

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 931 044**

51 Int. Cl.:

A61B 34/20 (2006.01)

G01C 25/00 (2006.01)

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 17/38 (2006.01)

A61B 34/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2016** **E 20205982 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.09.2022** **EP 3795109**

54 Título: **Un método de calibración de una unidad de medición inercial**

30 Prioridad:

16.12.2015 US 201562268175 P

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

23.12.2022

73 Titular/es:

TECHMAH MEDICAL LLC (100.0%)
2099 Thunderhead Road, Suite 302
Knoxville, TN 37922, US

72 Inventor/es:

MAHFOUZ, MOHAMED

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 931 044 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

Un método de calibración de una unidad de medición inercial

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

- 5 La presente solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud de Patente Provisional de EE. UU. N° de Serie 62/268.175, titulada "IMU CALIBRATION", presentada el 16 de diciembre de 2015.

Introducción a la invención

La presente descripción está dirigida a métodos y técnicas para calibrar unidades de medición inercial (IMU) y, más específicamente, a métodos y técnicas que implican calibrar las IMU para dar cuenta de entornos locales dentro de los cuales operan las IMU.

- 10 El documento US 2013/217998 A1 describe un método de calibración de una unidad de medición inercial que comprende una pluralidad de acelerómetros, una pluralidad de giroscopios y una pluralidad de magnetómetros.

El documento WO 2015/089118 A1 describe un sistema de navegación quirúrgica que comprende una unidad de medición inercial.

- 15 Un problema común en la técnica comercial con las IMU es la precisión de los datos recopilados cuando ocurren anomalías de movimiento o magnéticas. Este problema no es significativo en campos donde se utilizan las IMU para hacer el seguimiento del movimiento de un cuerpo y su orientación angular donde los cambios en la posición del cuerpo del orden de centímetros o milímetros no afectan a la utilidad general de las IMU. Lo mismo se puede decir de estos campos donde la posición angular cambia unos pocos grados, pero las IMU no reflejan este cambio. Sin embargo, no se puede decir lo mismo en otros campos donde la precisión es necesaria. En estos campos precisos, 20 las IMU no se han utilizado porque no se ha encontrado ninguna solución competente para abordar las anomalías de movimiento y magnéticas que pueden ocurrir dentro de la zona de uso. Y la mayoría de las patentes de la técnica anterior que hacen referencia a las IMU nunca dan a entender problemas de anomalías, y mucho menos proporcionan una solución para lidiar con estas anomalías. Uno de los principales problemas con las IMU de la técnica anterior proviene de la falta de capacidad para generar datos que no consideren o den cuenta de las 25 anomalías magnéticas resultantes de objetos ferromagnéticos en las proximidades de la IMU. De esta forma, cuando los objetos ferromagnéticos están en las proximidades de la IMU, ocurre una deriva posicional que llega a ser aditiva y rápidamente da como resultado datos que son cualquier cosa menos precisos.

- En respuesta a la ausencia de soluciones para lidiar con las anomalías de movimiento y magnéticas que pueden ocurrir dentro de la zona de uso de una IMU, donde la precisión es primordial, el presente inventor ha desarrollado 30 métodos y las IMU resultantes que dan cuenta de estas anomalías y proporcionan mediciones precisas de las IMU. De esta forma, el presente inventor permite que las IMU del mundo real se utilicen en campos donde las IMU no eran factibles anteriormente. En particular, el presente inventor desarrolló una secuencia de calibración para una IMU que tiene en cuenta la desalineación potencial de la estructura de la IMU en sí misma, además de calibrar la IMU fuera de un campo local y calibrar la IMU en un campo local de uso previsto. De esta forma, el presente inventor 35 ha desarrollado IMU que pueden dar cuenta de anomalías de movimiento y magnéticas, proporcionando por ello mediciones precisas indicativas de cambios de posición, orientación y magnetismo.

Breve descripción de los dibujos

La FIG. 1 es una representación gráfica de un dispositivo ferromagnético montado en una unidad de medición inercial y que se hace girar alrededor de un eje X.

- 40 La FIG. 2 es una representación gráfica del dispositivo ferromagnético montado en la unidad de medición inercial de la FIG. 1, que se hace girar alrededor de un eje Y.

La FIG. 3 es una representación gráfica del dispositivo ferromagnético montado en la unidad de medición inercial de la FIG. 1, que se hace girar alrededor de un eje Z.

Descripción detallada

- 45 Las realizaciones ejemplares de la presente descripción se describen e ilustran a continuación para abarcar unidades de medición inercial y métodos de calibración de las mismas. Por supuesto, será evidente para los expertos en la técnica que las realizaciones tratadas a continuación son de naturaleza ejemplar y se pueden reconfigurar dentro del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

- 50 Muchos dispositivos actuales hacen uso de componentes de sensores integrados para capturar y hacer el seguimiento de información relacionada con el uso, la ubicación y el estado del dispositivo. Uno de tales sistemas, la unidad de medición inercial (IMU), se usa para hacer un seguimiento del movimiento de objetos. Un paquete común de una IMU comprende un único circuito integrado (IC) que consta de múltiples sensores de inercia, que pueden ser una combinación de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Estos tres tipos de sensores también se pueden

separar en IC individuales introducidos en la misma placa de circuito. Estos dos casos (IC único y múltiples IC) se pueden considerar iguales con los propósitos de la presente descripción.

Para todos de tales sensores de la IMU, se puede realizar un paso de calibración para asegurar la referencia y la operación correctas en el entorno local. Por ejemplo, los acelerómetros se pueden calibrar para determinar una referencia con respecto a la dirección de la gravedad y los giroscopios se pueden calibrar para alguna velocidad de rotación conocida. La calibración de magnetómetro es más compleja, en la medida que el proceso requiere el conocimiento de la intensidad y dirección del campo magnético local en una multitud de orientaciones de magnetómetro. La calibración de entorno local se puede llevar a cabo a mano o a máquina. Las consideraciones mínimas para la calibración de entorno local deberían implicar la maniobra de la IMU alrededor de los tres ejes ortogonales de la IMU y un período estacionario.

Para aplicaciones que requieren una calibración altamente fiable y reproducible de una IMU, se puede usar una máquina de calibración. Se puede construir una máquina de calibración de modo que no introduzca distorsión magnética adicional en las IMU. La máquina de calibración debería producir movimiento para la calibración de todos los sensores de la IMU así como movimiento con el fin de que un algoritmo inspeccione la calidad de la calibración.

El proceso para calibrar mediciones de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros no calibrados de una IMU se describe de aquí en adelante. Este proceso ejemplar es aplicable a una única IMU o múltiples IMU introducidas en la misma placa de circuito, donde se pueden calibrar simultáneamente todos los sensores (acelerómetros, giroscopios y magnetómetros no calibrados).

De forma ejemplar, el procedimiento de calibración puede incluir las siguientes rutinas para permitir que datos adecuados calculen y verifiquen la calibración. Esta calibración ejemplar comprende cuatro etapas que incluyen, sin limitación: (1) calibrar los giroscopios; (2) calibrar la rutina de los magnetómetros; (3) calibrar la rutina del acelerómetro; y (4) calibrar la rutina de comprobación/validación.

La calibración de los giroscopios de cada IMU debería proporcionar que los giroscopios estén estacionarios durante una cantidad de tiempo establecida. Como parte de la calibración de los giroscopios, el presente proceso es determinar el sesgo del giroscopio mediante la media aritmética, como se expone en la Ecuación 1 inmediatamente a continuación:

$Gyro_{mean_i}[\dots] = \overline{DATA_{gyro, gyro\ calibration}}, i = 1, 2, \dots$	Ecuación 1
---	------------

La calibración de los magnetómetros de cada IMU debería implicar la rotación de la IMU alrededor de todos sus ejes ortogonales. De esta forma, este proceso de calibración de magnetómetro primero determina la distorsión de hierro blando y duro usando la función de Ajuste Elipsoidal (EF_fun) multidimensional expuesta en la Ecuación 2 inmediatamente a continuación:

$SFe_{orig_i}, HFe_{orig_i} = EF_{fun}(DATA_{mag_i}[Mag\ calibration\ begin \rightarrow end]), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 2
---	------------

donde: SFe_{orig} es la transformación de elipsoide a esfera, y HFe_{orig} es el sesgo de sensor y local.

Los datos resultantes de la Ecuación 2 entonces se procesan usando la Ecuación 3, mostrada inmediatamente a continuación:

$procMAG_{orig_i} = processMag(DATA_{mag_i}[Acc\ calibration\ begin \rightarrow end\ of\ checking\ routine], SFe_{orig_i}, HFe_{orig_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 3
--	------------

A partir de entonces, se calibran las diferencias de alineación entre los magnetómetros. Al hacerlo así, se puede utilizar la Ecuación 4, con la suposición de que todos los magnetómetros están alineados con una alineación de referencia usando esta ecuación. Alternativamente, los magnetómetros se pueden alinear con una alineación de referencia diferente si se desea. En la Ecuación 4, $TMA_{g_{ij}}$ representa la transformación de alineación del magnetómetro "j" al magnetómetro de referencia "i".

$TMAG_{ij} = procMAG_{orig_j} \setminus procMAG_{orig_i}, i = 1, j = 2, 3 \dots$	Ecuación 4
--	------------

La calibración de los acelerómetros de cada IMU debería implicar la rotación de la IMU alrededor de dos ejes perpendiculares a la gravedad. De esta forma, la calibración de acelerómetro se calcula con la función de Ajuste Elipsoidal (EF_fun) multidimensional expuesta inmediatamente a continuación como la Ecuación 5:

$AccScale_{orig_i}, AccBias_{orig_i} = EF_{fun}(DATA_{Acc_i}[Acc\ calibration\ begin \rightarrow end]), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 5
--	------------

5 La calibración de la rutina de comprobación debería implicar la rotación de la IMU alrededor del eje colineal con la gravedad. El resultado es mejor si el movimiento de la rutina de comprobación se realiza múltiples veces en diferentes ángulos con respecto a la gravedad.

10 Después de calibrar los sensores, uno puede tener en cuenta los errores de fabricación y de colocación del conjunto de IC para extraer o dar cuenta de estos errores. De esta forma, la presente descripción incluye una secuencia de calibración que tiene en cuenta cualquier mala alineación entre los sensores, que se calibran según la Ecuación 6-10 (aplicando los parámetros de calibración) proporcionada inmediatamente a continuación. Al hacerlo así, todos los datos de sensor recogidos durante la calibración se pueden someter a estas ecuaciones/parámetros de calibración.

$procGyro_i = processGyro(DATA_{gyro_i}, Gyro_{bias_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 6
$procAcc_i = processAcc(DATA_{Acc_i}, Acc_{bias_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 7
$procMAG_i = processMag(DATA_{mag_i}, SFe_{orig_i}, HFe_{orig_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 8
Continuando con el ejemplo alineando todos los magnetómetros con el primero,	
$alignProcMAG_j = procMAG_j * TMAG_{ij}, i = 1, j = 2, 3 \dots$	Ecuación 9
$alignProcMAG_i = procMAG_i$	Ecuación 10

15 Con múltiples IMU rígidamente fijadas juntas, las señales alineadas y calibradas deberían ser aproximadamente iguales entre cada tipo de sensor en el caso de que no haya ruido o sea ruido isotrópico (para el sensor).

20 A pesar de la calibración con el entorno local, los magnetómetros son especialmente propensos a una perturbación local transitoria. Específicamente, la introducción de fuentes ferromagnéticas adicionales o el movimiento de fuentes ferromagnéticas después de la calibración inicial (descrita anteriormente) puede distorsionar la señal de sensor y dar como resultado lecturas inexactas. Los estados de distorsión se pueden clasificar como distorsión de hierro duro, que se causa principalmente por la introducción de materiales ferromagnéticos, tales como herramientas de acero que pueden desviar las líneas de campo y producir un desplazamiento en los sensores del magnetómetro, y la distorsión de hierro suave, que se causa por un campo magnético irregular (tal como imanes) que puede alterar la forma del campo magnético. Dado que estos dispositivos que causan distorsiones entrarán y saldrán del campo de aplicación (área de uso) de la IMU en orientaciones, posiciones y tiempos impredecibles, es deseable que estas distorsiones sean detectadas y se dé cuenta de ellas. A modo de ejemplo, un área donde las distorsiones son comunes es un quirófano durante un procedimiento quirúrgico. Más específicamente, los instrumentos quirúrgicos dentro de un quirófano se recolocan con frecuencia dentro del campo de operación en diferentes momentos y lugares dependiendo de la etapa del procedimiento quirúrgico, lo que necesariamente causa distorsiones del campo magnético. Se debería señalar, no obstante, que la descripción ejemplar no se limita a la calibración de IMU para navegación quirúrgica o cualquier campo de uso particular. Más bien, la presente descripción es aplicable a la calibración de cualquier IMU en cualquier campo de uso donde puedan estar presentes distorsiones locales.

35 Hay dos partes esenciales para detectar la distorsión magnética transitoria. La primera parte es que la IMU debe comprender dos o más magnetómetros (que se pueden introducir en una placa de circuito común). Los magnetómetros se calibran y alinean en base a las enseñanzas de calibración anteriores. La segunda parte es el algoritmo de detección, que consta de dos procesos: (1) la extracción de parámetros para la detección de distorsión, que se calculan a partir de los datos de calibración; y (2) el uso de los parámetros extraídos en datos de IMU capturados para comprobar si está presente la distorsión.

Lo que sigue es una explicación detallada para calcular parámetros de umbral de distorsión apropiados. En general, uno puede usar un algoritmo para este cálculo que puede hacer uso de las siguientes suposiciones: (1) el movimiento de la IMU (o la falta de movimiento) es detectable por todas las IMU (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro); (2) el ángulo y la longitud de los magnetómetros calibrados deberían tener valores aproximadamente idénticos; (3) los vectores de magnetómetro calibrado deberían ser de aproximadamente una unidad de magnitud; (4) el ángulo entre el vector de magnetómetro calibrado y el vector de acelerómetro calibrado no debería cambiar; (5) el radio de los magnetómetros calibrados debería ser aproximadamente igual a uno; y (6) los cuaterniones calculados usando diferentes magnetómetros deberían ser aproximadamente iguales.

Una desviación suficiente de la suposición 1 se considera una anomalía de movimiento y las desviaciones de las suposiciones 2-6 se consideran una anomalía magnética. Los parámetros para la detección de movimiento se calculan para cada sensor de IMU (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro) usando los datos recogidos durante la calibración de entorno local. Usando datos estacionarios y dinámicos, se calculan los umbrales de movimiento apropiados para cada sensor de IMU, de modo que la salida del sensor de IMU calibrado por encima del umbral indica que el sensor está en movimiento y por debajo del cual el sensor se puede considerar estacionario (véase la Ecuación 2). Se considera que ocurre una anomalía de movimiento como en la Tabla (2), que se describe con más detalle de aquí en adelante. En resumen, si un magnetómetro ha detectado movimiento, pero otros sensores no, se dice que existe una anomalía de movimiento.

Para la anomalía magnética, se usa una desviación de la suposición 2 para crear una función de coste, que se calcula como la magnitud de la diferencia de vectores ponderada con la derivación angular entre los vectores (véase el Algoritmo 1 y Algoritmo 4). Durante la calibración de entorno local, los valores esperados para la desviación de la unidad y de señales idénticas se calculan para formar una función de coste. El umbral se calcula a partir del valor de esta función de coste durante la calibración de entorno local (cuando no se presenta ninguna distorsión adicional). Luego, como parte de un proceso de detección de anomalías, cualquier valor de esta función de coste por encima del umbral se considera una anomalía magnética.

Para la suposición 3, la fuerza magnética se calcula como la media de las magnitudes combinadas (Algoritmo (5)), que sin ruido se espera que sea aproximadamente 1. Luego, como parte del proceso de detección de anomalías, cualquier valor fuera de la intensidad magnética calculada (incluyendo una tolerancia preestablecida) se considera una anomalía.

Para la suposición 4, la derivación se calcula como la derivación angular entre los vectores de magnetómetro y de acelerómetro (Algoritmo (6)). Luego, como parte del proceso de detección de anomalías, cualquier valor fuera del ángulo calculado (incluyendo una tolerancia preestablecida) se considera una anomalía.

Para la suposición 5, la desviación se calcula usando todas las lecturas de magnetómetro, junto con un ajuste previo de puntos artificiales, para estimar un radio del campo magnético usando una función de estimación elipsoidal como se muestra en el Algoritmo (7). Los puntos artificiales se usan para soportar el cálculo de la estimación. No obstante, si la IMU contiene más de 11 magnetómetros, no se necesita ningún punto artificial para resolver el radio. Luego, como parte del proceso de detección de anomalías, cualquier valor fuera de los radios calculados (incluyendo una tolerancia preestablecida) se considera una anomalía.

Para la suposición 6, la desviación se determina calculando primero la orientación de la IMU usando el algoritmo de fusión de sensor (por ejemplo, Filtro de Kalman Extendido) usando diferentes magnetómetros como entrada, y se calcula una diferencia angular entre la orientación de salida como se muestra en el Algoritmo (8). Luego, como parte del proceso de detección de anomalías, cualquier valor mayor que la diferencia angular con una tolerancia preestablecida se considera una anomalía.

Si ocurre una anomalía de movimiento o magnética, está presente alguna distorsión magnética de la que no se ha dado cuenta. Un sistema de alerta de distorsión proporciona realimentación que indica que la fiabilidad de la orientación informada por los sensores puede ser inexacta. Lo que sigue es una discusión más detallada de los algoritmos utilizados para detectar anomalías magnéticas y de movimiento.

La detección de anomalías se basa en tres categorías de detección. La primera es la detección de fallos de sensor, la segunda es la verificación de los radios del magnetómetro y la tercera son las discrepancias de salida de cuaterniones. La detección de fallos de sensor consta de las siguientes funciones: (i) anomalías de movimiento y magnéticas; (ii) fuerza magnética; y (iii) ángulo entre los vectores de magnetómetro y de acelerómetro. El siguiente método se usa para extraer valores de umbral (TV) de manera consistente para anomalías de movimiento y funciones de coste de la calibración. El método utiliza el Algoritmo (1) de la siguiente manera:

Algoritmo (1)

Iteration: **for** [beginning of gyro calibration → end of checking routines]

$$Gyro_{mean_i}[\dots] = \overline{procGyro_{current-kernel}^{current}}, i = 1, 2, \dots$$

$$Gyro_{std_i}[\dots] = std(procGyro[current - kernel \rightarrow current]), i = 1, 2, \dots$$

$$Acc_{std_i}[\dots] = std(procAcc_i[current - kernel \rightarrow current]), i = 1, 2, \dots$$

$$Mag_{std_i}[\dots] = std(alignProcMAG_i[current - kernel \rightarrow current]), i = 1, 2, \dots$$

$$lenDiff_{i,j}[\dots] = \frac{\sqrt{\sum_{axis} \left(\sum_{current-kernel}^{current} (alignProcMAG_i - alignProcMAG_j)^2 \right)}}{kernel}, i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

$$angDiff_{i,j}[\dots] = \frac{|1 - (alignProcMAG_{i,current-kernel}^{current} \cdot alignProcMAG_{j,current-kernel}^{current})|}{norm(alignProcMAG_{i,current-kernel}^{current}) \cdot norm(alignProcMAG_{j,current-kernel}^{current})}, i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

$$metricLenAng_{i,j}[\dots] = lenDiff_{i,j}[\dots] * angDiff_{i,j}[\dots], i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

$$currentMagVal[\dots] = \frac{1}{\max(i) \left(\sum \sqrt{\sum_{current-kernel}^{current} (alignProcMAG_i * alignProcMAG_j)} \right)}, i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

End

Una vez que se completa la iteración del Algoritmo (1), la μ y la σ de la función de coste se pueden determinar usando las Ecuaciones 11 y 12, que se enumeran inmediatamente a continuación.

$$\mu = \overline{currentMagVal}_{mag \text{ and } acc \text{ calibration}}$$

$$\delta = SSF1 * std(currentMagVal)_{mag \text{ and } acc \text{ calibration}}$$

Donde: (a) SSF1 es un factor de escala de sensibilidad; y,

(b) δ sirve como la tolerancia de detección basada en derivación estándar (es decir, cuántas desviaciones estándar se consideran aceptables lejos de la media).

Ecuación 11

Ecuación 12

El Algoritmo (2) se utiliza para calcular los estados de movimiento y no de movimiento (estacionario) para los sensores.

Algoritmo (2)

$$Stationary_{gyro_{std}} = \overline{Gyro_{std}}_{gyro \text{ calibration}}$$

$$Motion_{gyro_{std}} = \overline{Gyro_{std}}_{acc \text{ calibration}}$$

$$Stationary_{gyro_{mean}} = \overline{Gyro_{mean}}_{gyro \text{ calibration}}$$

$$Motion_{gyro_{mean}} = \overline{Gyro_{mean}}_{acc \text{ calibration}}$$

$$Stationary_{Acc_i} = \overline{Acc_{std}}_{gyro \text{ calibration}}, i = 1, 2, \dots$$

$$Motion_{Acc_i} = \overline{Acc_{std}}_{acc \text{ calibration}}, i = 1, 2, \dots$$

$$Stationary_{MAG_i} = \overline{MAG_{std}}_{gyro \text{ calibration}}, i = 1, 2, \dots$$

$$Motion_{MAG_i} = \overline{MAG_{i_{std}}}_{Checking\ routine}, i = 1, 2, \dots$$

Aquí se realiza una comprobación para asegurar que todos los estados de movimiento deberían tener valores mayores que los estados estacionarios correspondientes.

El Algoritmo (3) se utiliza para calcular los TV para las anomalías de movimiento.

Algoritmo (3)

$$\begin{aligned} TV_{gyro_{std}} &= SSF2 * (Motion_{gyro_{std}} - Stationary_{gyro_{std}}) + Stationary_{gyro_{std}} \\ TV_{gyro_{mean}} &= SSF3 * (Motion_{gyro_{mean}} - Stationary_{gyro_{std}}) + Stationary_{gyro_{mean}} \\ TV_{Acc_i} &= SSF4 * (Motion_{Acc_i} - Stationary_{Acc_i}) + Stationary_{Acc_i}, i = 1, 2, \dots \\ TV_{MAG_i} &= SSF5 * (Motion_{MAG_i} - Stationary_{MAG_i}) + Stationary_{MAG_i}, i = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

SSF2 a SSF5 son el factor de escala de sensibilidad. Se establece típicamente entre 0 y 1, y se debería ajustar en base a los sensores y la sensibilidad deseada del método de detección.

5

La determinación de una anomalía magnética se puede basar en un TV de función de coste, que se logra calculando la función de coste durante el período del periodo de calibración como se expone en el Algoritmo (4).

Algoritmo (4)

Iteration: **for** [beginning of gyro calibration → beginning of Check 1]

$$pdfVal[...] = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \delta} e^{-0.5 * \left(\frac{(1-\mu)}{\delta}\right)^2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \delta} e^{-0.5 * \left(\frac{(currentMagVal[...] - \mu)}{\delta}\right)^2}$$

$$costFunction[...] = SSF6 * \left| pdfVal[...] * \frac{\sum metricLenAng_{i,j}[\dots]}{\max(i)} \right|, i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

end

$$TV_{costFunction} = \max(costFunction) + (\overline{costFunction}) + std(costFunction)$$

SSF6 es un factor de escala que se usa para evitar perder la precisión de la función de coste del número pequeño.

10 Con el fin de extraer de manera consistente los TV para discernir la fuerza de una anomalía magnética a partir de los datos de calibración, uno puede usar el Algoritmo (5).

Algoritmo (5)

Iteration: **for** [beginning of mag calibration → end of mag calibration]

$$MagStr_i[...] = \sqrt{\sum_{axis} (alignProcMAG_i)} \quad i = 1, 2, \dots$$

end

$$\begin{aligned} \min_MagStr_i &= \min(MagStr_i) \quad i = 1, 2, \dots \\ \max_MagStr_i &= \max(MagStr_i) \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Con el fin de extraer de manera consistente los TV para discernir el ángulo entre los vectores de magnetómetro y de acelerómetro a partir de los datos de calibración, uno puede usar el Algoritmo (6).

Algoritmo (6)

Iteration: **for** [beginning of gyro calibration → end of checking routine]

Usar Filtro de Kalman Extendido para la estimación de la orientación durante la calibración

$$q_i[...] = EKF(procGyro, procAcc, alignProcMAG_i), i = 1, 2, \dots$$

$$e_i[...] = [q_{2i} \quad q_{3i} \quad q_{4i}], i = 1, 2, \dots$$

$$\hat{e}_i[...] = \begin{bmatrix} 0 & -q_{4i} & q_{3i} \\ q_{4i} & 0 & -q_{2i} \\ -q_{3i} & q_{2i} & 0 \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots$$

$$Rp_i[...] = (q_{1i}^2 - e_i' e_i) * I_{3 \times 3} + 2(e_i e_i') - 2q_{1i} \hat{e}_i, i = 1, 2, \dots$$

$$MF_i[...] = Rp_i * alignProcMAG_i, i = 1, 2, \dots$$

$$GF_i[...] = Rp_i * procAcc, i = 1, 2, \dots$$

$$\angle GM_i[...] = \arccos \left[\frac{MF_i \cdot GF_i}{\|MF_i\| * \|GF_i\|} \right], i = 1, 2, \dots$$

end

$$\min \angle TV_GM_i = \overline{\angle GM_i} - tol1$$

$$\max \angle TV_GM_i = \overline{\angle GM_i} + tol2$$

Donde tol1 y tol2 son las tolerancias para el umbral de detección

Se realiza un cálculo de comprobación de radios de magnetómetro sobre los datos de magnetómetro calibrado antes de la alineación. Los radios de un conjunto de puntos normales deberían ser iguales a uno. Se puede usar el Algoritmo (7) para determinar el umbral de radios. Como parte del uso del Algoritmo (7), se crea o genera un conjunto de puntos artificiales en una esfera unitaria, donde el conjunto de puntos debería ser cercano a uniformemente distribuido y tener un mínimo de 18 puntos. Usando un método de ajuste de elipsoide en los puntos artificiales, uno puede utilizar los datos de magnetómetro procesados para determinar los radios como se expone a continuación.

Algoritmo (7)

$$Radii = ellipsoidFit([artificial points, procMAG_i], i = 1, 2, \dots)$$

$$\min Radii = \overline{Radu} - tol3$$

$$\max Radii = \overline{Radu} + tol4$$

Donde: tol3 y tol4 son tolerancias para el umbral de detección; y,

minRadii y maxRadii deberían estar dentro de 0,93 y 1,07 para aplicaciones que requieran alta fiabilidad.

Las discrepancias de salida de cuaterniones es un método de detección que se basa en la salida de orientación calculada a partir del uso de diferentes magnetómetros. El siguiente algoritmo, Algoritmo (8), se puede usar para determinar el umbral de discrepancias de salida de cuaterniones, usando la salida de cuaterniones del Algoritmo (6), y calcular el ángulo entre los cuaterniones.

Algoritmo (8)

$$qDiff_{i,j}[\dots] = quatAngleDiff(q_i[\dots], q_j[\dots]), i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

$$TV_qDiff_{i,j} = \overline{qDiff_{i,j}[\dots]} + SSF7 * std(qDiff_{i,j}[\dots]), i \neq j, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$$

- 5 Después de extraer los TV para la detección de anomalías, se puede usar el siguiente cálculo para determinar si la IMU está siendo afectada por una anomalía local. Como paso preliminar, todos los datos de sensor entrantes se pueden procesar usando las Ecuaciones 1-10 tratadas anteriormente. Además, los Algoritmos (1) y (4) se pueden utilizar para determinar la desviación relativa entre magnetómetros dentro de un tamaño de núcleo preestablecido. Para el sistema de detección de fallos de sensor ejemplar, el movimiento se detecta en base a las siguientes reglas de la Tabla (1).

Tabla (1) - Detección de movimiento basada en sensores

Actividad	Condición	Resultado
El giroscopio ha detectado movimiento	Si $std(procGyro_i) > TV_{gyro_std_i}, i = 1, 2, \dots$ O $ procGyro_i > TV_{gyro_mean_i}, i = 1, 2, \dots$	inertial_motion_detection = 1
El acelerómetro ha detectado movimiento	Si $std(procAcc_i) > TV_{Acc_i}, i = 1, 2, \dots$	inertial_motion_detection = 1
El magnetómetro ha detectado movimiento	Si $std(procMAG_i) > TV_{MAG_i}, i = 1, 2, \dots$	Magnetic_motion_detection = 1

- 10 Dentro del tamaño de núcleo preestablecido, las siguientes reglas en la Tabla (2) se usan para detectar una anomalía de movimiento.

Tabla (2) - Detección de anomalía de movimiento

Marca de anomalía de movimiento	Condición
Falsa	Si $\sum inertial_motion_detection > 1$ Y $\sum magnetic_motion_detection > 1$
Falsa	Si $\sum inertial_motion_detection < 1$ Y $\sum magnetic_motion_detection < 1$
Verdadera	Si $\sum inertial_motion_detection < 1$ Y $\sum magnetic_motion_detection > 1$
Falsa	Si $\sum inertial_motion_detection > 1$ Y $\sum magnetic_motion_detection < 1$

Las siguientes reglas de la Tabla (3) se usan para detectar una anomalía magnética.

Tabla 3 - Detección de anomalía magnética

Marca de anomalía magnética	Condición
Verdadera	$costFunction > TV_{costFunction}$
Falsa	$costFunction \leq TV_{costFunction}$

De acuerdo con la presente descripción, uno puede calcular la fuerza magnética usando el Algoritmo (5). A partir de entonces, usando las reglas de la Tabla (4), uno puede discernir si está presente una anomalía magnética.

Tabla (4) - Detección de anomalía de fuerza magnética

Marca de anomalía de fuerza magnética	Condición
Verdadera	$MagStr_i < min_MagStr_i$ OR $MagStr_i > max_MagStr_i$
Falsa	$MagStr_i \geq min_MagStr_i$ OR $MagStr_i \leq max_MagStr_i$

5

De acuerdo con la presente descripción, uno puede determinar el ángulo entre los vectores de magnetómetro y de acelerómetro usando el Algoritmo (6). Esta detección solamente se activa cuando la IMU/los sensores están estacionarios, lo que se detecta a partir del algoritmo de detección de movimiento. Usando la siguiente tabla, Tabla (5), uno puede discernir si está presente una anomalía de vectores de magnetómetro y de acelerómetro.

10 Tabla (5) - Detección de anomalía de vectores de magnetómetro y de acelerómetro

Marca de anomalía de vectores de MAG y ACC	Condición
Verdadera	$\angle GM_i < min\angle TV_GM_i$ OR $\angle GM_i > max\angle TV_GM_i$
Falsa	$\angle GM_i \geq min\angle TV_GM_i$ OR $\angle GM_i \leq max\angle TV_GM_i$

De acuerdo con la presente descripción, uno puede determinar los radios magnéticos procesando los datos sin procesar de los magnetómetros usando el Algoritmo (7). Usando la siguiente tabla, Tabla (6), uno puede discernir si está presente una anomalía de radios magnéticos.

15 Tabla (6) - Detección de anomalía de radios magnéticos

Marca de anomalía de radios magnéticos	Condición
Verdadera	$radii < minRadii$ O $radii > maxRadii$
Falsa	$radii \geq minRadii$ O $radii \leq maxRadii$

De acuerdo con la presente descripción, uno puede calcular la orientación de las IMU con el Algoritmo (6) y calcular la diferencia angular con el Algoritmo (8). Usando la siguiente tabla, Tabla (7), uno puede discernir si está presente una discrepancia de salida de cuaternión.

20 Tabla (7) - Detección de discrepancias de cuaterniones

Marca de discrepancias de cuaterniones	Condición
Verdadera	$qDiff_{i,j} > TV_qDiff_{i,j}$
Falsa	$qDiff_{i,j} \leq TV_qDiff_{i,j}$

La detección de anomalías se puede ponderar usando la salida de cada uno de estos subsistemas de detección y determinar el nivel relevante de perturbación detectada por el sistema. Para los sistemas que requieren altos niveles de fiabilidad, se debería considerar una anomalía si se detecta cualquiera de esas marcas de subsistema.

La siguiente discusión describe un proceso para calibrar una IMU cuando se está usando con o en las proximidades de un objeto ferromagnético. Un ejemplo, en el campo de uso de dispositivos médicos, es durante la navegación quirúrgica, donde se necesita la IMU para hacer el seguimiento del movimiento de un objeto ferromagnético (por ejemplo, herramientas hechas de acero inoxidable, CoCr, etc.) Dado que la calibración de entorno local se realiza presumiblemente sin estos objetos ferromagnéticos en las proximidades, no hay forma de compensar sus distorsiones durante la etapa de calibración de entorno local. Se debería acometer un paso de calibración secundario para corregir la distorsión cuando se usen objetos ferromagnéticos en las proximidades de las IMU. El método propuesto da cuenta del hecho de que una IMU se puede fijar rígidamente al objeto ferromagnético cuando está en uso.

Si bien es posible maniobrar manualmente la IMU unida al objeto ferromagnético para recoger una suma global de datos para la recalibración, este método es ineficiente y requiere una cantidad sustancial de tiempo para que el usuario repita la maniobra para cada objeto ferromagnético que necesita calibración. En segundo lugar, es posible que la calibración del efecto combinado del entorno local y el objeto ferromagnético no esté alineada con la calibración de entorno local solo. Aunque cualquiera de las calibraciones puede ser funcional para hacer un seguimiento de guiñada, la transformación latente entre calibraciones en el campo de referencia puede producir errores. A modo de ejemplo, uno puede pensar en comparar la lectura de dos brújulas, una que es horizontal al suelo y la otra que está inclinada 5 grados. La brújula horizontal se calibra para el entorno local, mientras que la otra brújula se calibra tanto con objetos ferromagnéticos como con el entorno local. Si bien ambas calibraciones son ambas funcionales, la lectura de cada brújula será diferente. Por consiguiente, un algoritmo ejemplar de la presente descripción aborda ambos de estos problemas.

El presente planteamiento hace uso de la característica de distorsión de los objetos ferromagnéticos de baja intensidad de campo y modela la corrección en base a una cantidad limitada de entrada de datos. Esto permite una maniobra de calibración mucho más simple, sin dejar de ser capaz de lograr una calibración razonable.

Con referencia a las FIGS. 1-3, el objeto 100 unido a la IMU 102 (o la IMU 102 por sí misma) se mueve a través de una serie de orientaciones - que se pueden confirmar a partir de los datos de la IMU. A partir de los datos recogidos, se puede calcular una estimación inicial del campo de distorsión a través del procesamiento y análisis de elipsoides estándar. Se extrae un conjunto de datos de referencia (que actualmente usa 25000 vectores) a partir de una densidad de von-Mises Fisher, creando por ello un conjunto de vectores distribuidos uniformemente alrededor de la esfera de la IMU. La distorsión magnética calculada durante la calibración de entorno local y la estimación inicial de la distorsión magnética con el objeto ferromagnético se aplican a la inversa al conjunto de datos de referencia. Esto crea dos conjuntos de datos: (1) un conjunto de datos de referencia que está distorsionado por el entorno local; y (2) un conjunto de datos de referencia que está distorsionado tanto por el entorno local como por el objeto ferromagnético 100 unido (u objeto ferromagnético en las proximidades de la IMU 102). Dado que todos los puntos entre estos dos conjuntos de datos se originan a partir del mismo conjunto de datos de referencia, se establece una correspondencia punto a punto entre la distorsión de entorno local y la distorsión de entorno local con el objeto ferromagnético. Luego, la corrección para el objeto ferromagnético se extrae de este último usando un algoritmo de optimización recursivo con el conjunto de datos anterior.

Este proceso de calibración ejemplar se puede usar para cualquier número de objetos, de modo que múltiples objetos que tienen campos magnéticos latentes se puedan usar con el magnetómetro sin comprometer la precisión del sensor, así como mantener un campo de referencia consistente.

La siguiente sección esboza el algoritmo para calibrar un objeto ferromagnético con una IMU precalibrada. Esta parte supone que la IMU se ha calibrado según la discusión anterior. La IMU, como parte de esta secuencia de calibración, se debería unir de manera rígida a la herramienta o, de otro modo, tener la herramienta en una posición constante con respecto a la IMU. El operador gira el objeto durante al menos una revolución a lo largo de cada eje en un sistema cartesiano estándar como se representa en las FIGS. 1-3. Una vez que se recoge el conjunto de datos de calibración de la herramienta, el siguiente algoritmo puede calcular y compensar la distorsión.

Como asunto inicial, se hace una suposición inicial en cuanto al desplazamiento central del conjunto de datos usando la Ecuación 13 a continuación.

$SFe_{inst_i}, HFe_{inst_i} = EF_{fun}(DATA_{mag_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 13
--	-------------

A partir de entonces, se genera un gran número (por ejemplo, 25000) de vectores unitarios 3D aleatorios y se les aplica el inverso del SFe original y del instrumento usando el Algoritmo (9) a continuación.

Algoritmo (9)

Iteration: **for** 1...25000
samples = *rand3Dvectors*
samples_{distorted_i} = *samples* * *inv*(*SFe_{inst_i}*), *i* = 1,2, ...
samples_{normal_i} = *samples* * *inv*(*SFe_{orig_i}*), *i* = 1,2, ...
End

Usando la Ecuación 14, mostrada a continuación, calculamos la transformación de correspondencia de puntos.

$$T_{iD \rightarrow N} = \text{samples}_{normal_i} \backslash \text{samples}_{distorted_i}, i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 14

Usando la Ecuación 15, mostrada a continuación, calculamos la distancia de distorsión punto a punto.

$$Diff_{ND_i} = \text{samples}_{normal_i} - \text{samples}_{distorted_i}, i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 15

5

Usando la Ecuación 16, mostrada a continuación, para cada eje, situamos el máximo negativo de *Diff_{ND}*.

$$loc_i = \text{minmax}(Diff_{ND_i}), i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 16

Usando la Ecuación 17, mostrada a continuación, calculamos la ubicación de índice de *loc*.

La ubicación de índice de *loc* es

$$ind_i = \text{index}(\text{minmax}(Diff_{ND_i})), i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 17

10

Usando la Ecuación 18, mostrada a continuación, calculamos el centro a lo largo de los ejes de distancia de distorsión máxima.

$$c_i = \text{min}(loc_i) + \text{max}(loc_i), i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 18

Usando la Ecuación 19, mostrada a continuación, calculamos los límites de corrección máximos.

$$Dbound_i = \text{samples}_{distorted_i}(ind_i), i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 19

15

Usando la Ecuación 20, mostrada a continuación, después de que se calculan los parámetros de compensación de distorsión, centramos el conjunto de datos de calibración del instrumento.

$$centerMAG_i = DATA_{mag_i} - HFe_{inst_i}, i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 20

20

La corrección de calibración anterior se puede aplicar de al menos dos formas. En una primera forma, la corrección de calibración se aplica usando una transformación de correspondencia de puntos, tal como la Ecuación 21 mostrada a continuación.

$$compensatedMAG_i = centerMAG_i * \text{inv}(T_{iD \rightarrow N}) i = 1, 2, \dots$$

Ecuación 21

Alternativamente, en una segunda forma, la corrección de calibración se aplica usando escalado y compensación geométricos, tal como usando las Ecuaciones 22 y 23.

$SF_i(X, Y, Z) = \frac{centerMAG_i(X, Y, Z) - c(X, Y, Z) \cdot Dbound_i(X, Y, Z) - c(X, Y, Z)}{norm(centerMAG_i(X, Y, Z) - c(X, Y, Z)) \cdot norm(Dbound_i(X, Y, Z) - c(X, Y, Z))}, i = 1, 2, \dots$	Ecuación 22
$ccompensatedMAG_i = centerMAG_i + loc_i * SF_i, i = 1, 2, \dots$	Ecuación 23

Usando la ecuación 24, se pueden calcular los parámetros de calibración ajustados.

$SFe_{adjInst_i}, HFe_{adjInst_i} = magCal(compensatedMAG_i), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 24
--	-------------

- 5 Posterior a la conclusión de los cálculos de calibración anteriores, los cálculos de calibración se pueden aplicar a los magnetómetros de cada IMU que está unida al objeto ferromagnético o estará en una relación de posición fija con el mismo. Con el fin de aplicar los cálculos de calibración a los magnetómetros de cada IMU, los datos del magnetómetro se centran usando la Ecuación 20. A modo de ejemplo, se puede aplicar la corrección para dar cuenta de la causa de la distorsión por la herramienta a través de una transformación de correspondencia de puntos usando la Ecuación 21, o aplicar el escalado geométrico y la compensación usando las Ecuaciones 22 y 23. A partir de entonces, los magnetómetros de la IMU se pueden procesar aplicando los parámetros de compensación de hierro duro y blando ajustados a través de la Ecuación 25, mostrada a continuación.

$procMAG_i = processMag(compensatedMAG_i, SFe_{adjInst_i}, HFe_{adjInst_i}), i = 1, 2, \dots$	Ecuación 25
---	-------------

Una vez que los magnetómetros se han procesado, los magnetómetros se alinean usando las Ecuaciones 9 y 10.

- 15 Siguiendo la descripción anterior, debería ser evidente para los expertos en la técnica que, si bien los métodos y aparatos descritos en la presente memoria constituyen realizaciones ejemplares de la presente invención, la invención descrita en la presente memoria no se limita a ninguna realización precisa y que se pueden hacer cambios en tales realizaciones sin apartarse del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones. Además, se ha de entender que la invención está definida por las reivindicaciones y no se pretende que ninguna limitación o elemento que describa las realizaciones ejemplares expuestas en la presente memoria vaya a ser incorporado en la interpretación de cualquier elemento de la reivindicación a menos que dicha limitación o elemento se indique explícitamente. Del mismo modo, se ha de entender que no es necesario cumplir cualquiera o todas las ventajas u objetos identificados de la invención descrita en la presente memoria con el fin de caer dentro del alcance de cualquiera de las reivindicaciones, dado que la invención está definida por las reivindicaciones y dado que pueden existir ventajas inherentes y/o imprevistas de la presente invención aunque puede que no se hayan tratado explícitamente en la presente memoria.

REIVINDICACIONES

1. Un método de calibración de una unidad de medición inercial que comprende una pluralidad de acelerómetros, una pluralidad de giroscopios y una pluralidad de magnetómetros, el método que comprende:
5 recopilar datos de la unidad de medición inercial, mientras que está estacionaria como primer paso, en un entorno local donde se anticipa que la unidad de medición inercial se ha de usar posterior a la calibración;
recopilar datos de la unidad de medición inercial mientras que se recoloca la unidad de medición inercial alrededor de tres ejes ortogonales de la unidad de medición inercial como segundo paso en el entorno local;
calibrar la pluralidad de giroscopios usando los datos recogidos durante el primer paso y el segundo paso;
calibrar la pluralidad de magnetómetros usando los datos recogidos durante el primer paso y el segundo paso;
10 calibrar la pluralidad de acelerómetros usando los datos recogidos durante el primer paso y el segundo paso;
caracterizado porque calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye formar una función de coste a partir de la suposición de que un ángulo y una longitud de cada uno de una pluralidad de vectores de magnetómetro de la pluralidad de magnetómetros tienen valores aproximadamente idénticos, en donde la función de coste se calcula como la magnitud de la diferencia de vectores ponderada con la desviación angular entre los vectores; y
15 en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye establecer un umbral para la función de coste más allá del cual existe una distorsión magnética de la que no se da cuenta.
2. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye extraer parámetros para la detección de distorsión adoptando al menos una de las siguientes suposiciones: (1) el movimiento de la unidad de medición inercial es detectable por todas de la pluralidad de acelerómetros, la pluralidad de giroscopios y la pluralidad de magnetómetros; (3) cada uno de la pluralidad de vectores de magnetómetro es aproximadamente la
20 unidad en magnitud; (4) el ángulo entre un vector de magnetómetro calibrado y un vector de acelerómetro calibrado no deberían cambiar; (5) un radio de la pluralidad de vectores de magnetómetro posterior a la calibración es aproximadamente igual a uno; y (6) los cuaterniones calculados usando diferentes de la pluralidad de vectores de magnetómetro son aproximadamente iguales.
- 25 3. El método de la reivindicación 2, en donde una desviación de la suposición de que el movimiento de la unidad de medición inercial es detectable por todas de la pluralidad de acelerómetros, la pluralidad de giroscopios, y la pluralidad de magnetómetros da como resultado una determinación de una anomalía de movimiento.
4. El método de la reivindicación 3, en donde una desviación de cualquiera de las siguientes suposiciones da como resultado una determinación de una anomalía magnética: (2) un ángulo y una longitud de cada uno de la pluralidad
30 de vectores de magnetómetro tienen valores aproximadamente idénticos; (3) cada uno de la pluralidad de vectores de magnetómetro es de aproximadamente una unidad en magnitud; (4) un ángulo entre un vector de magnetómetro calibrado y un vector de acelerómetro calibrado no debería cambiar; (5) un radio de la pluralidad de vectores de magnetómetro posterior a la calibración es aproximadamente igual a uno; y, (6) los cuaterniones calculados usando diferentes de la pluralidad de vectores de magnetómetro son aproximadamente iguales.
- 35 5. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de giroscopios incluye determinar una desviación de cada giroscopio por media aritmética.
6. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye determinar si está presente al menos una de cualquier distorsión de hierro duro y cualquier distorsión de hierro blando y, opcionalmente, en donde determinar si está presente al menos una de cualquier distorsión de hierro duro y cualquier
40 distorsión de hierro blando incluye utilizar una función de ajuste elipsoidal multidimensional a los datos recogidos de la pluralidad de magnetómetros para transformar los datos en datos esféricos.
7. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye dar cuenta de las diferencias de alineación entre los magnetómetros a partir de una alineación de referencia.
8. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye calibrar la pluralidad de
45 magnetómetros para una nueva alineación de referencia.
9. El método de la reivindicación 1, en donde el método comprende uno o ambos de:
calibrar la pluralidad de acelerómetros incluye aplicar una función de ajuste elipsoidal multidimensional a los datos recogidos de la pluralidad de acelerómetros;
y calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye aplicar una función de ajuste elipsoidal multidimensional a los
50 datos recogidos de la pluralidad de magnetómetros para transformar los datos en datos esféricos.

10. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de giroscopios incluye extraer parámetros para la detección de distorsión y usar los parámetros extraídos para determinar si está presente una anomalía de movimiento.

11. El método de la reivindicación 1, en donde el método comprende uno o más de:

5 calibrar la pluralidad de acelerómetros incluye verificar que los datos recogidos de la pluralidad de acelerómetros en el segundo paso tengan un valor de movimiento mayor que los datos recogidos de la pluralidad de acelerómetros en el primer paso;

10 calibrar la pluralidad de giroscopios incluye verificar que los datos recogidos de la pluralidad de giroscopios en el segundo paso tengan un valor de movimiento mayor que los datos recogidos de la pluralidad de giroscopios en el primer paso;

y calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye verificar que los datos recogidos de la pluralidad de magnetómetros en el segundo paso tengan un valor de movimiento mayor que los datos recogidos de la pluralidad de magnetómetros en el primer paso.

15 12. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye calcular cuaterniones de salida de orientación a partir de los datos recogidos de la pluralidad de magnetómetros para establecer valores de umbral para anomalías de movimiento, y opcionalmente en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye calcular un ángulo entre los cuaterniones de salida de orientación calculados para establecer valores de umbral para anomalías de movimiento.

20 13. El método de la reivindicación 1, en donde calibrar la pluralidad de magnetómetros incluye aplicar cálculos de radios de magnetómetros a datos de magnetómetros calibrados recogidos de la pluralidad de magnetómetros para determinar un umbral de radios para determinar si existe una anomalía magnética y, opcionalmente, en donde si existe la anomalía magnética, calcular la intensidad de la anomalía magnética.

14. El método de la reivindicación 1, en donde la unidad de medición inercial se incorpora como parte de un sistema de navegación quirúrgica.

25

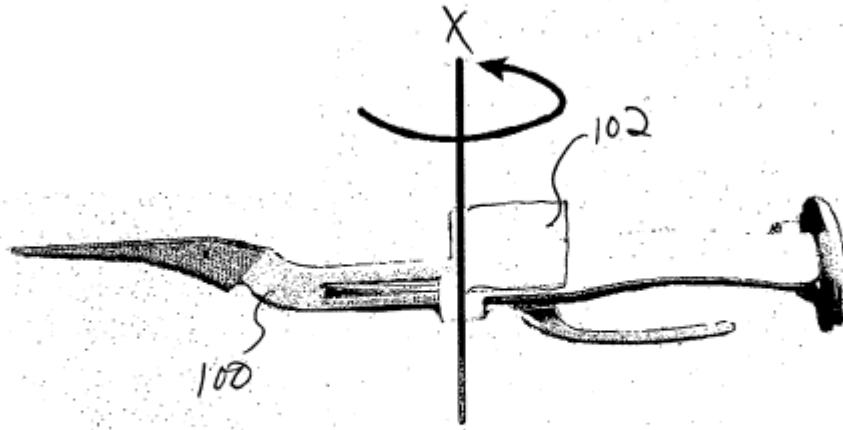


FIG. 1

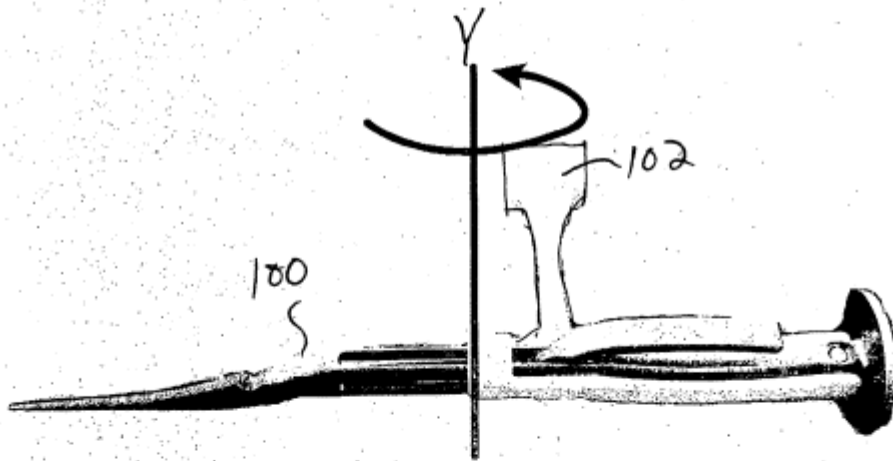


FIG. 2

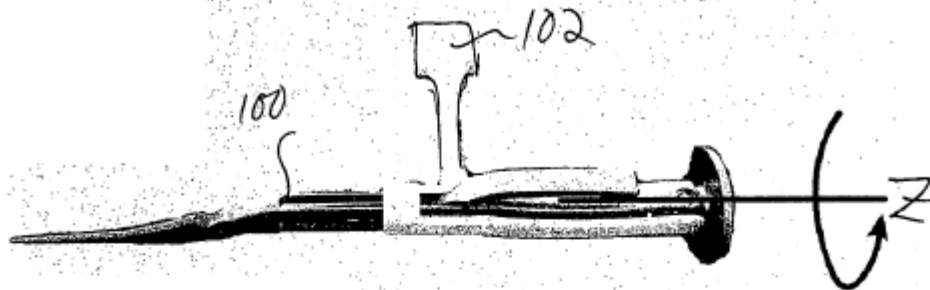


FIG. 3