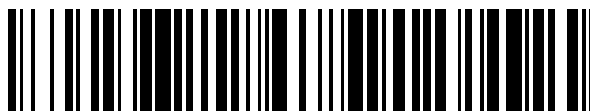


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 792 111**

51 Int. Cl.:

A61B 34/20 (2006.01)

A61B 5/06 (2006.01)

G01B 7/004 (2006.01)

A61B 6/00 (2006.01)

A61B 5/00 (2006.01)

A61B 6/12 (2006.01)

A61B 90/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2011 E 18177011 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.03.2020 EP 3403610**

54 Título: **Compensación por perturbaciones magnéticas debido al fluoroscopio**

30 Prioridad:

22.12.2010 US 97591510

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

10.11.2020

73 Titular/es:

**BIOSENSE WEBSTER (ISRAEL) LTD. (100.0%)
4 Hatnufa Street
Yokneam 2066717, IL**

72 Inventor/es:

**MONTAG, AVRAM DAN;
BAR-TAL, MEIR y
BAR-ON, TAL HAIM**

74 Agente/Representante:

IZQUIERDO BLANCO, María Alicia

ES 2 792 111 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 por perturbaciones magnéticas debido al fluoroscopia

5 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere en general a detectar la posición de un objeto colocado dentro de un cuerpo vivo, y, específicamente, a la compensación de perturbaciones magnéticas que afectan a un sensor de la posición.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Una amplia gama de procedimientos médicos implica la colocación de objetos, tales como sensores, tubos, catéteres, dispositivos dispensadores, e implantes, dentro del cuerpo. Los métodos de imagen en tiempo real a menudo se utilizan para ayudar a los médicos a visualizar el objeto y su entorno durante estos procedimientos. Algunos métodos rastrean los objetos usando el objeto usando campos magnéticos. Sin embargo, las perturbaciones en el campo magnético pueden crear errores en el seguimiento.

15

La patente de EE.UU. 6.714.008, a Holmes, et al., Describe una metodología de medición gradiométrica para determinar los campos magnéticos de objetos grandes.

20

La solicitud de patente US 2004/0034515, a Bar Tal, et al., describe un método para mediciones de posición y orientación en sistemas electromagnéticos. El método incluye la minimización de la diferencia entre un modelo para las mediciones y una o más mediciones.

25

La publicación de patente de la W.I.P.O. WO/2004/006770, a Sati, et al., describe un método para la calibración de los sistemas de imágenes médicos. Se establece que el método puede determinar una posición de una fuente de formación de imágenes y, si corresponde, una distorsión de campo magnético, para cada una de una pluralidad de orientaciones de un dispositivo de formación de imágenes de brazo C.

30

La Solicitud de Patente de EE.UU. 2005/0107687, a Anderson, describe un sistema para la reducción de distorsión en un rastreador electromagnético. Se indica que ciertas realizaciones del sistema incluyen una unidad de análisis de seguimiento para analizar un comportamiento de seguimiento de un instrumento y una unidad de modificación de seguimiento para compensar el comportamiento de seguimiento del instrumento. La Solicitud de Patente de EE.UU. 2007/0055125, de Anderson et al., describe un sistema de seguimiento electromagnético que incluye un generador de campo y un sensor de campo dispuestos para generar y detectar, respectivamente, un campo electromagnético.

35

La Solicitud de Patente de EE.UU. 2008/0183064, a Chandonnet et al., describe un método para la detección de distorsión del campo electromagnético (EM). El método incluye muestrear un ensamblaje de sensor ubicado dentro de un volumen de interés para adquirir mediciones de campos EM dentro del volumen de interés, y monitorear las mediciones para detectar la distorsión de campo EM dentro del volumen de interés.

40

La patente de EE.UU. 6.147.480, de Osadchy et al., describe un método para el seguimiento de un objeto usando campos de energía, en presencia de interferencia debido a la introducción de un artículo que responde a los campos, y en la proximidad del objeto.

45

La patente de EE.UU. 5.767.669, de Hansen et al., describe un sistema para determinar la posición y orientación de los sensores remotos utilizando campos magnéticos pulsantes generados a partir de un lugar fijo. Las distorsiones de corriente Eddy son detectadas por separado y restadas por el sistema.

50

La patente de EE.UU. 7.657.075, a Viswanathan, describe un método para determinar una transformación de una imagen tridimensional de datos de imagen pre-operatorios establecidos para obtener un registro de los datos de imagen tridimensional con un sistema de imágenes de rayos X.

55

La patente de EE.UU. 7.689.019, a Boese et al., describe un método y un dispositivo para el registro de imágenes de proyección 2D de un objeto con respecto a un registro de datos de la imagen 3D del mismo objeto. Una característica 3D contenida en un objeto, que también es identificable en las imágenes 3D, se reconstruye simbólicamente.

60

La Solicitud de Patente de EE.UU. 2009/0010540, a Mullick et al., describe un método para realizar el registro de imágenes. El método comprende obtener un conjunto de datos de imágenes de referencia y un conjunto de datos de imágenes diana y definir una máscara de imagen para una región de interés en el conjunto de datos de imágenes de referencia.

65

La Solicitud de Patente de EE.UU. 2002/0172328, a Dekel, describe un método para la transformación de las coordenadas espaciales de un instrumento su imagen de proyección de rayos X correspondiente. El método se basa en el registro del sistema de coordenadas de un sistema de imágenes de rayos X con un dispositivo de localización registrando simultáneamente las coordenadas espaciales y las imágenes de proyección de rayos X de una herramienta de calibración.

La Us2010082280A1 divulga métodos para seguir la posición y orientación de un sensor de campo magnético en un volumen de seguimiento cuando en el volumen de seguimiento hay un brazo C móvil. Los datos del campo magnético se recogen de dentro del volumen de seguimiento tanto con o sin el brazo C presente en el volumen de seguimiento. Durante este proceso los datos de campo de un sensor en una localización conocida se recogen cuando el brazo C está en una posición y orientación conocidas. Los datos obtenidos se usan para obtener información de corrección para distorsiones de campo magnético provocadas por la presencia del brazo C en el volumen de seguimiento. Los métodos implican modelar el brazo C usando modelado dipolo y multipolo.

SUMARIO DE LA INVENCION

La invención se define en las reivindicaciones independientes adjuntas 1 y 2, las realizaciones preferidas se describen en las reivindicaciones dependientes.

Un ejemplo de la presente divulgación proporciona un método, que incluye:

generar, usando una pluralidad de transmisores magnéticos, un campo magnético en una región;
 introducir un elemento perturbador de campo en la región;
 caracterizar imágenes múltiples de cada transmisor magnético en el elemento perturbador de campo;
 calcular un campo magnético de reacción en la región en base a las imágenes caracterizadas;
 posicionar una sonda en la región y medir un campo magnético perturbado en la sonda; y
 determinar una ubicación de la sonda en respuesta al campo magnético perturbado medido y el campo magnético de reacción calculado.

Típicamente, la generación del campo magnético incluye la medición del campo magnético en ausencia del elemento de perturbación de campo, y medir el campo magnético con el elemento de perturbación de campo presente en la región.

En un ejemplo divulgado, la introducción del elemento perturbador de campo en la región incluye la medición de un lugar y una orientación del elemento de perturbación de campo con respecto a los ejes definidos por los transmisores magnéticos. La medición de la ubicación y la orientación del elemento perturbador de campo puede incluir el cálculo de la ubicación y la orientación de forma adaptativa en respuesta al campo magnético de la reacción.

En otro ejemplo divulgado que caracteriza las múltiples imágenes que incluye asumir que las múltiples imágenes están en una configuración predeterminada con respecto a la otra. La configuración predeterminada puede incluir un rectángulo y las imágenes múltiples pueden incluir cinco imágenes ubicadas en las esquinas y un centro del rectángulo.

En otro ejemplo divulgado más el cálculo del campo magnético de la reacción que incluye calcular el campo de acuerdo con una expansión armónica esférica. El cálculo del campo magnético de la reacción puede incluir la realización de la expansión armónica esférica hasta el orden 3.

Alternativamente o adicionalmente, el cálculo del campo de acuerdo con la expansión armónica esférica puede incluir la configuración de la expansión como una matriz de transferencia espacial, y el método puede incluir además la determinación de propiedades del elemento de perturbación de campo como una matriz de campo de reacción, y el cálculo del campo magnético de reacción puede responder a un producto de la matriz de transferencia espacial y la matriz del campo de reacción.

Típicamente, el posicionamiento de la sonda incluye colocar la sonda dentro del cuerpo de un paciente.

En un ejemplo, el elemento perturbador de campo incluye al menos una sección de un fluoroscopio. El método puede incluir el registro de ejes de fluoroscopio, del fluoroscopio, con ejes definidos por los transmisores. El registro de los ejes del fluoroscopio puede incluir la formación de imágenes de marcas fiduciales adjuntas al fluoroscopio con cámaras conectadas de forma fija a los transmisores. La introducción del elemento perturbador de campo puede incluir la medición de una ubicación y una orientación del elemento perturbador de campo en respuesta a las imágenes.

Se proporciona además, de acuerdo con un ejemplo de la presente divulgación, un aparato, que incluye:

una pluralidad de transmisores magnéticos configurados para generar un campo magnético en una región; un elemento perturbador de campo introducido en la región; y un procesador, que está configurado para:

5 caracterizar múltiples imágenes de cada transmisor magnético en el elemento perturbador de campo, calcular un campo magnético de reacción en la región en función de las imágenes caracterizadas, medir un campo magnético perturbado en una sonda posicionada en la región, y determinar una ubicación de la sonda en respuesta al campo magnético perturbado medido y al campo magnético de reacción calculado.

10 Se proporciona además, de acuerdo con un ejemplo, un método, que incluye:
montar de transmisores magnéticos, configurados para generar un campo magnético en un paciente, en una almohadilla de localización;
15 unir las cámaras de posicionamiento de ubicación con respectivas orientaciones fijas a la almohadilla de localización;
acoplar cámaras giratorias a la almohadilla de localización;
unir las marcas fiduciales a un fluoroscopio configurado para obtener una imagen del paciente;
ubicar el fluoroscopio en diferentes posiciones; y para cada posición:

20 orientar las cámaras giratorias hacia orientaciones conocidas, y formar imágenes respectivas de las marcas fiduciales con las cámaras giratorias y las cámaras de ubicación, y analizar las imágenes respectivas para registrar una ubicación y una orientación del fluoroscopio con un eje de la almohadilla de localización.

25 El método puede incluir la eliminación de las cámaras giratorias de la almohadilla de localización, y la determinación de la ubicación y la orientación del fluoroscopio con respecto al eje de la almohadilla de localización utilizando sólo las imágenes de las marcas fiduciales formadas por las cámaras de ubicación y control. En una realización, unir las cámaras de la almohadilla de ubicación a la almohadilla de ubicación incluye unir una plantilla extraíble a la almohadilla de ubicación, y alinear las cámaras de la almohadilla de ubicación a las respectivas orientaciones fijas imaginando la plantilla con las cámaras.

30 Se proporciona además, de acuerdo con un ejemplo, un aparato, que incluye:
35 una almohadilla de localización;
transmisores magnéticos, configurados para generar un campo magnético en un paciente, que están montados en la almohadilla de localización; cámaras de posicionamiento de ubicación que están unidas con respectivas orientaciones fijas a la almohadilla de localización;
cámaras giratorias acopladas a la almohadilla de localización;
40 un fluoroscopio configurado para obtener una imagen del paciente;
marcas fiduciales adjuntas al fluoroscopio; y
un procesador, configurado para:

45 ubicar el fluoroscopio en diferentes posiciones y para cada posición:
orientar las cámaras giratorias en orientaciones conocidas, y formar imágenes respectivas de las marcas fiduciales con las cámaras giratorias y las cámaras de ubicación, y analizar las imágenes respectivas para registrar una ubicación y una orientación del fluoroscopio con un eje de la almohadilla de localización.

50 La presente divulgación se entenderá más completamente a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones de la misma, tomada junto con los dibujos, en los que:

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

55 La figura 1 es una ilustración gráfica esquemática de un sistema de detección de posición, de acuerdo con una realización de la presente divulgación.
La figura 2 es una vista esquemática en detalle que muestra un extremo distal de una sonda, de acuerdo con una realización de la presente divulgación;
60 La figura 3 es una ilustración esquemática de los elementos usados en el sistema de detección de posición, de acuerdo con una realización de la presente divulgación.
La figura 4 es un diagrama de flujo de un procedimiento para determinar la ubicación del extremo distal de la sonda, de acuerdo con una realización de la presente divulgación;
La figura 5 es una ilustración esquemática, ilustrativa de un sistema de detección de posición alternativo, de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

Las figuras 6A y 6B son diagramas esquemáticos de partes del sistema de detección de posición alternativo, y de elementos usados en la calibración del sistema, de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

La figura 7 es un diagrama de flujo de los pasos realizados por una unidad de control en el funcionamiento del sistema sensor de posición alternativo, de acuerdo con una realización de la presente divulgación; y

5 Las figuras 8A - 8G muestran los elementos de una matriz, de acuerdo con una realización de la presente divulgación.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN

10 VISIÓN DE CONJUNTO

Las realizaciones de la presente divulgación proporcionan un método para compensar las perturbaciones creadas en un campo magnético en una región. Las perturbaciones son causadas por la introducción de un elemento perturbador, típicamente un componente metálico, en un campo generado por transmisores magnéticos. Con el fin de compensar la presencia del elemento perturbador, un modelo de campo de reacción utilizado por las realizaciones de la presente divulgación supone que cada transmisor magnético crea múltiples imágenes del transmisor en el elemento. El modelo asume que cada imagen genera un campo de reacción respectivo, que en total actúa para perturbar el campo generado por los transmisores.

20 Cada imagen puede típicamente ser caracterizada como una combinación de multipolos, es decir, dipolos, cuadrupolos y/o polos de orden superior. Las características de cada imagen también dependen, *entre otras cosas*, del campo del transmisor que genera la imagen. El modelo generalmente calcula el campo de reacción de cada una de las imágenes multipolares al asumir que el campo puede representarse mediante una expansión armónica esférica y según las características de las imágenes. Típicamente, las características de la imagen se determinan efectivamente midiendo el campo de los transmisores en presencia del elemento perturbador, así como sin el elemento perturbador, y las características se pueden representar en términos de una matriz de transferencia espacial y una matriz de campo de reacción.

30 Una vez que las imágenes han sido caracterizadas, una sonda que se coloca en la región mide el campo magnético perturbado. Luego se puede calcular una ubicación de la sonda en la región en respuesta al campo medido y el campo de reacción calculado como se describió anteriormente.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

35 Se hace referencia ahora a la FIG. 1, que es una ilustración esquemática, pictórica de un sistema de detección de posición 20 que está configurado para detectar la posición de un extremo distal 21 de una sonda de catéter 22, a la FIG. 2, que es una vista esquemática en detalle que muestra el extremo distal 21, y a la FIG. 3, que es una ilustración esquemática de los elementos usados en el sistema 20, de acuerdo con las realizaciones de la presente divulgación. Típicamente, la sonda 22 se inserta en una cavidad corporal u órgano de un paciente por un profesional médico durante una fase operativa del sistema 20, y no está presente durante una fase de calibración del sistema. Para mayor claridad, la sonda 22 se muestra en la FIG. 1 con líneas discontinuas. El paciente típicamente se acuesta sobre una mesa de operaciones 24 durante un procedimiento realizado por el profesional médico, que puede operar el sistema de detección de posición 20. Por claridad y simplicidad, ni el paciente ni el profesional médico se muestran en la FIG. 1.

45 A modo de ejemplo, en la descripción a continuación se asume que la sonda 22 se utiliza en un procedimiento invasivo dentro de una cámara de un corazón de paciente. El paciente se coloca sobre la mesa 24 en un campo magnético que se genera colocando, debajo del paciente, una almohadilla de ubicación 26 que contiene una disposición 28 de bobinas 32A, 32B, transmisoras de campos magnéticos alternantes generalmente similares. Las bobinas también se denominan colectivamente en este documento bobinas transmisoras de campo magnético 32. Las bobinas 32 generan sus campos magnéticos alternos en una región 30, ilustrada esquemáticamente en la FIG. 1 como una elipse. La FIG. 3 ilustra una disposición ejemplar de las bobinas 32.

55 Típicamente, y como se ilustra en la FIG. 3, la disposición 28 comprende bobinas transmisoras 32 formadas como tres conjuntos de bobinas triaxiales 34, 36, y 38, comprendiendo cada conjunto de bobinas triaxiales tres bobinas que son ortogonales entre sí. Sin embargo, son posibles disposiciones de bobinas transmisoras magnéticas 32 distintas de la disposición 28, y tales disposiciones serán evidentes para los expertos en la técnica. La Patente de EE.UU. 6.484.118, de Govari, describe una disposición de bobinas similar a la disposición 28, así como otras disposiciones de bobinas 32 que pueden usarse en el sistema 20.

60 La descripción en el presente documento supone que el extremo distal 21 comprende tres bobinas generalmente ortogonales 40, 42, y 44 como parte de un sensor electromagnético (EM) 46 situado en el extremo distal. (El extremo distal típicamente comprende otros elementos, tales como los electrodos 48 ilustrados en la figura 2). Los campos magnéticos generados por las bobinas 32 producen señales eléctricas en las bobinas del sensor 46, de acuerdo con los campos detectados por las bobinas. Las señales eléctricas de las bobinas del sensor 46 se

transportan a una unidad de control 50, que analiza las señales para determinar las coordenadas de la posición y de la orientación de la sonda 22. Se supone que las coordenadas están referenciadas a un conjunto de ejes xyz, ilustrados en la FIG. 3, que están fijos con respecto a la almohadilla de localización 26.

5 Otras disposiciones de bobinas en extremo distal 21, para la detección de la posición y orientación de la sonda 22, se conocen en la técnica. Una de estas disposiciones usa una bobina, que mide las proyecciones de los campos. Los expertos en la técnica podrán adaptar la presente descripción, *mutatis mutandis*, para tener en cuenta las disposiciones de la bobina diferentes de las ejemplificadas por las bobinas 40, 42 y 44.

10 La unidad de control 50 incluye un procesador 52, típicamente una computadora con circuitos de procesamiento de señal apropiados. El procesador usa una memoria 54, que típicamente comprende tanto dispositivos de almacenamiento de datos volátiles como no volátiles, en donde se almacenan datos para el sistema operativo 20. El procesador está acoplado para conducir una consola que puede proporcionar una pantalla visual 56 de la ubicación de la sonda 22.

15 El sistema 20 incluye un fluoroscopio 60, que es operado por un controlador de fluoroscopio 61, y que es capaz de producir imágenes fluoroscópicas del paciente en la mesa 24. Se supone que el controlador de fluoroscopio 61 es una subunidad de la unidad de control 50. El fluoroscopio 60 tiene una serie de secciones, que comprenden una fuente de rayos X colimada 62, también denominada aquí colimador 62, y un detector 64. El colimador y el detector están conectados entre sí por otra sección, un "rayo C" 66, que les permite girar alrededor de dos ejes, un eje horizontal 68 y un eje perpendicular al plano del papel a través del eje 68. El rayo C también permite que el colimador y el detector se trasladen en el espacio, como en una dirección paralelo al eje horizontal. El rayo C 66 mantiene el colimador y el detector en una alineación fija entre sí, y a una distancia constante entre sí, durante la rotación del fluoroscopio alrededor del eje 68. Típicamente, las imágenes formadas por el fluoroscopio 60 pueden formarse con el fluoroscopio girado para cualquier orientación alrededor del eje 68, la orientación se selecciona de acuerdo con las necesidades del paciente y de los requisitos del sistema operativo profesional 20.

25 Típicamente, el fluoroscopio 60 opera para producir sus imágenes sustancialmente al mismo tiempo que el uso de la sonda 22. Sin embargo, los componentes metálicos del fluoroscopio que están cerca de la región 30 alteran los campos magnéticos generados por las bobinas 32 en la región. Sin compensación por estas alteraciones, se introducen imprecisiones en la ubicación medida de la sonda 22. Como se describe aquí, las realizaciones de la presente invención compensan las alteraciones en el campo producido por el fluoroscopio 60, independientemente de la orientación o posición del fluoroscopio con respecto a la mesa 24, evitando así cualquier imprecisión en la ubicación medida de la sonda.

35 Típicamente, el sistema 20 incluye otros elementos, que no se muestran en las figuras en aras de la simplicidad, y a los que se hace referencia como necesarios en la siguiente descripción. Por ejemplo, el sistema 20 puede incluir un monitor de ECG, acoplado para recibir señales de uno o más electrodos de la superficie del cuerpo, para proporcionar una señal de sincronización de ECG a la unidad de control 50.

40 La configuración de la FIG. 1 es un ejemplo de configuración, que se elige puramente por el bien de la claridad conceptual. En realizaciones alternativas, también se puede usar cualquier otra configuración adecuada. Típicamente, el procesador 52 está programado en software para llevar a cabo las funciones descritas aquí. El software puede descargarse al procesador en forma electrónica, a través de una red, por ejemplo, o puede, alternativamente o adicionalmente, proporcionarse y/o almacenarse en medios tangibles no transitorios, tales como memoria magnética, óptica o electrónica.

45 El sistema 20 también comprende un aparato que puede trazar los campos magnéticos que se generan por las bobinas 32 en la región 30. En una realización de la presente divulgación, se usa un correlacionador 70 para trazar los campos magnéticos, comprendiendo el mapeador una matriz de detectores de campo magnético 72 que están montados de manera fija en posiciones conocidas sobre bases sólidas, tales como láminas de plástico. El mapeador 70 está configurado de modo que puede colocarse en la mesa 24 en una posición y orientación predeterminadas conocidas con respecto a la almohadilla de ubicación 26. En una realización, el mapeador 70 comprende 50 detectores. Típicamente, los detectores están configurados en el mapeador de modo que el campo magnético y todos sus gradientes no despreciables sean medibles. En una realización alternativa, el mapeador tiene 78 detectores distribuidos en una caja rectangular que tiene dimensiones aproximadas de altura X longitud X longitud igual a 150 mm X250 mm X250 mm.

55 El asignador puede estar colocado, por lo general aproximadamente en el centro con respecto a la izquierda y derecha, y de cabeza y de pie, usando mediciones magnéticas de los detectores 72.

60 Aunque en la siguiente descripción de la operación del sistema 20, se supone que el mapeador 70 se usa para trazar los campos magnéticos, se entenderá que el asignador es un ejemplo de sistema para la medición de los campos magnéticos en la región 30, y se puede usar cualquier otro sistema adecuado, tal como uno o más detectores de campo que se pueden mover a posiciones conocidas. Dichos sistemas de trazado de campo

alternativos serán evidentes para los expertos en la materia y se supone que están comprendidos dentro del alcance de la presente invención.

5 Los detectores 72 pueden comprender cualquier sensor conveniente para medir la magnitud y dirección de un campo magnético, tal como sondas Hall o sensores generalmente similares al sensor 46. Las lecturas de los detectores se transfieren a la unidad de control 50, típicamente por un cable 74, aunque se puede usar cualquier otro método de transferencia conveniente, como la transmisión inalámbrica.

10 Como se describe en más detalle a continuación, el asignador 70 se utiliza en la fase de calibración del 20, de modo que el asignador y su cable de conexión se muestran en la FIG. 1 con líneas de trazos. El mapeador y su cable se eliminan cuando el sistema 20 se encuentra en su fase operativa.

15 En algunas realizaciones el sistema 20 comprende uno o más sensores de referencia 76 que son generalmente similares al sensor 46. Los sensores 76 proporcionan señales a la unidad de control 50 para permitir a la unidad, como se describe a continuación, para determinar la posición y orientación del fluoroscopio 60. Típicamente, los sensores 76 son fijos con relación a la mesa 24, y pueden ubicarse convenientemente debajo de la mesa. Alternativamente, los sensores 76 de referencia pueden fijarse al fluoroscopio 60.

20 Se hace ahora referencia a la FIG. 4, que es un diagrama de flujo 100 de un procedimiento para determinar la ubicación del extremo distal 21 de la sonda 22, de acuerdo con una realización de la presente invención. El diagrama de flujo 100 comprende una primera fase de calibración 102, seguida de una segunda fase de funcionamiento 104. La siguiente descripción del diagrama de flujo también se refiere a partes de la sección titulada "Modelo de campo de reacción" a continuación.

25 En una primera etapa de mapeo 106 de la fase de calibrado, todos los objetos, denominados perturbadores de campo en el presente documento o elementos perturbadores de campo, que podrían perturbar el campo generado por las bobinas 32, se retiran de la región 30 y su vecindad. Dichos objetos incluyen el fluoroscopio 60. El dispositivo de posicionamiento 70 está posicionado en la mesa 24 en su posición y orientación predeterminadas con respecto a la almohadilla de localización 26, y las bobinas de transmisión 32 están activadas. La unidad de control 30 opera detectores de campo magnético 72 para mapear el campo magnético no perturbado en la región 30.

35 En un segundo paso de mapeo 108, con el mapeador 70 restante en su lugar, el fluoroscopio 60 se coloca en lugares específicos y orientaciones (LOs) con respecto a los ejes de almohadilla de localización, en la proximidad de la región 30. La unidad de control 50 puede determinar las LOs específicas que usan el controlador de fluoroscopio 61. Alternativamente, en las realizaciones que comprenden los sensores de referencia 76, la unidad de control 50 puede usar señales de los sensores para determinar las LOs, como se describe a continuación en la sección titulada Ubicación del Fluoroscopio Adaptable. Un método óptico alternativo adicional para determinar las LOs conocidas del fluoroscopio se describe a continuación con referencia a las FIGS. 5, 6A, 6B y 7.

40 Como se describe a continuación, se supone que el fluoroscopio 60 tiene dos elementos perturbadores: colimador 62 y el detector 64. A fin de que la caracterización descrita a continuación para la etapa 110 sea válida, las LOs diferentes se seleccionan de manera que se encuentren en dos conjuntos: un primer conjunto donde el colimador 62 está lejos de la región 30, de modo que solo el detector 64 es el elemento perturbador, y un segundo conjunto donde el detector 64 está lejos de la región 30, de modo que solamente el colimador 62 es el elemento perturbador.

Para cada LO conocida, la unidad de control 50 opera detectores de campo magnético 72 con el fin de asignar el campo magnético perturbado en la región 30.

50 En una etapa de caracterización multipolar 110, la unidad de control asume que la perturbación causada por cada elemento perturbador de fluoroscopio 60 se deba a los campos de reacción generados por fuentes de imágenes magnéticas en el elemento respectivo. El análisis realizado en el paso 110 se describe con más detalle a continuación en la sección titulada Modelo de Campo de Reacción. Se puede considerar las fuentes magnéticas a ser imágenes de las bobinas transmisoras 32 en los elementos perturbadores, es decir, en los dos elementos: colimador 62 y detector 64. Los expertos en la materia podrán adaptar la descripción si el fluoroscopio 60 tiene 55 números diferentes de elementos, o para el caso de otros perturbadores de campo.

60 En teoría, si un perturbador de campo es una esfera perfectamente conductora y el transmisor es un dipolo con su momento dirigido hacia el centro de la esfera, entonces la imagen del transmisor generado por la esfera es un único dipolo. Para tener en cuenta las diferencias de dicho modelo teórico, que incluyen, *entre otros, que el transmisor no es un dipolo perfecto, y el perturbador no es una esfera perfectamente conductora*, las realizaciones de la presente invención suponen que dentro de cada elemento perturbador del fluoroscopio una única bobina del transmisor 32 genera dos o más imágenes de fuente magnética multipolar de la bobina.

65 Cada multipolo se asume para generar un campo de reacción respectiva, y un multipolo puede comprender

dipolo, cuadrupolo y/o polos de orden superior. Para tener en cuenta la posibilidad de que las fuentes de imagen del campo de reacción tengan componentes distintos a los dipolos, en lugar de analizar los datos utilizando polos discretos, la unidad de control 50 usa el análisis armónico esférico. Como se explica en la sección Modelo de Campo de Reacción, y a modo de ejemplo, en este documento se supone que cada bobina 32 genera cinco imágenes multipolares en el colimador 62, y cinco imágenes multipolares en el detector 64. Las ubicaciones de las imágenes actúan como puntos de expansión para las funciones armónicas esférica asumidas para describir los campos de reacción. Los expertos en la materia podrán ajustar la presente descripción para otros números de imágenes en el colimador y/o el detector.

10 En la conclusión de la etapa 110, que es típicamente la conclusión de la fase de calibración, la unidad de control ha caracterizado todas las múltiples fuentes de imagen de cada elemento perturbador. Para cada elemento perturbador, la caracterización incluye ubicaciones de las fuentes de imagen en el perturbador, y la determinación de los elementos de una matriz de campo de reacción [$T_{reacción}$] generada por las fuentes de imagen de cada elemento perturbador. Para el ejemplo de realización considerado aquí, en el que el colimador 62 y el detector 64 son los elementos perturbadores, respectivas matrices [$T_{reacción}$]_{colimador} y [$T_{reacción}$]_{detector} se determinan.

15 En una realización, el detector tiene un marco rectangular exterior que tiene dimensiones de 38 cm X 48 cm. Se supone que las cinco fuentes de imagen para el detector están ubicadas aproximadamente a 10 cm de las esquinas del rectángulo y en el centro del rectángulo, y aproximadamente a 10 cm debajo de la superficie del detector. El exterior del colimador tiene dimensiones rectangulares similares, y las cinco fuentes de imagen del colimador están dispuestas de manera similar a las del detector.

20 En la fase operativa, la unidad utiliza matrices [$T_{reacción}$]_{colimador} y [$T_{reacción}$]_{detector} para calcular el campo de reacción generado por las fuentes de imagen.

25 En una etapa 112 de la primera fase operativa, la unidad de control activa bobinas transmisoras 32, en el caso de que se han desactivado después de la etapa 110.

30 En un paso de perturbación 114, el fluoroscopio 60 es movido en una LO conocida, es decir, el detector está en una LO conocida y el colimador también está en una LO conocida, en las proximidades de la región 30, y la unidad de control 50 registra las LOs conocidas. Las LOs conocidas pueden proporcionarse a la unidad de control 50 mediante uno de los métodos descritos anteriormente para el proceso de calibración.

35 En una posición inicial para determinar la etapa 118, las señales medidas de la unidad de control generadas por los sensores en el extremo distal 21 de la sonda 22. La unidad de control, como una primera aproximación, se supone que el campo determinado a partir de las señales es un campo no perturbado. Usando los resultados del primer paso de mapeo 106, la unidad de control determina una posición aproximada del extremo distal.

40 En una etapa de corrección de campo 120, la unidad de control 50 calcula el campo de reacción, en la posición determinada en la etapa anterior, utilizando la ecuación (7). La unidad de control resta el campo de reacción del campo medido para generar una estimación mejorada del campo no perturbado en la posición.

45 En una etapa de determinación mejorada de posición 122, la unidad de control utiliza el valor del campo no perturbado y el valor del campo determinado en el paso 120 para hacer una determinación mejorada de la posición del extremo distal.

50 En una etapa de comparación opcional 124, la unidad comprueba el control si la diferencia entre la última posición y la penúltima posición, determinada en el paso 122 es menor que un valor predeterminado, que es típicamente aproximadamente 0,1 mm. Si la diferencia es mayor o igual que el valor preestablecido, la unidad de control vuelve al paso 122. Si la diferencia es menor que el valor preestablecido, la unidad de control continúa hasta un paso final 126.

55 Se entenderá que las etapas 120 a 124 describen un bucle iterativo opcional en el que la unidad de control realiza una determinación cada vez más exacta de la posición del extremo distal, mientras que también se realiza una determinación cada vez más exacta del campo no perturbado en la posición.

60 En algunas realizaciones, un bucle en general similar al definido por pasos 120 y 124, pero sin incluir la etapa 122, se realiza en las mediciones temporalmente secuenciales. En este caso, la corrección del campo de reacción se aplica a la siguiente medición a tiempo para cada sensor. En una de tales realizaciones, donde las mediciones se calculan cada 16 ms, los inventores han descubierto que para un sensor estacionario, se requieren tres o menos iteraciones para proporcionar un valor verdadero de la posición del sensor.

65 En la etapa final de 126, la unidad de control utiliza la última determinación de la posición que se encuentra en la etapa 122 como la posición del extremo distal.

La FIG. 5 es una ilustración gráfica esquemática de un sistema sensor de posición alternativo 150, de acuerdo con una realización de la presente invención. FIGS. 6A y 6B son diagramas esquemáticos de porciones del sistema 150, y de elementos usados en la calibración del sistema, de acuerdo con una realización de la presente invención. Además de las diferencias descritas a continuación, el funcionamiento del sistema 150 es generalmente similar al del sistema 20 (FIGS. 1- 4), y los elementos indicados por los mismos números de referencia en ambos sistemas 20 y 150 son generalmente similares en construcción y en funcionamiento. Por claridad y simplicidad, algunos elementos del sistema 150, que están presentes en el sistema 20 y se ilustran en la FIG. 1, no se muestran en la FIG. 5.

En el sistema 150, una o más marcas de referencia 152 están fijadas a un elemento de fluoroscopio 60. En la presente memoria, a modo de ejemplo, se supone que dos marcas 152 se adjuntan al colimador 62. Además, dos o más cámaras 154 están fijamente unidas a la almohadilla de ubicación 26. Las cámaras 154 están bajo el control de la unidad de control 50, de modo que el procesador 52 puede recibir y procesar las imágenes generadas por las cámaras. Las cámaras se fijan a la almohadilla de localización 26 con ubicaciones y orientaciones para que las imágenes que forman incluyan imágenes de marcas fiduciales 152.

Como se describe en más detalle a continuación con referencia al diagrama de flujo de la FIG. 7, la unidad de control 50 utiliza las imágenes de la cámara de marcas de referencia 152 para determinar la ubicación y la orientación del fluoroscopio 60, incluyendo su colimador 62 y el detector 64, con respecto a la almohadilla de localización 26. Para realizar esta determinación, las ubicaciones de las cámaras están registradas con respecto a la almohadilla de localización. El registro de las cámaras con la almohadilla de localización y la determinación de la relación de las imágenes de marca fiducial con la ubicación y orientación del fluoroscopio se realizan mediante la unidad de control 50 de acuerdo con el diagrama de flujo de la FIG. 7.

El registro se puede realizar usando un portapiezas de calibración preconstruido extraíble 156 encajado en una posición conocida en la almohadilla de localización. En algunas realizaciones, la plantilla 156 es plegable, estando articulada en las articulaciones 158 y 160. Haciendo que la plantilla 156 se pueda plegar, un ingeniero de campo puede actualizar fácil y eficientemente la plantilla en la almohadilla de localización 26 en un sistema de detección de posición existente 20, como se ilustra en la FIG. 6B. Las imágenes de los elementos de la portapiezas 156 se utilizan para alinear las cámaras 154 en la almohadilla de localización, y para corregir los errores ópticos que puedan ser introducidos por las cámaras.

La unidad de control 50 puede determinar la relación de las imágenes de marca fiducial con la ubicación y orientación del fluoroscopio utilizando un sistema de calibración de fluoro (FCS) 162, ilustrado en las FIGS. 5 y 6A. FCS 162 comprende un segundo par de cámaras 164 que pueden transmitir sus imágenes a la unidad de control. Las cámaras están montadas en un soporte 166, y cada cámara puede ser panoramizada e inclinada de forma independiente según los comandos recibidos de la unidad de control 50.

La FIG. 7 es un diagrama de flujo 200 de pasos realizados por la unidad de control 50 en el sistema operativo 150, de acuerdo con una realización de la presente divulgación. El diagrama de flujo 200 se divide en una fase de calibración 202 y una fase operativa 204.

En una primera etapa 206 de la fase de calibración, las marcas fiduciales 152 están fijadas al fluoroscopio 60. Las marcas de referencia se posicionan de modo que sea en el ámbito de vista de las cámaras 154 cuando las cámaras se han conectado, como se describe a continuación, a la almohadilla de localización 26. Normalmente, el elemento del fluoroscopio al que se fijan las marcas se selecciona para que las marcas estén dentro de los campos de visión de al menos una de las cámaras 154 para sustancialmente todas las posiciones operativas y orientaciones del fluoroscopio. Aquí, a modo de ejemplo, se supone que las marcas fiduciales se fijan al colimador. En algunas realizaciones, se usan más de dos cámaras 154 en el sistema 150 de modo que las marcas fiduciales 152 están dentro de los campos de visión de al menos una de las cámaras para todas las ubicaciones y orientaciones del fluoroscopio.

En una etapa de la instalación de la cámara 208, las cámaras 154 están unidas de manera fija a la almohadilla de localización 26, de modo que las cámaras están en ubicaciones conocidas y tienen orientaciones conocidas. En algunas realizaciones, las cámaras se alinean a sus ubicaciones y orientaciones conocidas, después del acoplamiento, usando el portapiezas 156, que actúa como un objeto de calibración para las cámaras. Las imágenes del portapiezas formadas por cada una de las cámaras permiten que las cámaras estén alineadas correctamente, así como también proporcionan datos que permiten que la unidad de control 50 corrija las imperfecciones en las imágenes de las cámaras. Alternativamente, se puede usar cualquier otro método conveniente para fijar cámaras 154 en ubicaciones y orientaciones conocidas con respecto a la almohadilla de localización, y para corregir imperfecciones en las imágenes de las cámaras.

En una etapa de configuración 210, FCS 162 está posicionada de manera fija en un lugar conocido con respecto a la almohadilla de localización 26. El posicionamiento de FCS 162 puede ser mediante la fijación de

soporte 166 de las FCS a la mesa 24 (como se ilustra en la FIG. 5), o a cualquier otro objeto conveniente, como la almohadilla de localización 26 en sí misma. El FCS 162 está posicionado de modo que las cámaras 164, montadas en el soporte 166, puedan ser giradas por la unidad de control para que estén siempre habilitadas para obtener imágenes de las marcas fiduciales 152.

5 En una etapa de medición de datos 212, el fluoroscopio 60 se mueve en varias posiciones diferentes, es decir, múltiples ubicaciones y orientaciones diferentes, usando el controlador de fluoroscopio 61. En cada posición diferente, la unidad de control 50 transmite señales a las cámaras 164 de modo que las cámaras están en ángulos de giro e inclinación conocidos. La unidad de control 50 hace que las cámaras se desplacen y/o inclinen de manera que cada cámara 164 toma imágenes de las marcas fiduciales 152. La unidad de control 50 registra los ángulos de panorámica e inclinación de cada cámara (la unidad de control es consciente de la orientación de cada cámara 164 desde que envió las señales de panorámica e inclinación), así como las imágenes de las marcas fiduciales formadas por cada cámara.

15 Además, en cada posición diferente del fluoroscopio, la unidad de control 50 graba las imágenes de las marcas de referencia generadas por cada cámara 154.

20 En una etapa de correlación 214, la unidad de control 50 genera una correlación entre las imágenes de marcas fiduciales de las cámaras 164 y de las cámaras 154. La correlación permite a la unidad de control registrar los ejes de los dos sistemas, es decir, el eje del fluoroscopio y el eje de la almohadilla de localización.

Una vez que el registro se ha realizado, en un último paso 216 de la fase de calibración, FCS 162, incluyendo sus cámaras 164, se retira.

25 En un paso de operación 218 de la fase operativa, las cámaras 154 están activadas. En el presente ejemplo, cuando las marcas fiduciales están unidas al colimador, la unidad de control recibe imágenes de marca fiducial de las cámaras, y analiza las imágenes, usando la correlación determinada en el paso 214, para determinar la ubicación y orientación del colimador con respecto a la almohadilla de localización. Dado que el colimador y el detector de fluoroscopio 60 están en una relación física fija entre sí, la ubicación y orientación del colimador permiten a la unidad de control conocer la ubicación y la orientación del detector, hasta la distancia entre ellos. Este valor faltante se determina típicamente mediante el uso de una técnica de optimización, similar al método de Ubicación del Fluoroscopio Adaptativo que se describe a continuación.

35 El diagrama de flujo 200 se ha descrito con referencia a la determinación de la ubicación y orientación de un fluoroscopio con respecto a la almohadilla de localización. Se entenderá que las etapas del diagrama de flujo se pueden implementar, *mutatis mutandis*, para determinar la ubicación y orientación de otro objeto, normalmente uno que pueda interferir con los transmisores del panel de ubicación, que se coloca y se mueve en la proximidad de la almohadilla de localización. Se supone que todas estas implementaciones están dentro del alcance de la presente divulgación.

40 **MODELO DE CAMPO DE REACCIÓN**

45 El modelo de campo de reacción de realizaciones de la presente divulgación supone que el campo de reacción magnética, causado por un elemento de perturbación magnética colocado en una fuente de campo magnético, se genera por una pluralidad de fuentes puntuales en el elemento. La fuente de campo magnético puede ser generada por cualquier número de transmisores de campo. Las fuentes puntuales pueden considerarse imágenes en el elemento perturbador de un transmisor de campo.

50 La descripción del modelo, como se relaciona con realizaciones de la presente invención, hace las siguientes suposiciones por simplicidad:

- 55 • Elementos perturbadores El fluoroscopio 60 comprende el colimador 62 y el detector 64 conectados por el rayo C 66. Los inventores han encontrado que se obtienen buenos resultados para el campo de reacción generado por el fluoroscopio si se supone que solo el detector y el colimador son elementos perturbadores, de modo que en el análisis a continuación solo se asumen dos de tales elementos. Sin embargo, se puede aplicar el mismo tipo de análisis para otros elementos perturbadores, de modo que el alcance de la presente invención incluye cualquier cantidad de tales elementos.
- 60 • Número y tipo de transmisores. Para corresponder con las tres bobinas triaxiales de la disposición 28, se supone que hay nueve transmisores de campo magnético. Cada uno de los transmisores es aproximadamente dipolar. Sin embargo, en general no hay restricciones en el número o disposición de los transmisores de campo.
- 65 • Fuentes puntuales en cada elemento perturbador. A modo de ejemplo, se supone que un transmisor dado genera como imágenes en cada elemento perturbador cinco fuentes puntuales, también denominadas aquí

puntos de expansión (ya que los armónicos esféricos a los que se hace referencia a continuación se expanden desde estos puntos). En otras realizaciones, pueden suponerse otros números de fuentes de puntos de imagen por transmisor, y no es necesario que sea igual el número de fuentes para diferentes elementos perturbadores. En realizaciones de la presente invención, se supone que las cinco fuentes puntuales correspondientes a diferentes transmisores sean congruentes entre sí. Además, se supone que las cinco fuentes puntuales están en el centro, y en las esquinas, de un rectángulo.

- Armónicos esféricos. Se puede considerar que cada fuente puntual está compuesta de dipolos, cuádrupolos y polos de orden superior. En lugar de analizar los componentes por separado, el modelo supone que el campo de cada fuente puntual puede representarse mediante una expansión armónica esférica. Los inventores han descubierto que expandir a la orden 3 da buenos resultados, pero se apreciará que el alcance de la presente invención incluye la expansión a órdenes inferiores o superiores.
- Mediciones de posición. Para simplificar, se supone que todas las posiciones se miden en relación con un solo conjunto de ejes. A modo de ejemplo, se asume que el único conjunto de ejes se basa en el detector 64, que tiene su origen en la fuente central del punto de imagen del detector, con los ejes x e y definidos por los lados del rectángulo de las fuentes puntuales en el detector.

Un transmisor

En primer lugar, consideramos un transmisor, y un punto de expansión formado por el transmisor en un elemento perturbador, que, salvo que se indique lo contrario, se supone en el presente documento que es el detector 64. Suponiendo por simplicidad que el punto de expansión está en el origen (0,0,0) de un conjunto de coordenadas (x,y,z) basadas en el detector, una expresión para el campo de reacción magnética (expresado como un vector de columna de 3 elementos) en una posición (x,y,z) desde el origen es:

$$\begin{bmatrix} B_x(x,y,z) \\ B_y(x,y,z) \\ B_z(x,y,z) \end{bmatrix} = [T_{espacial}(x,y,z)] \cdot [C_0] \tag{1}$$

donde $\begin{bmatrix} B_x(x,y,z) \\ B_y(x,y,z) \\ B_z(x,y,z) \end{bmatrix}$ es el campo de reacción expresado como un vector de columna,

[C₀] es un vector de columna de 15 elementos, basado en los términos armónicos esféricos de las órdenes 1- 3, expandido sobre el origen (una expresión para una versión expandida de [C] se da a continuación), y [T_{espacial}(x,y,z)] es una matriz de transferencia espacial 3 X 15 derivada de los términos armónicos esféricos de [C₀].

FIGS. 8A - 8G muestran cada uno de los elementos de [T_{espacial} (x,y,z)], de acuerdo con una realización de la presente divulgación.

Para cinco puntos de expansión (0,0,0), (x₁, y₁, z₁), (x₂, y₂, z₂), (x₃, y₃, z₃), (x₄, y₄, z₄), la ecuación (1) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} B_x(x,y,z) \\ B_y(x,y,z) \\ B_z(x,y,z) \end{bmatrix} = [T_{espacial}(x,y,z)(5)] \cdot [C_5] \tag{2}$$

donde [T_{espacial} (x,y,z) (5)] es una matriz de transferencia espacial de 3 X 75, y

[C₅] es un vector de columna de 75 elementos.

[T_{espacial} (x,y,z) (5)] se forma concatenando cuatro matrices [T_{espacial}], cada una de ellas desplazada del origen por las coordenadas de sus respectivos desplazamientos, con [T_{espacial} (x,y,z)]. Es decir,

$$[T_{espacial}(x,y,z) (5)] \equiv \begin{bmatrix} [T_{espacial}(x,y,z)] & \dots & [T_{espacial}(x-x_4,y-y_4,z-z_4)] \end{bmatrix} \tag{3}$$

[C₅] se forma apilando 5 vectores de columna, cada uno basado en términos armónicos esféricos expandidos alrededor de un punto de expansión respectivo. Es decir,

$$[C_5] \equiv \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Campo de un transmisor

El campo de cualquier transmisor dado en cualquier punto en la región 30 puede calcularse a partir de la calibración realizada durante el proceso de fabricación de la almohadilla de localización. Para caracterizar el transmisor, consideramos una serie de puntos en la región del detector 64. Los inventores han encontrado que son suficientes 17 puntos, pero se puede usar cualquier otro número conveniente. El campo en los 17 puntos puede estar representado por un vector de columna de 51 elementos $[B_{satélite}]$ del campo no perturbado donde

$$[B_{satélite}] \equiv \begin{bmatrix} B_x^1 \\ B_y^1 \\ B_z^1 \\ \vdots \\ B_x^{17} \\ B_y^{17} \\ B_z^{17} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[C_5]$ se supone que depende de $[B_{satélite}]$ según la siguiente ecuación:

$$[C_5] = [T_{reacción}] \cdot [B_{satélite}] \quad (6)$$

donde $[T_{reacción}]$ es una matriz de reacción 75 X 51 con elementos que representan las propiedades de reacción del detector.

Caso general

El uso de las derivaciones anteriores, una expresión para el campo magnético de reacción detectora en un punto (x,y,z) puede escribirse como la ecuación (7) a continuación. La expresión asume que hay nueve transmisores y cinco puntos de expansión en el detector.

$$[B_{reac}(x,y,z)] = [T_{espacial}(x,y,z)(5)] \cdot [T_{reacción}] \cdot [B_{satélite}(9)] \quad (7)$$

donde $[B_{reac}(x,y,z)]$ es una matriz de campo de reacción 3 X 9 que tiene 9 columnas, cada una similar a la columna del vector de campo de reacción de la ecuación (1),

$$[B_{reac}(x,y,z)] \equiv \begin{bmatrix} B_x^1 & & B_x^9 \\ B_y^1 & \dots & B_y^9 \\ B_z^1 & & B_z^9 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$[B_{satélite}(9)]$ es una matriz 51 X 9 del campo no perturbado, que tiene columnas similares al vector $[B_{satélite}]$ (ecuación (5)),

$$[B_{satélite}(9)] \equiv \begin{bmatrix} B_x^{1,1} & B_x^{1,9} \\ \vdots & \vdots \\ B_x^{17,1} & B_x^{17,9} \end{bmatrix} \quad (9)$$

y $[T_{espacial}(x,y,z)(5)]$ y $[T_{reacción}]$ tienen la misma dimensionalidad que para las ecuaciones (2) y (6), pero los elementos corresponden a los requisitos de la ecuación (7).

Se apreciará que el producto $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)(5)] \cdot [T_{\text{reacción}}]$ caracteriza efectivamente las cinco imágenes formadas en el detector.

La ecuación (7) puede usarse tanto en la fase de calibración como en la fase operativa del sistema 20, como se describe a continuación.

En algunas realizaciones, en lugar de utilizando la ecuación (7) como es, la ecuación se adapta dividiendo $[Breac(x,y,z)]$ y $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)(5)]$ por $\|B(x,y,z)\|$, donde $B(x,y,z)$ es el campo no perturbado de los transmisores en (x,y,z) . Los inventores han descubierto que tal adaptación puede dar mayor peso a las ubicaciones en las que el campo del transmisor es débil, y puede compensar los errores en la medición de este campo.

Para simplificar, la descripción en el presente documento supone que la ecuación (7) se utiliza como es, y los de experiencia ordinaria en la técnica serán capaces de alterar la descripción, *mutatis mutandis*, para formas de realización de aplicación de la adaptación a la ecuación (7) descrita arriba.

Fase de Calibración

En la fase de calibración, la ecuación (7) se utiliza para encontrar valores de $[T_{\text{reacción}}]$.

Para una posición específica (x,y,z) los elementos de $[Breac(x,y,z)]$ se pueden encontrar mediante la búsqueda de la diferencia entre el campo con el detector 64 en una posición donde perturba el campo, y con el detector colocado para no perturbar el campo.

Los elementos de $[T_{\text{espacial}}(5)(x,y,z)]$ se puede encontrar a partir de las ecuaciones que se muestran en la FIG. 8, suponiendo que las posiciones de los puntos de expansión (que se refiere con referencia a la ecuación (2)) se usan, según corresponda, en las ecuaciones.

Por lo tanto, en la ecuación (7), todos los términos excepto $[T_{\text{reacción}}]$ son conocidos.

La $[T_{\text{reacción}}]$ se puede encontrar manipulando la ecuación (7), por métodos que serán familiares para aquellos que tengan una habilidad en el arte. Uno de estos métodos para encontrar $[T_{\text{reacción}}]$ vectoriza $[Breac(x,y,z)]$ y $[T_{\text{reacción}}]$, y aplica el producto Kronecker, \otimes , para producir una ecuación reformada:

$$\begin{aligned} \text{vec}[Breac(x,y,z)] = \\ [B_{\text{sátélite}}(9)]^T \otimes [T_{\text{espacial}}(5)(x,y,z)] \cdot \text{vec}[T_{\text{reacción}}] \end{aligned} \quad (10)$$

donde el superíndice T indica la transposición.

$\text{vec}[T_{\text{reacción}}]$ se encuentra multiplicando ambos lados de la ecuación (10) por $([B_{\text{sátélite}}(9)]^T \otimes [T_{\text{espacial}}(5)(x,y,z)])^+$ (el pseudo-inverso de $([B_{\text{sátélite}}(9)]^T \otimes [T_{\text{espacial}}(5)(x,y,z)])$). $[T_{\text{reacción}}]$ se genera dividiendo $\text{vec}[T_{\text{reacción}}]$ en longitudes de columna apropiadas.

Tal método encuentra $[T_{\text{reacción}}]$ para un valor de (x,y,z) y para el detector (y consecuentemente los puntos de expansión) en una posición específica.

en la fase de calibración asignador 70 se asume para hacer mediciones en valores N de (x,y,z) , usando sensores N. Para puntos N $(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_N, y_N, z_N)$ la ecuación (10) puede ser reescrita, al apilar las matrices de la ecuación:

$$\begin{bmatrix} \text{vec}[Breac(x_1,y_1,z_1)] \\ \vdots \\ \text{vec}[Breac(x_N,y_N,z_N)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [B_s]^T \otimes [T_s(x_1,y_1,z_1)] \\ \vdots \\ [B_s]^T \otimes [T_s(x_N,y_N,z_N)] \end{bmatrix} \cdot \text{vec}[T_{\text{reacción}}] \quad (11)$$

La ecuación (11) es para una posición del detector, y puede reescribirse:

$$[\text{vec}[B_{\text{pos1}}]] = [B_s^T \otimes T_s]_{\text{pos1}} \cdot \text{vec}[T_{\text{reacción}}] \quad (12)$$

Suponiendo que en la fase de calibración el detector se coloca en posiciones M, la ecuación (12) puede adaptarse, por apilamiento adicional de matrices, para formar la ecuación (13):

$$\begin{bmatrix} [vec[B_{pos1}]] \\ \vdots \\ [vec[B_{posM}]] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [B_s^T \otimes T_s]_{pos1} \\ \vdots \\ [B_s^T \otimes T_s]_{posM} \end{bmatrix} \cdot vec[T_{reacción}] \quad (13)$$

En cuanto al método descrito anteriormente para la solución de la ecuación (10), la solución para $[T_{reacción}]$ en la ecuación (13) puede encontrarse al multiplicar ambos lados de la ecuación por el pseudo inverso

de $\begin{bmatrix} [B_s^T \otimes T_s]_{pos1} \\ \vdots \\ [B_s^T \otimes T_s]_{posM} \end{bmatrix}$.

$$\begin{bmatrix} [B_s^T \otimes T_s]_{pos1} \\ \vdots \\ [B_s^T \otimes T_s]_{posM} \end{bmatrix}$$

En una realización en la que $N=50$ y $M=30$, la matriz tiene dimensiones aproximadas de 40.000×4.000 . La pseudoinversión, como se conoce en la técnica, puede encontrarse usando la descomposición de valores singulares. En una realización, el número de valores singulares en la pseudoinversión se minimiza al encontrar un punto en el que la calidad de la solución, es decir, lo bien que la solución corrige la perturbación, comienza a degradarse. Típicamente, se usan valores de hasta aproximadamente 10^{-6} .

La fase de calibración se realiza típicamente para encontrar una $[T_{reacción}]$ para cada elemento perturbador. Por lo tanto, para el fluoroscopio 60, en el que se supone que el colimador 62 y el detector 64 son los únicos elementos perturbadores, se encuentran una matriz $[T_{reacción}]_{colimador}$ de y una matriz $[T_{reacción}]_{detector}$. Para encontrar el $[T_{reacción}]_{colimador}$ típicamente la mesa 24 se baja mientras que se cambian las posiciones del fluoroscopio, de modo que el efecto del detector es insignificante. De manera similar, para encontrar el $[T_{reacción}]_{detector}$ típicamente la mesa 24 se eleva mientras se cambian las posiciones del fluoroscopio.

Fase operativa

En la fase operativa, los valores de $[T_{reacción}]$ determinados en la fase de calibración se sustituyen en la ecuación (7) para encontrar el valor de $[Breac(x,y,z)]$. Si hay más de un elemento perturbador, se supone que el campo de reacción es la superposición lineal de los valores respectivos de $[Breac(x,y,z)]$ de cada elemento.

UBICACIÓN DE FLUOROSCOPIO ADAPTABLE

Con referencia de nuevo a la FIG. 1, las realizaciones de la presente invención proporcionan un método para localizar de forma adaptativa el fluoroscopio 60 con respecto a la almohadilla de localización 26. El método supone que un registro preliminar de la trama de fluoroscopio de referencia se ha hecho con el marco de referencia de la almohadilla de localización, mediante cualquier proceso conveniente. Tal proceso normalmente toma imágenes de un objeto en la mesa 24 utilizando el fluoroscopio, encuentra distancias al objeto de las bobinas 32 de la almohadilla de localización, y realiza el registro mediante la comparación de las imágenes con las distancias. El proceso se aplica típicamente para varias posiciones diferentes del fluoroscopio y utiliza parámetros conocidos del fluoroscopio, como la distancia entre el colimador y el detector, y la orientación del fluoroscopio a medida que se visualiza el objeto. El registro preliminar se realiza típicamente al comienzo de un procedimiento clínico que se realiza en el paciente en el sistema 20.

Durante el procedimiento tres electrodos de parche se colocan típicamente en el pecho del paciente, y en el presente documento se supone que cada parche comprende un sensor similar al sensor 76. Aunque los sensores de parche varían típicamente en posición con respecto a la almohadilla de localización, estas posiciones pueden estimarse a partir de los campos que detectan. Los cinco sensores (cada uno con tres bobinas) están sujetos a los nueve campos transmitidos desde las bobinas 32, así como a los campos de imagen del colimador y el detector, de modo que en cualquier momento hay 135 señales medidas independientemente valoradas, denominadas aquí "Meas," desde los sensores que se ingresan al procesador 52. Se entenderá que este número de señales proporciona un conjunto de valores altamente redundante en términos del número de grados de libertad requeridos para describir completamente la ubicación y orientación del fluoroscopio y sus componentes. Además, los campos no perturbados medidos en los sensores 76 permiten mediciones directas de los campos de reacción en los sensores.

El procesador 52 puede así usar las señales Meas para calcular la ubicación y la orientación del fluoroscopio, así como las posiciones del detector 64 y el colimador 62. El procesador calcula la siguiente función de costo:

$$C = \frac{\sum_{\text{sensores}} \| \text{Meas} - M(\vec{r}_{\text{sensor}}, \vec{O}_{\text{sensor}}, \varphi_{\text{fluoro}}, \theta_{\text{fluoro}}, d_{\text{det}}, d_{\text{col}}) \|}{\sum_{\text{sensores}} \| \text{Meas} \|} \quad (14)$$

5

donde M es una suma de campos generados por la almohadilla de localización 26 y el modelo de campo de reacción descrito anteriormente,

10 \vec{r}_{sensor} es el desplazamiento de un sensor,

\vec{O}_{sensor} es la orientación de un sensor,

φ_{fluoro} es la elevación del fluoroscopio 60,

θ_{fluoro} es el acimut del fluoroscopio 60,

15 d_{det} es la distancia del detector 64, y

d_{col} es la distancia del colimador 62,

y donde todas las variables anteriores se calculan con respecto a los ejes de la ubicación y el origen.

20 Con el fin de calcular la localización y la orientación del fluoroscopio, y sus componentes, el procesador optimiza la función de coste C. La optimización normalmente implica el cálculo de los derivados primera orden y de orden superior de C, y puede utilizar cualquier método para la optimización conocido en la técnica.

25 Si bien la descripción anterior se ha referido a elementos de un fluoroscopio que son elementos perturbadores de campo magnético, se entenderá que el alcance de la presente invención incluye otros elementos perturbadores. Por ejemplo, la sonda 22 puede comprender componentes metálicos que perturban el campo magnético generado por la disposición 28, y la perturbación producida por estos componentes puede compensarse de una manera sustancialmente similar a la descrita aquí para los elementos de fluoroscopio. Tales componentes metálicos pueden incluir, pero no están limitados a, mesas de operaciones o partes de las mismas.

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un método que comprende:

5 generar, usando una pluralidad de transmisores magnéticos (32), un campo magnético en una región;
 introducir un primer elemento perturbador en la región;
 calcular un campo magnético de reacción en la región generada por una pluralidad de fuentes de punto en el
 elemento perturbador de campo;
 10 colocar una sonda (22) en la región y medir el campo magnético perturbado en la sonda; y
 determinar una ubicación de la sonda en respuesta al campo magnético perturbado medido y el campo
 magnético de reacción calculado,

en donde introducir el elemento perturbador de campo en la región comprende medir una ubicación y una
 15 orientación del elemento perturbador de campo con respecto a los ejes definidos por los transmisores magnéticos,
 en donde el elemento perturbador de campo comprende un fluoroscopio (60) que incluye un detector (64) y un
 colimador (62), y que comprende además localizar adaptativamente el fluoroscopio:

proporcionando dos sensores de referencia en la región, cada sensor de referencia configurado para generar una
 20 señal indicativa del campo magnético perturbado en el sensor de referencia;
 realizando un registro preliminar del fluoroscopio con la región; y
 introduciendo tres sensores de parche, cada sensor de parche configurado para generar una señal indicativa del
 campo magnético perturbado en el sensor de parche;
 determinando la ubicación del fluoroscopio a partir de las señales generadas por los sensores de referencia y los
 25 sensores de parche, y
 en donde la determinación de la ubicación del fluoroscopio comprende calcular la siguiente función de costes:

$$C = \frac{\sum_{\text{sensores}} \left\| Meas - M(\vec{r}_{\text{sensor}}, \vec{O}_{\text{sensor}}, \Phi_{\text{fluoro}}, \theta_{\text{fluoro}}, d_{\text{det}}, d_{\text{col}}) \right\|}{\sum_{\text{sensores}} \|Meas\|}$$

donde M es una suma del campo generado por la pluralidad de transmisores magnéticos y el campo
 magnético de reacción en la región,
 35 \vec{r}_{sensor} es el desplazamiento de un sensor,
 \vec{O}_{sensor} es la orientación de un sensor,
 Φ_{fluoro} es la elevación del fluoroscopio,
 θ_{fluoro} es el acimut del fluoroscopio,
 d_{det} es la distancia del detector, y
 40 d_{col} es la distancia del colimador,

cada variable calculada con respecto a los ejes de los transmisores.

2. Un aparato, que comprende:

45 una pluralidad de transmisores magnéticos (32) configurados para generar un campo magnético en una región;
 un elemento perturbador de campo introducido en la región; y
 un procesador (52), que está configurado para:

50 calcular un campo magnético de reacción en la región generada por una pluralidad de fuentes de punto en el
 elemento perturbador de campo;
 medir un campo magnético perturbado en una sonda (22) colocada en la región, y
 determinar una ubicación de la sonda en respuesta al campo magnético perturbado medido y el campo
 magnético de reacción calculado,

55 en donde el procesador está configurado además para medir una ubicación y una orientación del elemento
 perturbador de campo con respecto a los ejes definidos por los transmisores magnéticos,
 en donde el elemento perturbador de campo comprende un fluoroscopio (60) que incluye un detector (64) y
 un colimador (62), y que comprende además localizar adaptativamente el fluoroscopio:

60 proporcionando dos sensores de referencia en la región, cada sensor de referencia configurado para
 generar una señal indicativa del campo magnético perturbado en el sensor de referencia;
 realizando un registro preliminar del fluoroscopio con la región; y
 introduciendo tres sensores de parche, cada sensor de parche configurado para generar una señal
 indicativa del campo magnético perturbado en el sensor de parche;
 65 determinando la ubicación del fluoroscopio a partir de las señales generadas por los sensores de

referencia y los sensores de parche, y en donde la determinación de la ubicación del fluoroscopio comprende calcular la siguiente función de costes:

$$C = \frac{\sum_{\text{sensores}} \left\| Meas - M(\vec{r}_{\text{sensor}}, \vec{O}_{\text{sensor}}, \phi_{\text{fluoro}}, \theta_{\text{fluoro}}, d_{\text{det}}, d_{\text{col}}) \right\|}{\sum_{\text{sensores}} \|Meas\|}$$

donde M es una suma del campo generado por la pluralidad de transmisores magnéticos y el campo magnético de reacción en la región,

\vec{r}_{sensor} es el desplazamiento de un sensor,

\vec{O}_{sensor} es la orientación de un sensor,

ϕ_{fluoro} es la elevación del fluoroscopio,

θ_{fluoro} es el acimut del fluoroscopio,

d_{det} es la distancia del detector, y

d_{col} es la distancia del colimador,

cada variable calculada con respecto a los ejes de los transmisores.

3. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o el aparato de acuerdo con la reivindicación 2, en donde medir la ubicación y la orientación del elemento perturbador de campo comprende calcular la ubicación y la orientación adaptativamente en respuesta al campo magnético de reacción.

4. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o el aparato de acuerdo con la reivindicación 2, en donde la determinación comprende usar el campo magnético de reacción calculado para estimar un campo no perturbado sustrayendo el campo magnético de reacción calculado del campo magnético perturbado medido.

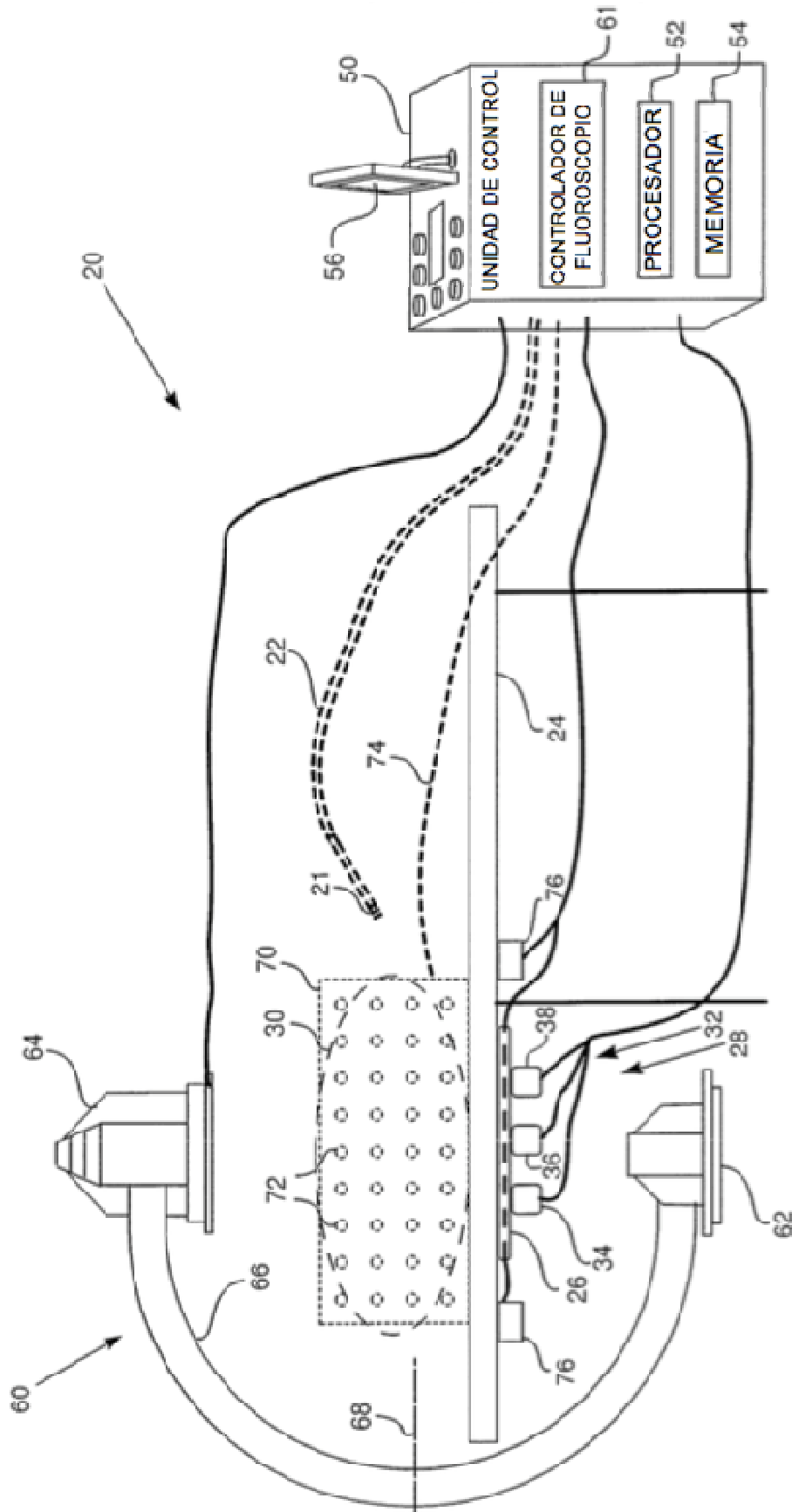


FIG. 1

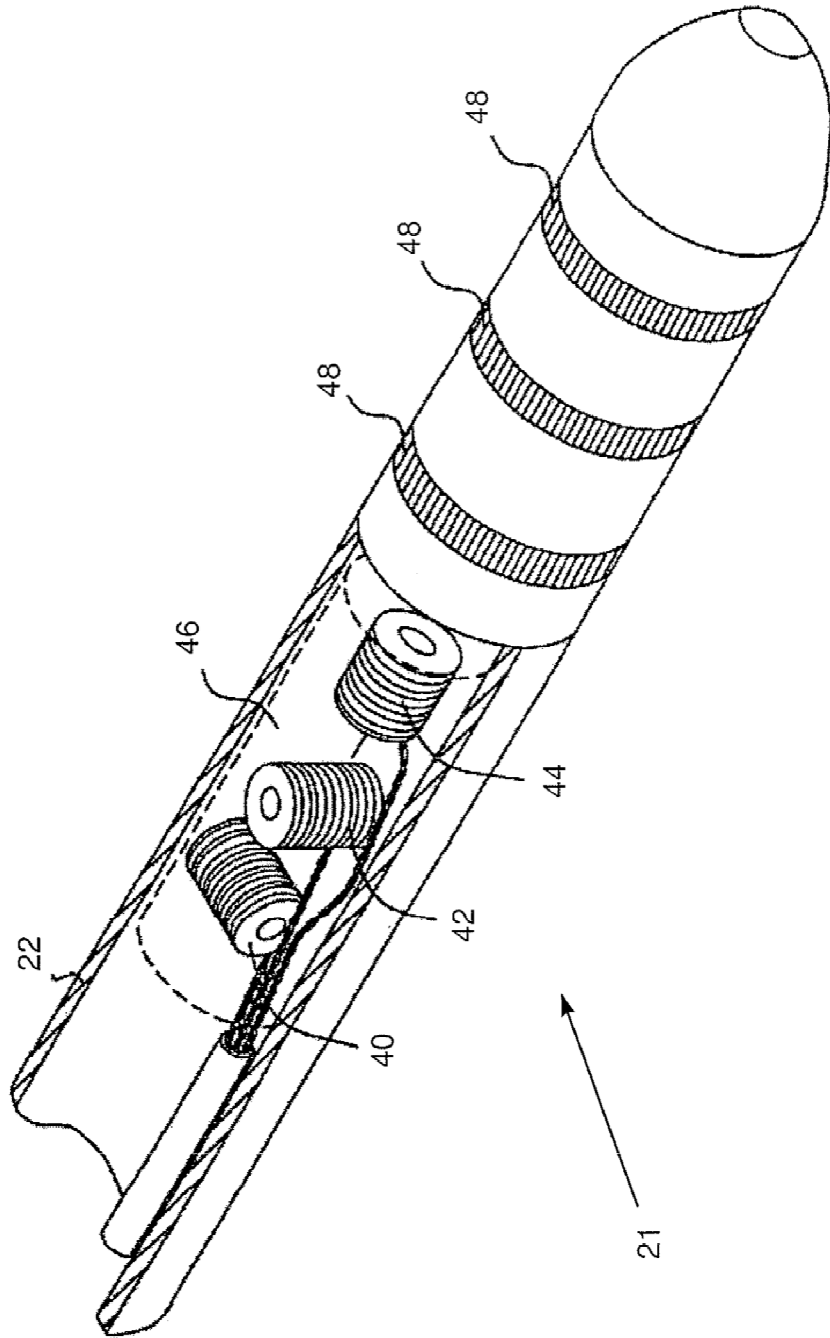


FIG. 2

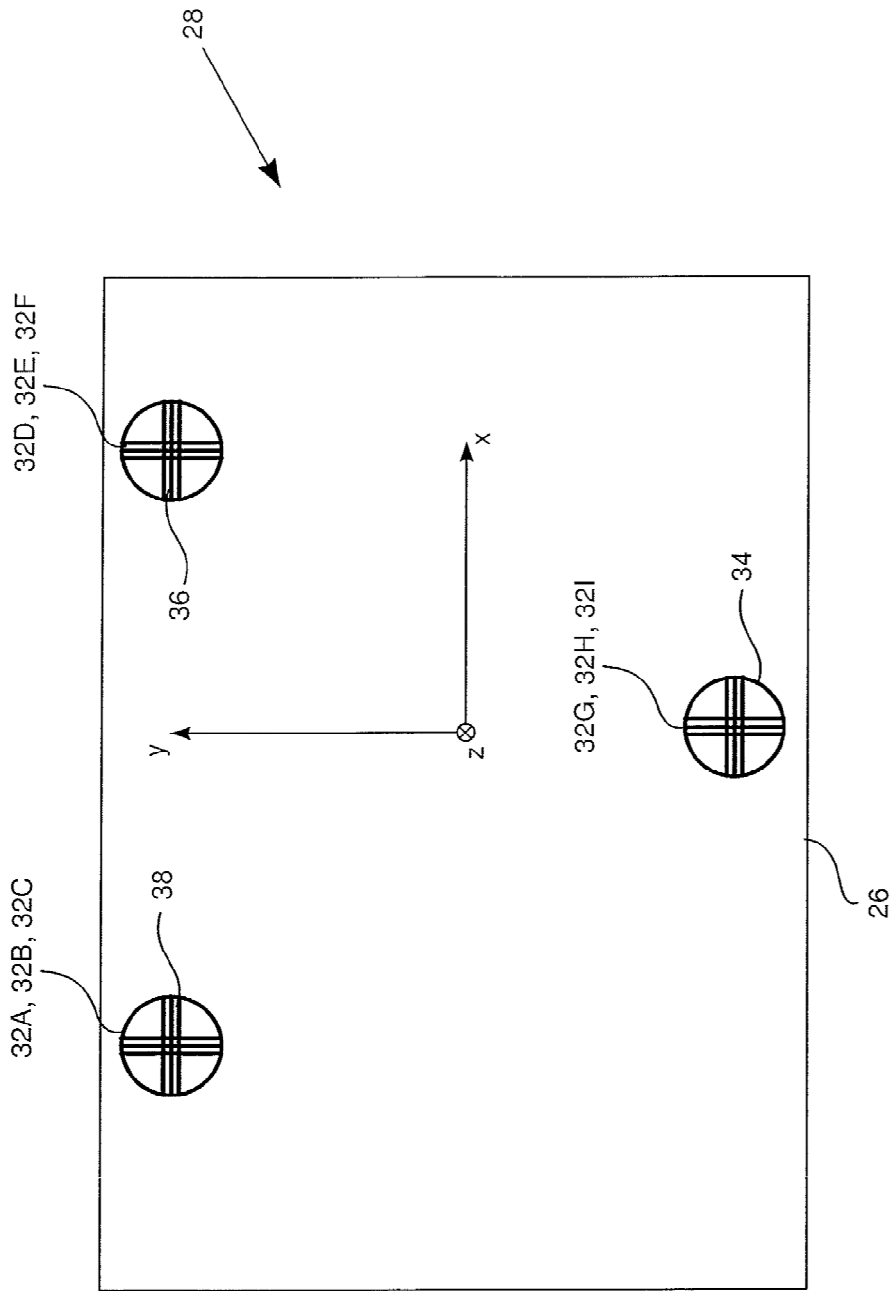


FIG. 3

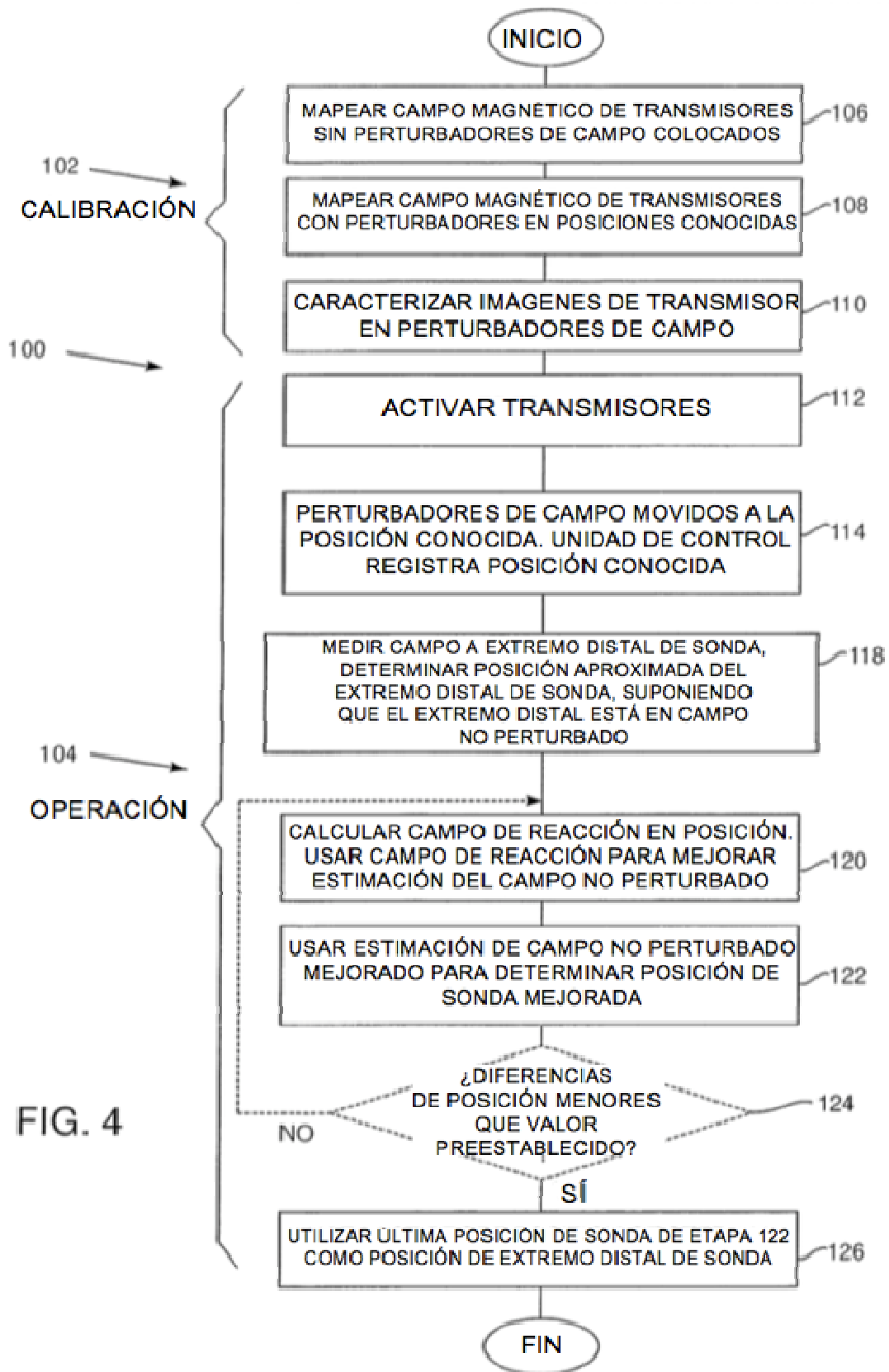


FIG. 4

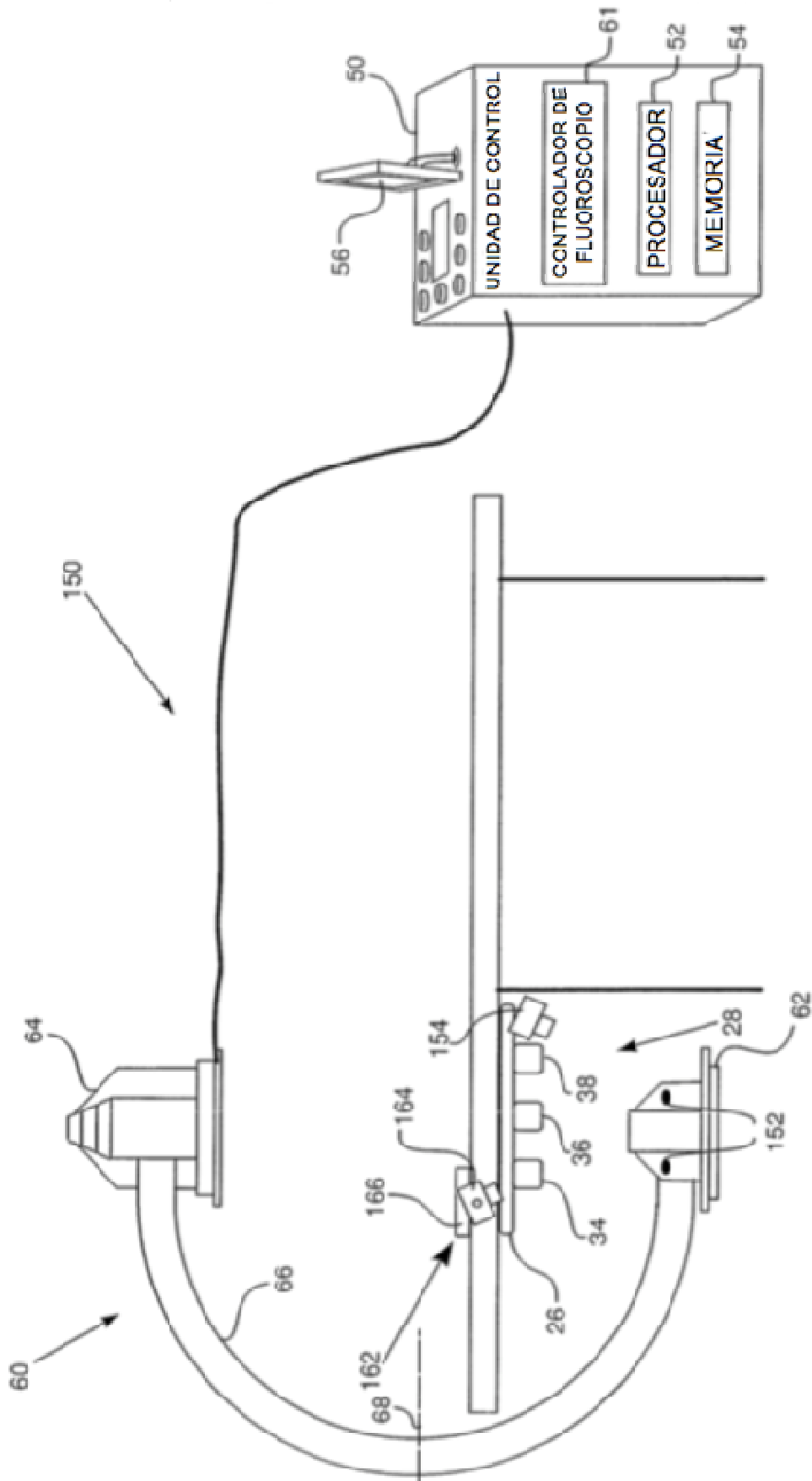


FIG. 5

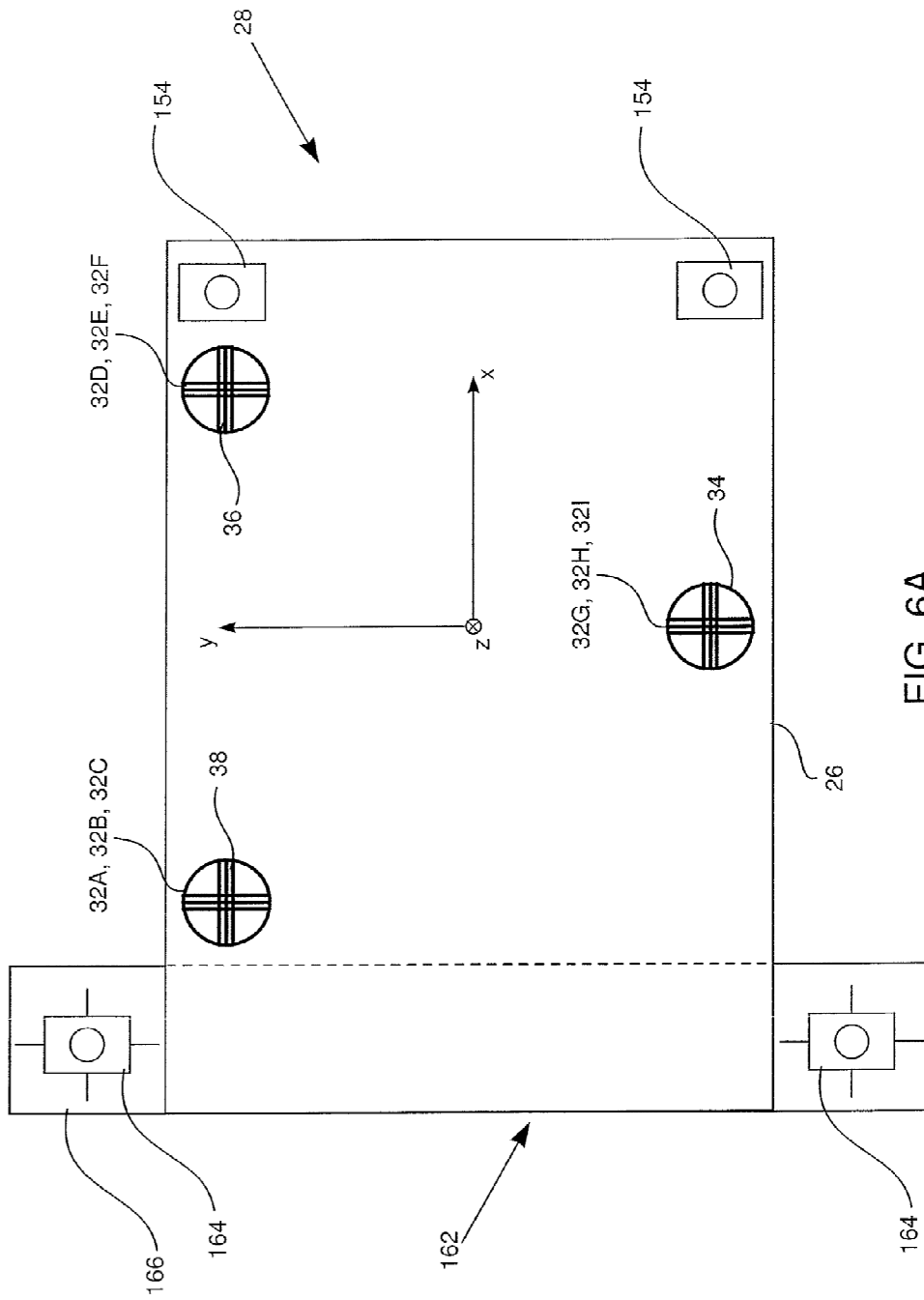


FIG. 6A

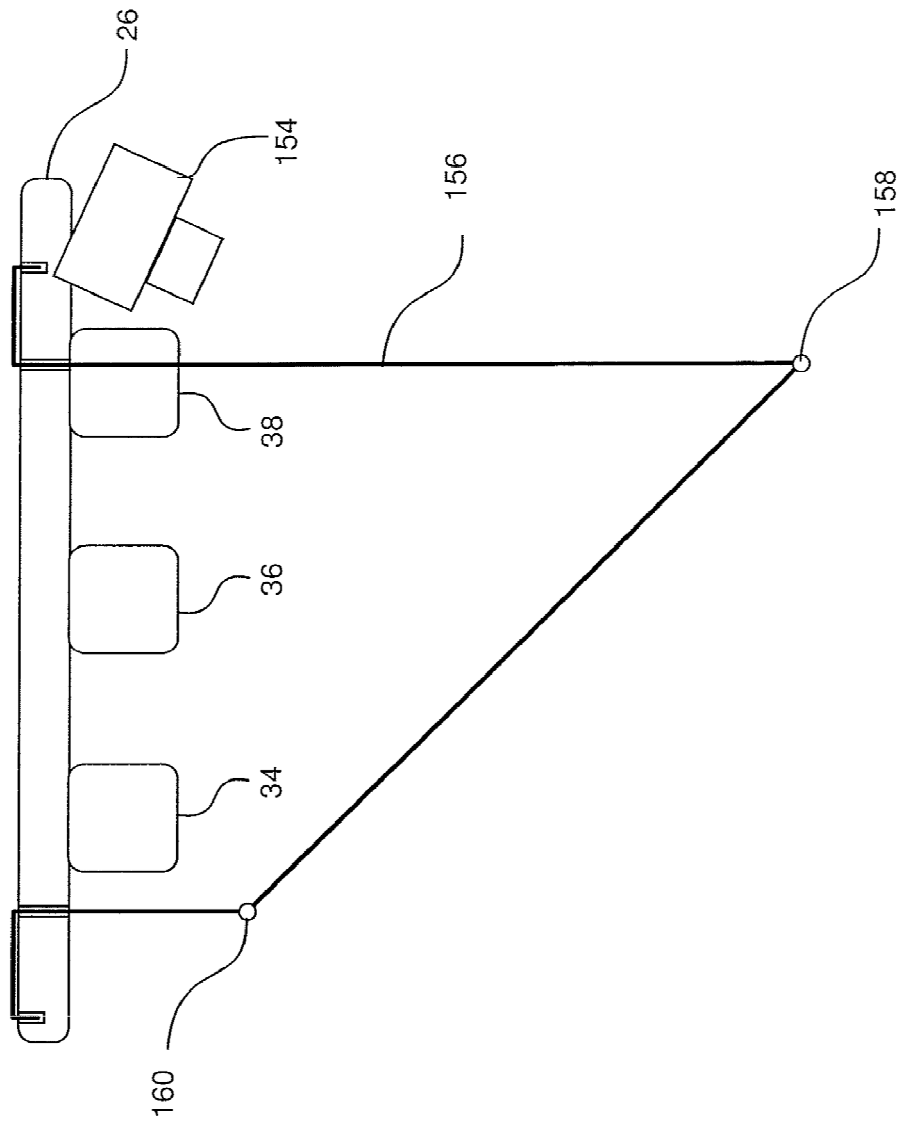


FIG. 6B

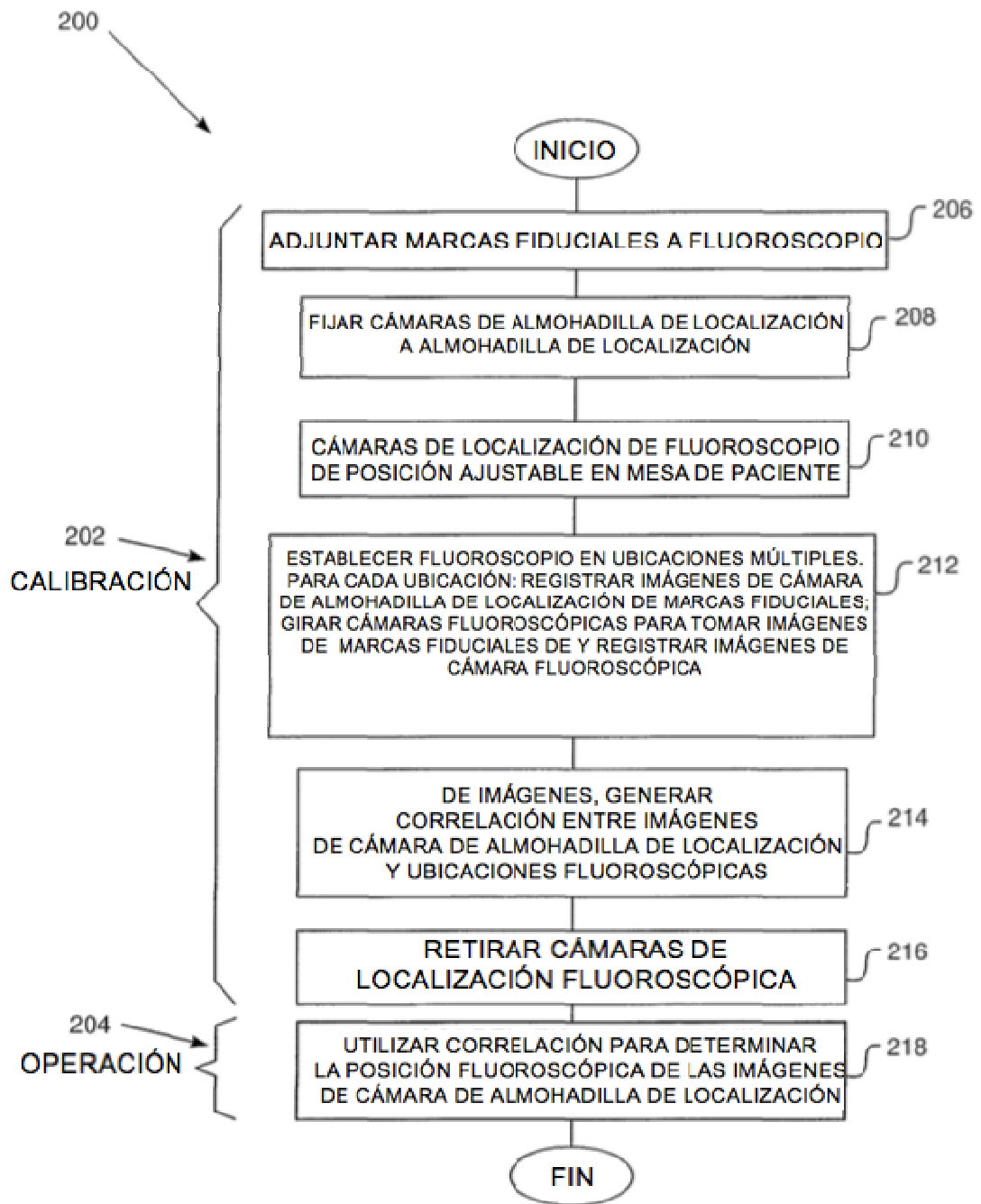


FIG. 7

COLUMNAS 1-2

$$\begin{array}{r}
 \frac{\sqrt{\frac{3}{\pi}} xz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 \frac{\sqrt{\frac{3}{\pi}} yz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 - \frac{x^2 + y^2 - 2z^2}{2\sqrt{3\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 \frac{-2x^2 + y^2 + z^2}{2\sqrt{6\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} xy}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} xz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}
 \end{array}$$

COLUMNA 3

$$\begin{array}{r}
 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} xy}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 \frac{x^2 - 2y^2 + z^2}{2\sqrt{6\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\
 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} yz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}
 \end{array}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{especial}}(x,y,z)]$

FIG. 8A

COLUMNAS 4-5

$$\begin{array}{r}
 -\frac{3x(x^2 + y^2 - 4z^2)}{4\sqrt{5\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \quad \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}}z(-4x^2 + y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 -\frac{3y(x^2 + y^2 - 4z^2)}{4\sqrt{5\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \quad -\frac{\sqrt{\frac{15}{2\pi}}xyz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 \frac{6z^3 - 9(x^2 + y^2)z}{4\sqrt{5\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \quad \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}}x(x^2 + y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}}
 \end{array}$$

COLUMNA 6

$$\begin{array}{r}
 -\frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}}y(-4x^2 + y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 -\frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}}x(x^2 - 4y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 \frac{\sqrt{\frac{15}{2\pi}}xyz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}}
 \end{array}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)]$

FIG. 8B

COLUMNA 7

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\sqrt{\frac{15}{2\pi}} xyz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 & \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}} z(x^2 - 4y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 & \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}} y(x^2 + y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}}
 \end{aligned}$$

COLUMNA 8

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}} y(-4x^2 + y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 & - \frac{\sqrt{\frac{3}{10\pi}} x(x^2 - 4y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} \\
 & \frac{\sqrt{\frac{15}{2\pi}} xyz}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}}
 \end{aligned}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)]$

FIG. 8C

COLUMNA 9

$$\frac{5xz(4z^2 - 3(x^2 + y^2))}{4\sqrt{7\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{5yz(4z^2 - 3(x^2 + y^2))}{4\sqrt{7\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{8z^4 - 24(x^2 + y^2)z^2 + 3(x^2 + y^2)^2}{4\sqrt{7\pi}(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

COLUMNA 10

$$\frac{\sqrt{\frac{3}{7\pi}}(4x^4 + 3(y^2 - 9z^2)x^2 - y^4 + 4z^4 + 3y^2z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{5\sqrt{\frac{3}{7\pi}}xy(x^2 + y^2 - 6z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{5\sqrt{\frac{3}{7\pi}}xz(3(x^2 + y^2) - 4z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)]$

FIG. 8D

COLUMNA 11

$$\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}} xz(5x^2 - 9y^2 - 2z^2)}{4(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}} yz(9x^2 - 5y^2 + 2z^2)}{4(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}} (x - y)(x + y)(x^2 + y^2 - 6z^2)}{4(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

COLUMNA 12

$$\frac{\sqrt{\frac{5}{7\pi}} (-4x^4 + 3(7y^2 + z^2)x^2 - 3y^2(y^2 + z^2))}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{5}{7\pi}} xy(13x^2 - 15y^2 + 6z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{35}{\pi}} x(x^2 - 3y^2)z}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)]$

FIG. 8E

COLUMNA 13

$$\frac{5\sqrt{\frac{3}{7\pi}}xy(x^2 + y^2 - 6z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{\sqrt{\frac{3}{7\pi}}(-x^4 + 3(y^2 + z^2)x^2 + 4y^4 + 4z^4 - 27y^2z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{5\sqrt{\frac{3}{7\pi}}yz(3(x^2 + y^2) - 4z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

COLUMNA 14

$$-\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}}yz(-6x^2 + y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}}xz(x^2 - 6y^2 + z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{15}{14\pi}}xy(x^2 + y^2 - 6z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{especial}}(x,y,z)]$

FIG. 8F

COLUMNA 15

$$\frac{\sqrt{\frac{5}{7\pi}} xy(-15x^2 + 13y^2 + 6z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{\sqrt{\frac{5}{7\pi}} (3x^4 + 3(z^2 - 7y^2)x^2 + 4y^4 - 3y^2z^2)}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

$$\frac{\sqrt{\frac{35}{\pi}} y(y^2 - 3x^2)z}{8(x^2 + y^2 + z^2)^{9/2}}$$

ELEMENTOS DE $[T_{\text{espacial}}(x,y,z)]$

FIG. 8G