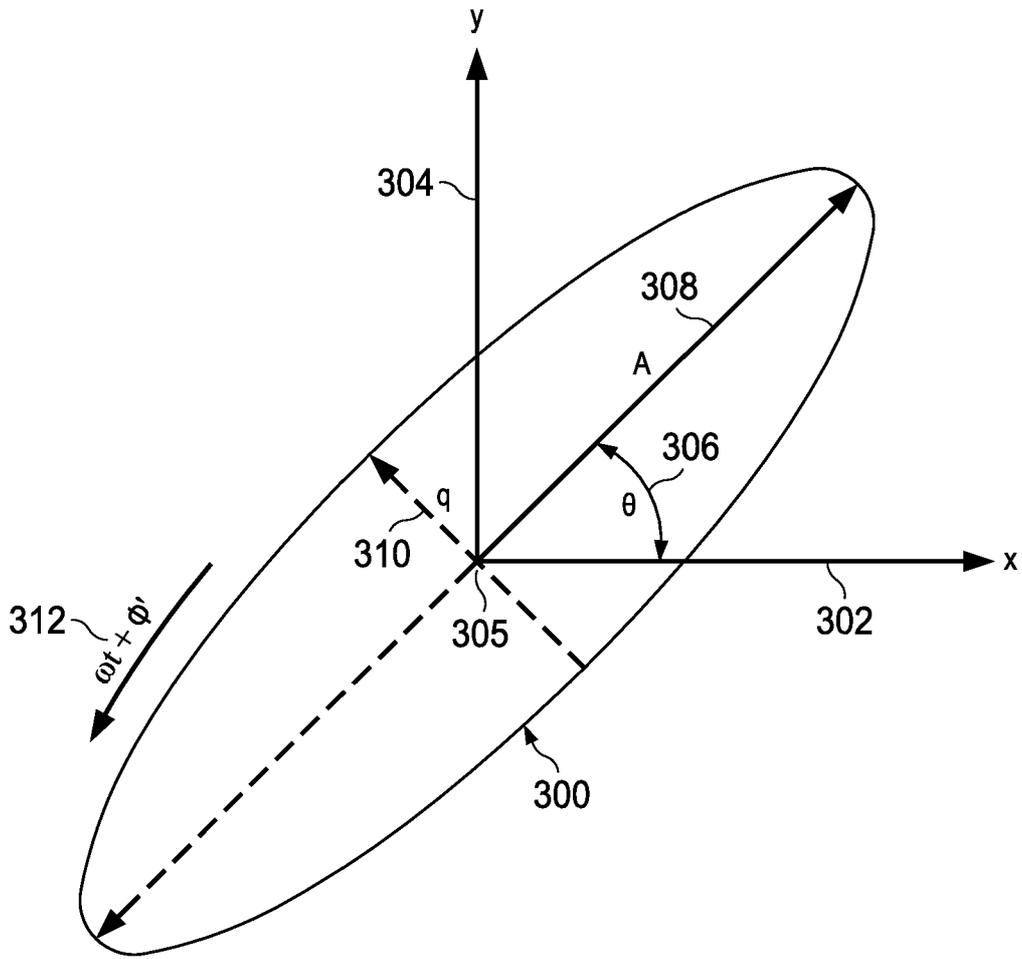


FIG. 3

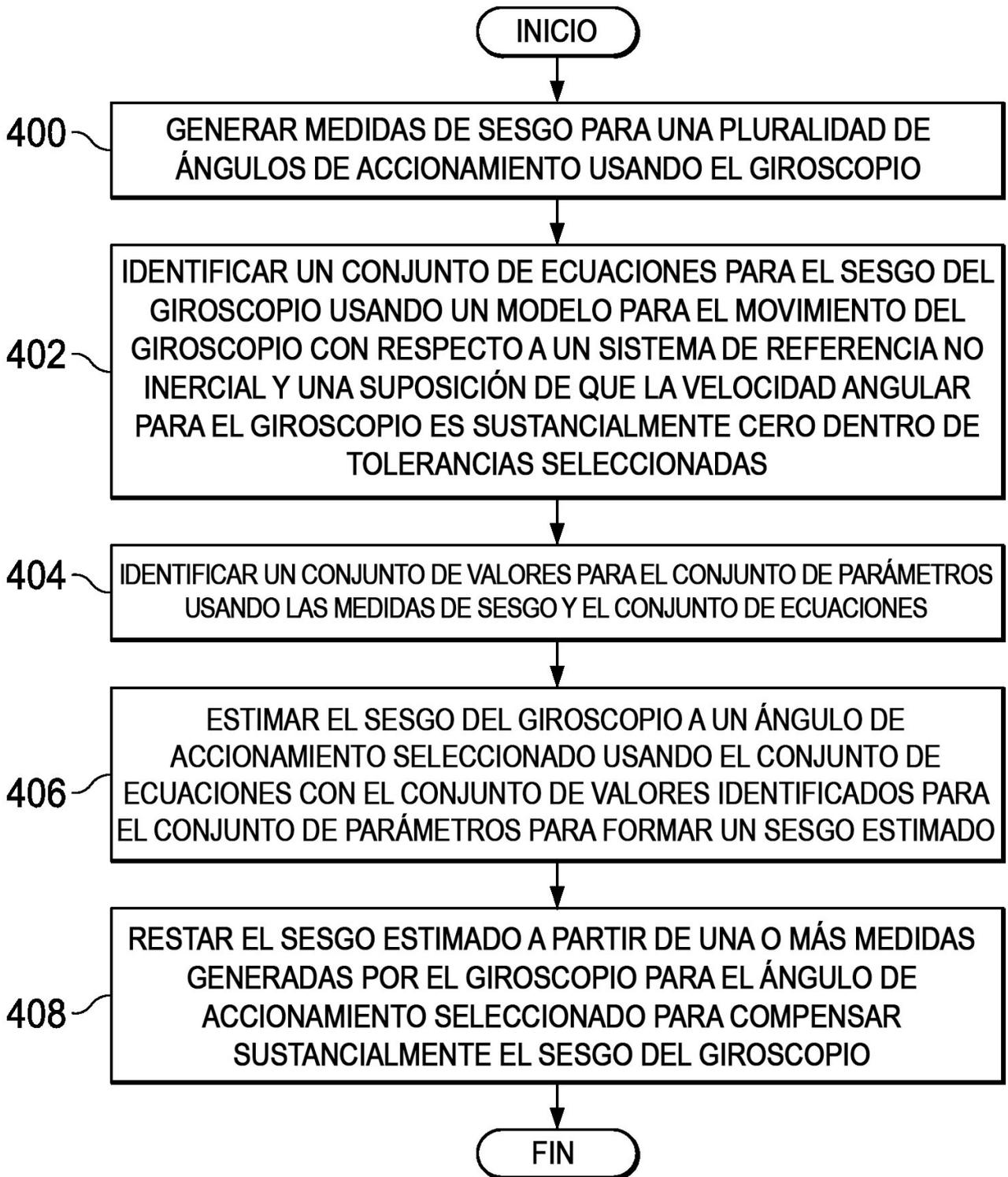


FIG. 4

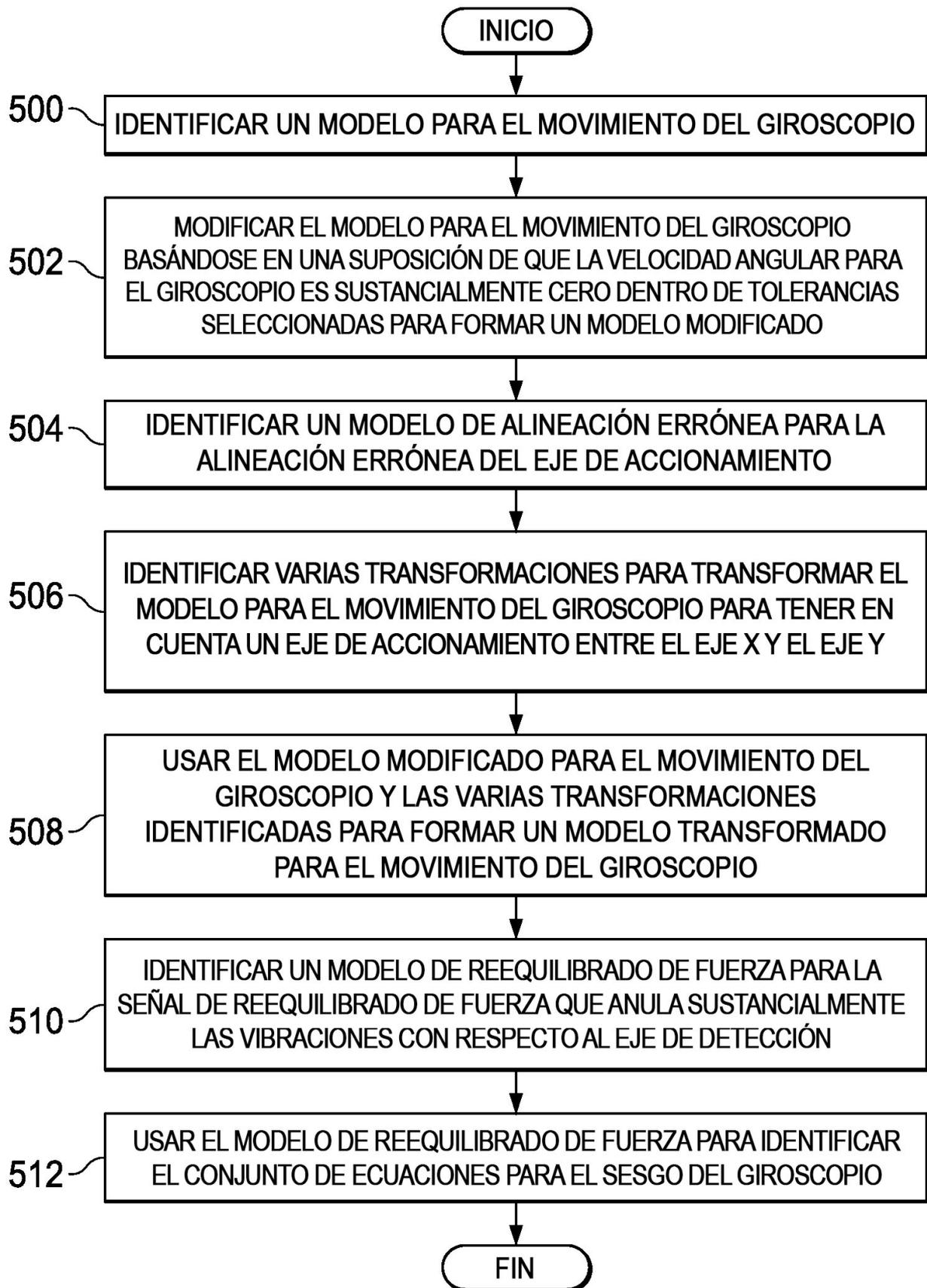


FIG. 5

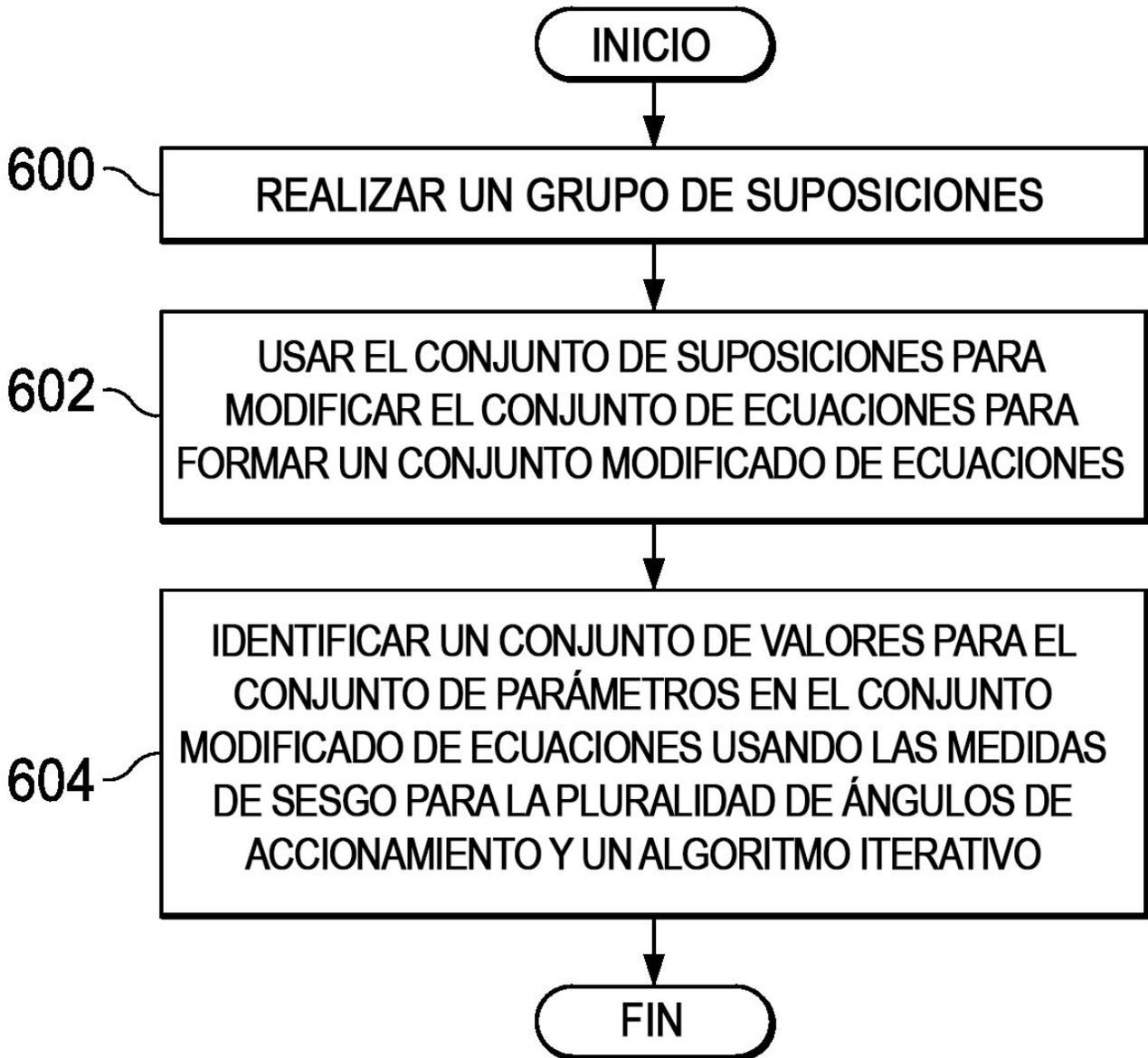


FIG. 6

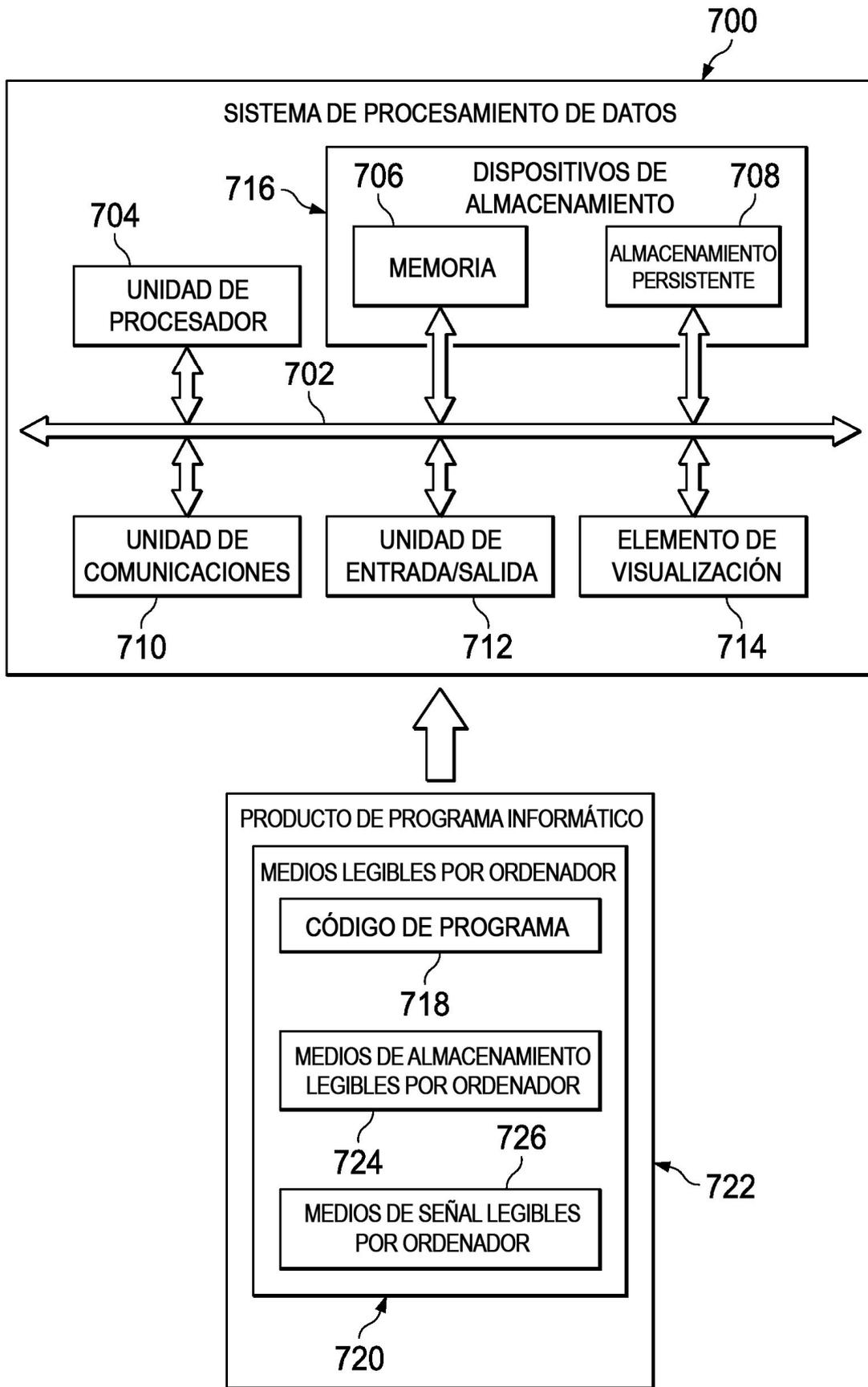


FIG. 7