

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 885 109**

51 Int. Cl.:

G01D 5/14 (2006.01)

G01D 5/245 (2006.01)

G01D 5/249 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.07.2017 PCT/GB2017/052125**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.01.2018 WO18015750**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.07.2017 E 17745469 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.07.2021 EP 3488188**

54 Título: **Sensor de posición magnético**

30 Prioridad:

22.07.2016 GB 201612768

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

13.12.2021

73 Titular/es:

**CMR SURGICAL LIMITED (100.0%)
1 Evolution Business Park, Milton Road
Cambridge CB24 9NG, GB**

72 Inventor/es:

**ROBERTS, PAUL CHRISTOPHER y
MOTTRAM, EDWARD JOHN**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 885 109 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

Sensor de posición magnético

5 Antecedentes

10 En aplicaciones que involucran estructuras articuladas, a menudo es conveniente determinar la posición del extremo distal del enlace más distal de la estructura articulada. Esto se puede lograr detectando la posición de cada enlace con relación al último a lo largo de la estructura articulada, desde su base hasta el eslabón más distal. Esta serie de medidas se puede utilizar en combinación con la disposición conocida de la estructura articulada para determinar la posición del extremo distal del enlace más distal con relación a la base. Los sensores de posición giratorios se utilizan para detectar la rotación relativa entre enlaces. Los sensores de posición lineal se utilizan para detectar el movimiento longitudinal relativo entre enlaces.

15 Los sensores magnéticos de efecto Hall se utilizan comúnmente para detectar el movimiento relativo entre enlaces. En un sensor de posición giratorio típico, un anillo tiene un conjunto de polos magnéticos alternos que se disponen a su alrededor. Un sensor interactúa con el anillo y se ubica de modo que los polos magnéticos se muevan más allá del sensor a medida que tiene lugar la rotación que se desea detectar. Por ejemplo, el anillo podría fijarse alrededor de un eje y el sensor podría fijarse a una carcasa dentro de la cual gira el eje. El sensor detecta cambios en la polaridad magnética cuando los polos pasan por el sensor. Contando el número de cambios de polaridad, se puede detectar la cantidad de rotación desde una posición de referencia. Para detectar la dirección de rotación, se pueden proporcionar dos pares de anillos y sensores de este tipo, que se disponen de modo que un sensor detecte las transiciones magnéticas de su anillo en posiciones de rotación que están desplazadas de las posiciones en las que el otro sensor detecta las transiciones magnéticas de su anillo. Al considerar la sincronización relativa de las transiciones detectadas por cada sensor, se puede detectar la dirección de rotación.

20 El campo de la robótica utiliza estructuras articuladas como brazos robóticos. La detección precisa de la posición es importante para los brazos del robot a fin de garantizar que sus efectores finales se manipulen con precisión según lo previsto. Cuanto más grandes sean los anillos magnéticos del sensor de posición, con mayor precisión se detecta la rotación relativa de dos enlaces del brazo del robot. Sin embargo, en algunas aplicaciones de robótica, por ejemplo, en el campo de la robótica quirúrgica, es conveniente que los sensores de posición sean muy compactos para caber dentro del espacio disponible y para minimizar el peso que agregan al brazo.

30 Por lo tanto, existe la necesidad de un sensor de posición de mejora que equilibre los requisitos competitivos de precisión y compacidad.

35 El documento WO 2016/083825 A1 describe un codificador rotatorio que se utiliza para detectar la posición de una articulación robótica. El codificador rotatorio comprende un anillo magnetizado que tiene una primera pista magnética y una segunda pista magnética dispuestas sobre superficies mutuamente perpendiculares del anillo magnetizado. Dos sensores magnéticos detectan la rotación de las pistas. Los documentos DE 10 2009 055130 A1, US 2007/132447 A1, DE 10 2014 113374 A1, WO 2008/020231 A2, WO 2009/055285 A2, EP 2372313 A1 y DE 19818799 A1 describen disposiciones adicionales de codificadores rotatorios.

45 Resumen de la invención

50 La invención se define en las reivindicaciones adjuntas. De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un método de ensamble de una disposición de detección de posición para detectar la posición de una articulación mecánica de un brazo robótico, la disposición de detección de posición que comprende un conjunto de sensores magnéticos y un disco que tiene un anillo magnético interior con j pares de polos magnéticos y un anillo magnético exterior con k pares de polos magnéticos, donde $|j-k| > 1$ y en donde la forma y el tamaño de los polos magnéticos en los anillos magnéticos interior y exterior son los mismos, estando el límite radial interior del disco limitado por un eje del brazo robótico y el límite radial exterior del disco limitado por una carcasa del brazo robótico, comprendiendo el método determinar un número de pares de polos del anillo magnético interior para que sea un número entero p tal que una línea central del anillo magnético interior se separe del límite radial interior por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos que se dispone entre la línea central del anillo magnético interior y el límite radial interior; determinar un número de pares de polos del anillo magnético exterior para que sea un número entero q tal que el anillo magnético exterior se separe radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; y si p y q son coprimos: seleccionar j para que sea p y k para que sea q ; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

60 Si p y q no son coprimos, el método puede comprender: determinar iterativamente otro valor q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y para cada iteración, si p y q son coprimos: seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos

5 del anillo magnético exterior; identificar otro u otros pares de números coprimos p' , q' , donde: p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; seleccionar el par identificado p' , q' que tiene el mayor valor de p' ; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de forma que tanto el disco como la articulación mecánica puedan girar sobre el mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot de forma que se pueda detectar la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

10 Si p y q no son coprimos, el método puede comprender: determinar iterativamente otro valor q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y para cada iteración, si p y q son coprimos: seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar otro u otros pares de números coprimos p' , q' , donde: p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; seleccionar el par identificado p' , q' que tiene el mayor valor de q' ; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de forma que tanto el disco como la articulación mecánica puedan girar sobre el mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot de forma que se pueda detectar la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

25 Si p y q no son coprimos, el método puede comprender: determinar iterativamente otro valor q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y para cada iteración, si p y q son coprimos: seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar otro u otros pares de números coprimos p' , q' , donde: p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; seleccionar el par identificado p' , q' que tiene el menor valor de q' ; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de forma que tanto el disco como la articulación mecánica puedan girar sobre el mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot de forma que se pueda detectar la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

35 Si p y q no son coprimos, el método puede comprender: determinar iterativamente otro valor q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y para cada iteración, si p y q son coprimos: seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar otro u otros pares de números coprimos p' , q' , donde: p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior que se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; seleccionar el par identificado p' , q' que tiene el menor valor de $|p'-q'|$; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de forma que tanto el disco como la articulación mecánica puedan girar sobre el mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot de forma que se pueda detectar la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

50 El anillo magnético interior y el anillo magnético exterior pueden ser concéntricos.

El método puede comprender la determinación iterativa de otro valor q incrementando q en 1 en cada iteración, en la que $p' > p$ y $q' < q$, y en donde para cada iteración, si p y q son coprimos, el método comprende seleccionar p para que sea el límite inferior de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea el límite superior de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior.

55 Si p y q no son coprimos, el método puede comprender: determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y para cada iteración, si p y q son coprimos: seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares coprimos de números p' , q' , donde: p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; seleccionar un par p' , q' identificado en función del ángulo máximo de rotación de la articulación mecánica a detectar por la disposición de detección de posición; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' que se selecciona; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco

como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.

5 El disco puede comprender además un tercer anillo magnético con l pares de polos, y el método puede comprender además: determinar un número de pares de polos del tercer anillo magnético que sea un número entero s, de manera que el tercer anillo magnético se separe radialmente del anillo magnético exterior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; y si p, q y s son coprimos: seleccionar j para que sea p, k para que sea q, e l para que sea s; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante: el montaje del disco en el brazo del robot de tal manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y del conjunto de sensores magnéticos.

15 De acuerdo con otro aspecto de la invención, se proporciona un brazo robótico que comprende una disposición de detección de posición montada en el brazo robótico que comprende: un anillo magnético interior que tiene j pares de polos magnéticos; un anillo magnético exterior que tiene k pares de polos magnéticos, en donde la forma y el tamaño de los polos magnéticos de los anillos magnéticos interior y exterior son los mismos, siendo el anillo magnético exterior inamovible con relación al anillo magnético interior, ambos anillos magnéticos interior y exterior se disponen sobre un disco, estando el límite radial interior del disco limitado por un eje del brazo robótico y el límite radial exterior del disco limitado por una carcasa del brazo robótico; y un conjunto de sensores magnéticos para detectar la posición relativa del conjunto de sensores magnéticos y los anillos magnéticos interior y exterior; en donde j y k son coprimos y $|j-k|>1$; en donde la disposición de detección de posición es para detectar la posición de una articulación mecánica del brazo robótico, estando el anillo magnético interior y el anillo magnético exterior montados en el brazo robótico de forma que el anillo magnético interior, el anillo magnético exterior y la articulación mecánica puedan girar alrededor del mismo eje en donde una línea central del anillo magnético interior se separada del límite radial interior del disco por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos que se dispone entre la línea central del anillo magnético interior y el límite radial interior, y el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos.

30 Adecuadamente, $|j-k|>7$.

Los anillos magnéticos interior y exterior se pueden disponer en la misma superficie del disco o superficies opuestas del disco. Los anillos magnéticos interior y exterior se pueden separar a lo largo del eje.

35 El conjunto de sensores magnéticos puede comprender una primera serie de sensores magnéticos que se dispone sobre el anillo magnético interior y una segunda serie de sensores magnéticos que se dispone sobre el anillo magnético exterior, estando los sensores adyacentes de cada una de las series de sensores magnéticos primera y segunda separadas por un cuarto de la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos.

40 La primera serie de sensores magnéticos puede tener una extensión radial menor que la extensión radial del anillo magnético interior, y la segunda serie de sensores magnéticos puede tener una extensión radial menor que la extensión radial del anillo magnético exterior.

45 Cada una de las series de sensores magnéticos primero y segundo puede ser rectilínea. Cada una de las series de sensores magnéticos primero y segundo puede comprender cuatro sensores. Una o ambas series de sensores magnéticos se pueden disponer en una configuración circular.

50 La disposición de detección de posición puede comprender además un tercer anillo magnético que tenga l pares de polos magnéticos, siendo el tercer anillo magnético inamovible con relación a los anillos magnéticos interior y exterior, estando el tercer anillo magnético montado en el brazo del robot de manera que se permita girar alrededor del mismo eje que los anillos magnéticos interior y exterior, en donde j, k e l coprimos y $|l-k|>1$ y $|l-j|>1$.

Breve descripción de las figuras

55 La presente invención se describirá ahora a manera de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos. En los dibujos:

- La Figura 1 ilustra una representación general de un eje que se equipa con una disposición de detección de posición;
- La Figura 2 ilustra las dimensiones de un disco 3 de la figura 1;
- La Figura 3 ilustra una porción de un anillo magnético de la figura 1;
- La Figura 4 ilustra una serie de sensores magnéticos de la figura 1;
- 60 La Figura 5 es un gráfico que ilustra las lecturas teóricas y reales del sensor de posición;
- La Figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra un método para determinar los números del par de polos para dos anillos magnéticos cuando el límite radial interior es limitante;
- La Figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un método para determinar los números del par de polos para dos anillos magnéticos cuando el límite radial exterior es limitante;
- 65 La Figura 8 es un gráfico que ilustra lecturas de sensor de posición combinadas teóricas y reales; y
- La Figura 9 ilustra disposiciones para montar el disco;

La Figura 10 ilustra el campo magnético que se detecta por una serie de sensores magnéticos;
 La Figura 11 ilustra lecturas de sensores teóricas y reales tomadas mientras un solo par de polos magnéticos pasa por un conjunto de sensores magnéticos;
 La Figura 12 ilustra una función de corrección para un par de polos; y
 La Figura 13 ilustra las lecturas teóricas y reales del sensor tomadas mientras un anillo magnético completo pasa por un conjunto de sensores magnéticos.

Descripción detallada

Lo siguiente se refiere a una disposición de detección de posición para una estructura articulada y un método para ensamblar la disposición de detección de posición. Al detectar la posición de cada articulación de una estructura articulada, la posición del extremo distal de la estructura articulada puede determinarse a partir de una combinación de las posiciones de las articulaciones detectadas y de la disposición que se conoce de la estructura articulada. En el ejemplo de un brazo de robot, una base del brazo de robot se acopla al efector final en el extremo distal del brazo de robot a través de una serie de enlaces que se unen por articulaciones. Pueden ser articulaciones rotativas o articulaciones prismáticas. En el caso de una articulación mecánica, se detecta la rotación de la articulación. En otras palabras, se detecta la rotación relativa de los dos ejes que une la articulación mecánica. Se detectan el ángulo de rotación y la dirección de rotación. En el caso de una articulación prismática, se detecta el movimiento longitudinal de la articulación. En otras palabras, se detecta el movimiento relativo de los dos ejes que une la articulación prismática. Se detecta la distancia del movimiento y la dirección del movimiento.

La figura 1 ilustra un ejemplo de una disposición de detección de posición para detectar la rotación del eje 1 alrededor del eje 2. La disposición de detección de posición detecta el ángulo y la dirección de rotación del eje 1 alrededor del eje 2. La disposición de detección de posición comprende un conjunto de sensores magnéticos y un disco 3. El disco 3 se muestra con más detalle en la figura 2. El disco 3 es un espacio anular que tiene un límite radial exterior 4 y un límite radial interior 5. Ambos límites del espacio anular se centran en el punto central del disco 3. El radio del límite radial exterior es r_o . El radio del límite radial interior es r_i . El disco 3 es rápido con el elemento cuya posición se detecta. En este caso, el disco 3 se monta rígidamente en el eje 1. No se permite ningún movimiento relativo entre el eje 1 y el disco 3. El disco 3 gira sobre el eje 2. En otras palabras, el disco 3 y el eje 1 giran alrededor de un eje común.

Dos anillos magnéticos 6,7 se disponen en el disco 3. Los anillos magnéticos no son móviles entre sí. Los dos anillos magnéticos son concéntricos. Ambos anillos magnéticos se centran en el centro del disco. En otras palabras, los anillos magnéticos se disponen en un círculo que tiene como eje el eje de rotación 2 del eje 1. La distancia radial entre el centro del disco y la línea central 9 del anillo magnético interior 6 es r_m . La distancia radial entre el centro del disco y la línea central 10 del anillo magnético exterior 7 es r_n . Las líneas centrales 9, 10 de los anillos magnéticos 6,7 se separan por una distancia radial s . El valor mínimo de la distancia radial s se predetermina. Adecuadamente, la distancia radial s es al menos la longitud de un par de polos. En otras palabras, $s \geq 2y$.

Cada anillo magnético lleva un número de imanes permanentes que definen los polos magnéticos 8. En la superficie de detección de cada anillo magnético, los imanes alternan la polaridad entre los polos norte y sur alrededor del anillo. El anillo magnético interior 6 tiene m pares de polos magnéticos. El anillo magnético exterior 7 tiene n pares de polos magnéticos. Cada polo magnético 8 del anillo magnético interior 6 tiene la misma forma y tamaño, dentro de la tolerancia de fabricación. Cada polo magnético 8 en el anillo magnético exterior 7 tiene la misma forma y tamaño, dentro de la tolerancia de fabricación. Adecuadamente, cada polo magnético 8 en el anillo magnético interior 6 tiene la misma forma y tamaño que cada polo magnético 8 en el anillo magnético exterior 7, dentro de la tolerancia de fabricación y el hecho de que el radio del arco del anillo magnético interior es diferente al arco radio del anillo magnético exterior. Una porción de un anillo magnético se muestra con más detalle en la figura 3. Cada polo magnético 8 tiene una longitud radial x y una longitud circunferencial y . En un ejemplo, y es 2 mm. En este ejemplo, un par de polos (es decir, un polo norte y un par de polos sur adyacentes) tiene una longitud circunferencial de 4 mm.

El conjunto de sensores magnéticos se monta en la estructura articulada para detectar la rotación relativa entre dos elementos. El conjunto de sensores magnéticos se une rígidamente a uno de esos elementos, de manera que no se permite que el conjunto de sensores magnéticos se mueva con relación a ese elemento. El disco 3 se une rígidamente al otro de esos elementos, de manera que no se permite que los anillos magnéticos 6, 7 se muevan con relación a ese otro elemento. En el caso del ejemplo de la figura 1, el disco 3 se une rígidamente al eje 1. El conjunto de sensores magnéticos se une rígidamente a la parte de la estructura articulada sobre la que gira el eje 1 con relación.

El conjunto de sensores magnéticos detecta la rotación relativa del primer y segundo anillos magnéticos y el conjunto de sensores magnéticos. El conjunto de sensores magnéticos comprende dos series de sensores magnéticos 11,12. La serie de sensores magnéticos interiores 11 se dispone adyacente y se alinea con el anillo magnético interior 6. La serie de sensores magnéticos exteriores 12 se dispone adyacente y alinea con el anillo magnético exterior 7. Dado que el conjunto de sensores magnéticos se monta en la estructura articulada con relación a la cual gira el eje 1, a medida que gira el eje 1, los anillos magnéticos 6 y 7 giran más allá de las series de sensores magnéticos 11, 12. Cada serie de sensores es capaz de detectar transiciones entre los polos norte y sur del anillo magnético sobre el que se dispone a medida que esas transiciones pasan por la serie de sensores. En una implementación ilustrativa, los anillos magnéticos primero y segundo 6, 7 se separan radialmente por al menos la longitud de un par de polos. El aumento de la separación

de los anillos reduce la interferencia que cada anillo causa al sensor del otro anillo. Por lo tanto, separar los anillos por al menos la longitud de un par de polos ayuda a que la serie de sensores magnéticos interiores 11 solo detecte las transiciones del anillo magnético interior 6, y que la serie de sensores magnéticos exteriores 12 solo detecte las transiciones del anillo magnético exterior 7.

5 Cada serie de sensores magnéticos 11, 12 comprende un conjunto de sensores. La figura 4 ilustra un ejemplo en el que una serie de sensores magnéticos comprende cuatro sensores individuales 13a, b, c, d. Cada serie de sensores magnéticos es rectilínea. Como puede verse en la figura 4, los sensores individuales se disponen en línea recta. Los sensores del conjunto son todos del mismo tamaño y forma y tienen la misma separación entre ellos. Cada sensor 13
10 tiene un ancho t y una longitud u y se separa del siguiente sensor por una distancia v . Los centros de los sensores adyacentes se separan por una distancia z . En el ejemplo que se muestra en la figura 4, en el que la serie de sensores magnéticos tiene cuatro sensores individuales, z es lo mismo que un cuarto de la longitud de un par de polos. En otras palabras, $z = y/2$. Por lo tanto, mientras que los centros de los sensores marcados con 1 y 3 están sobre el límite entre polos adyacentes, los centros de los sensores marcados con 2 y 4 están sobre los centros de polos adyacentes. Los
15 centros de los sensores exterior (marcados con 1 y 4) se separan por tres cuartos de la longitud de un par de polos. En una implementación ilustrativa, t es menor que la extensión radial del anillo magnético x . En otras palabras, $t < x$.

Dado que los sensores individuales están en línea recta mientras que el anillo magnético es circular, el centro de cada sensor no se alinea consistentemente con el centro de un polo magnético cuando el eje gira. El desplazamiento entre el
20 centro del sensor y el centro del polo magnético varía a medida que gira el eje. Este desplazamiento variable provoca un error sistemático en la salida del sensor. En una implementación alternativa, las series de sensores magnéticos 11, 12 están cada una en una configuración circular centrada en el centro del disco 3. En este caso, el radio de la línea central de cada serie de sensores magnéticos es el mismo que el radio de la línea central del anillo magnético que se lee. Por lo tanto, la línea central de la serie de sensores magnéticos se alinea de manera consistente con la línea central del anillo
25 magnético que se lee a medida que gira el eje.

Los sensores podrían ser, por ejemplo, sensores de efecto Hall, sensores Reed, sensores magnetorresistivos o sensores inductivos.

30 Cada serie de sensores magnéticos 11, 12 se dispone para proporcionar una salida de múltiples bits que representa la posición relativa de los polos vecinos a él. El número y la colocación relativa de los polos en los anillos magnéticos se disponen de manera que cada posición del eje dentro del intervalo de ángulos de rotación a medir se asocie con un conjunto único de salidas de las dos series de sensores magnéticos 11, 12. El número de polos m en el anillo interior y el número de polos n en el anillo exterior son diferentes y coprimos. Su selección se describe más adelante. Las salidas de
35 los sensores pasan a una unidad de procesamiento 14.

Las posiciones circunferenciales de las series de sensores magnéticos 11, 12 y la posición de rotación del disco 3 alrededor del eje 2 pueden elegirse de modo que las transiciones entre los polos en el anillo magnético interior 6 detectadas por la serie de sensores magnéticos 11 ocurran para diferentes posiciones de rotación del eje de las
40 transiciones entre los polos en el anillo magnético exterior 7 según lo que se detecta por la serie de sensores magnéticos 12. Esto permite inferir la dirección de rotación del eje a partir del orden relativo de las transiciones detectadas por cada serie de sensores magnéticos.

Las salidas de las series de sensores magnéticos 11, 12 pasan a la unidad de procesamiento 14. La unidad de procesamiento comprende un dispositivo procesador 15, que se podría codificar para interpretar las señales de las series de sensores magnéticos 11, 12 o podría ser un procesador de propósito general que se configura para ejecutar código de software que se almacena de forma no transitoria en la memoria 16. El dispositivo procesador combina las señales de los sensores para formar una señal de salida integrada en 17.

50 A continuación, se describirá un método para seleccionar el número de pares de polos magnéticos m en el anillo magnético interior 6 y el número de pares de polos magnéticos n en el anillo magnético exterior 7.

La selección de m y n puede estar sujeta a cualquiera, cualquier combinación o todas las siguientes restricciones.

55 1. Los anillos magnéticos interior y exterior 6, 7 deben encajar en el disco 3. Adecuadamente, las series de sensores magnéticos interior y exterior 11, 12 se disponen cada uno dentro de la huella del disco 3 también. El límite radial interior 5 está en un radio r_i . Para que la serie de sensores magnéticos interiores 11 se ajuste al disco 3 sin sobrepasar el límite radial interior 5, la línea central 9 del anillo magnético interior se separa del límite radial interior 5 por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos 11 que se encuentra entre la línea central 9 del anillo magnético interior y el límite radial interior 5. Esta porción puede ser la mitad del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos, es decir, $w_m/2$. En otras palabras, $r_m > r_i + w_m/2$. Si la serie de sensores se desplaza radialmente dentro del conjunto de sensores, entonces la porción puede ser mayor. En un ejemplo, $r_m > r_i + (w_m + t)/2$. El límite radial exterior 4 está en un radio r_o . A fin de encajar la serie de sensores magnéticos exteriores 12 sobre el disco 3 sin sobrepasar el límite radial exterior 4, la línea central 10 del anillo magnético exterior se separa del límite radial exterior 4 por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos 12 que se dispone entre la línea central 10 del anillo magnético exterior y el
65 límite radial exterior 4. Esta porción puede ser el ancho radial del conjunto de sensores magnéticos, es decir, $w_n/2$. En

otras palabras, $r_n < r_o - w_n/2$. Si la serie de sensores se desplaza radialmente dentro del conjunto de sensores, entonces la porción puede ser mayor. En un ejemplo, $r_n < r_o - (w_n+t)/2$.

2. Los centros de los sensores adyacentes se separan por un cuarto de la longitud de un par de polos. En otras palabras, los sensores adyacentes se separan por $y/2$. Esto asegura que la serie de sensores magnéticos pueda detectar cada transición de polos a medida que gira el disco.

3. La distancia radial s entre la línea central del anillo magnético interior 6 y la línea central del anillo magnético exterior 7 es mayor que una distancia predeterminada. Esa distancia predeterminada se establece mediante una insensibilidad deseada a los campos magnéticos extraviados. Adecuadamente, $s > 2y$. En este caso, el polo magnético más cercano en el anillo magnético interior 6 que la serie de sensores magnéticos interiores 11 detecta está siempre más cerca que un polo magnético en el anillo magnético exterior 7. De manera similar, el polo magnético más cercano en el anillo magnético exterior 7 que detecta la serie de sensores magnéticos exteriores 12 está siempre más cerca que un polo magnético en el anillo magnético interior 6. Por lo tanto, esto evita la interferencia que surge de la serie de sensores magnéticos sobre un anillo magnético que detecta un campo magnético del otro anillo magnético.

4. El número mínimo de sensores b en cada serie de sensores magnéticos es mayor que un umbral. Este umbral es tal que hay un muestreo espacial suficiente para una lectura de posición inequívoca. Adecuadamente, $b \geq 4$. Cuatro sensores son suficientes cuando no se detectan armónicos magnéticos.

5. El ancho, t , de cada sensor magnético es menor que la extensión radial del anillo magnético x . En otras palabras, $t < x$. La relación señal ruido de las transiciones detectadas se reduce si la serie de sensores magnéticos es más estrecha que el anillo magnético.

6. El límite radial interior del disco se puede limitar por la estructura articulada. Por ejemplo, en la figura 1, el límite radial interior del disco se limita por el eje 1. En este caso, el radio del límite radial interior r_i tiene que ser al menos tan grande como el radio del eje 1.

7. El límite radial exterior del disco se puede limitar por la estructura articulada. Por ejemplo, el sensor de posición puede encajar dentro de una carcasa de la estructura articulada. En este caso, el radio del límite radial exterior r_o tiene que ser al menos tan pequeño como el radio de la carcasa.

8. El sensor de posición se dispone para detectar un ángulo máximo de rotación. Este ángulo máximo de rotación depende del elemento cuya rotación se detecta. Para una articulación mecánica, el ángulo máximo de rotación que se detectará depende de la ubicación de esa articulación en la cadena cinemática. El ángulo máximo de rotación a detectar puede ser inferior a 360° . El ángulo máximo de rotación a detectar puede ser superior a 360° . La precisión de la medición de la posición es proporcional al ángulo de rotación a detectar. Cuanto mayor sea el ángulo de rotación a detectar, mayor será la precisión de la medición de posición necesaria. La precisión de lectura del sensor viene dada por:

$$\text{Precisión} = \pm 2y \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sum \text{pares de polos}} \quad (\text{ecuación 1})$$

$\sum \text{pares de polos}$ es la suma del número de pares de polos de todos los anillos magnéticos del disco. Cuando hay dos anillos magnéticos en el disco, $\sum \text{pares de polos} = m+n$. Cuantos más pares de polos haya en los anillos magnéticos, más grandes serán los anillos magnéticos. Por lo tanto, los anillos magnéticos más grandes conducen a mediciones de posición más precisas. Cuanto mayor sea el ángulo de rotación a detectar, mayores serán m y/o n para lograr la precisión requerida. Por lo tanto, el número de pares de polos en los anillos magnéticos para detectar la rotación de un elemento con relación a otro se limita por el ángulo de rotación relativo que se detectará entre los dos elementos. En el caso de una articulación mecánica, la selección de m y n son específicas del ángulo máximo de rotación de esa articulación mecánica que se va a detectar.

La figura 5 es un gráfico que ilustra las medidas teóricas y reales del sensor de posición tomadas de una disposición de detección de posición de la forma que se muestra en la figura 1. El eje x es la medición del sensor de posición de la serie de sensores magnéticos exteriores 12, y el eje y es la medición del sensor de posición de la serie de sensores magnéticos interiores 11. El gráfico de líneas estrelladas ilustra las mediciones teóricas con una precisión del 100 %. El gráfico de línea continua ilustra ejemplos de lecturas reales. Estos ejemplos de lecturas reales difieren de las lecturas teóricas que se debe a la variación de fabricación en la magnetización de los anillos magnéticos en el disco, la variación de fabricación en las series de sensores magnéticos y/o la desalineación entre los anillos magnéticos y las series de sensores magnéticos. En la figura 5, las lecturas reales tienen un desplazamiento constante de las lecturas teóricas, lo que demuestra un error sistemático en las lecturas reales. Este desplazamiento se debe a un error al magnetizar el disco. Por ejemplo, el centro de los anillos magnéticos puede desplazarse ligeramente del centro de rotación del disco. La figura 5 también demuestra un error adicional en las lecturas más allá del error sistemático. Para detectar con precisión qué lectura del sensor se pretende, la línea continua de las lecturas reales en el gráfico de la figura 5 debe estar más cerca de la línea correcta de lecturas teóricas que otra línea de lecturas teóricas.

Ahora se describirá un método para determinar los valores de m y n para un ejemplo en el que el límite radial interior del disco 3 es limitante. Por ejemplo, el disco se puede montar en un eje y, por lo tanto, el radio del límite radial interior r_i del disco 3 tiene que ser mayor que el radio del eje. La figura 6 ilustra las etapas de este método.

5 En la etapa 20, el mínimo $r_{m,\min}$ se determina. Este es el radio mínimo de la línea central 9 del anillo magnético interior permitido por el radio interior límite r_i . Como se describe en la restricción 1 anterior, como mínimo, la línea central 9 del anillo magnético interior se separa del límite radial interior 5 por la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos 11 que se dispone entre la línea central 9 del anillo magnético interior y el límite radial interior 5. Esto es para asegurar que el conjunto de sensores magnéticos 11 se confine dentro del límite radial interior. En un ejemplo, el mínimo $r_{m,\min}$ se da por:

$$r_{m,\min} = r_i + (w_m + t)/2 \quad (\text{ecuación 2})$$

15 En la etapa 21, se determina el número mínimo de pares de polos m para el anillo magnético interior. El anillo magnético tiene varios pares de polos. Por lo tanto, m es un número entero $r_{m,\min}$ se incrementa al valor más bajo de r_m , donde

$$2\pi r_m = m2y \quad (\text{ecuación 3})$$

donde m es un número entero.

20 En la etapa 22, el mínimo $r_{n,\min}$ se determina. Este es el radio mínimo de la línea central 10 del anillo magnético exterior que se permite por el radio interior límite r_i . Como se describe en la restricción 3 anterior, como mínimo, la línea central 10 del anillo magnético exterior se separa radialmente de la línea central 9 del anillo magnético interior por una distancia predeterminada. Esta distancia predeterminada es adecuadamente grande para reducir o minimizar la interferencia en la lectura del sensor de un anillo magnético como resultado del otro anillo magnético.

$$r_{n,\min} = r_m + s \quad (\text{ecuación 4})$$

donde r_m es la de la ecuación 3, y s es la distancia predeterminada.

30 En la etapa 23, se determina el número mínimo de pares de polos n para el anillo magnético exterior. El anillo magnético tiene varios pares de polos. Por lo tanto, n es un número entero $r_{n,\min}$ se incrementa al valor más bajo de r_n , donde

$$2\pi r_n = n2y \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde n es un número entero.

35 En la etapa 24, se determina si los valores de m y n determinados en las etapas 21 y 23 son coprimos. Si m y n son coprimos, entonces estos son los pares m,n que proporcionan el disco más compacto. En este caso, se elige m para que sea el número de pares de polos en el anillo magnético interior y n se elige como el número de pares de polos en el anillo magnético exterior. El método pasa a la etapa 25 donde la disposición de detección de posición se construye mediante el montaje de un disco que tiene un anillo magnético interior con m pares de polos y un anillo magnético exterior con n pares de polos en la estructura articulada. El disco se une rígidamente al elemento de la estructura articulada cuya posición se configura para detectar. El disco se monta de manera que gira alrededor del mismo eje que el elemento cuya posición se configura para detectar.

45 Si, en la etapa 24, se determina que los valores de m y n determinados en las etapas 21 y 23 no son coprimos, entonces el método pasa a la etapa 26. En la etapa 26, el valor de n determinado en la etapa 23 se incrementa en 1. En la etapa 27, se determina si el nuevo valor de n que se determinó en la etapa 26 y el valor de m que se determinó en la etapa 21 son coprimos. Si no son coprimos, el método vuelve a la etapa 26, donde el valor de n se incrementa en 1. Luego, el método vuelve a la etapa 27, donde se determina si el nuevo valor de n es coprimo con m. Las etapas 26 y 27 continúan iterativamente, cada iteración incrementa el valor de n en 1, hasta que se alcanza un valor de n que es coprimo con m. De esta manera, cada iteración incrementa la diferencia entre m y n en 1.

50 Una vez que se encuentra un valor de n que es coprimo con m, el método pasa a la etapa 28. En la etapa 28, el valor de m que se determinó en la etapa 21 se establece como el límite inferior de un intervalo de número de pares de polos del anillo magnético interior 6. También en la etapa 28, el valor de n que se determinó como coprimo con m en la etapa 27 se establece como el límite superior de un intervalo de número de pares de polos del anillo magnético exterior 7.

55 En la etapa 29, se identifican m,n pares de coprimos adicionales que se encuentran dentro de los intervalos que se establecen en la etapa 28. En otras palabras, se identifican valores adicionales de m y n que son coprimos y para los cuales m es mayor que el límite inferior que se establece en la etapa 28 y n es menor que el límite superior que se establece en la etapa 28. Estos pares m,n coprimos también satisfacen cualquier otra restricción, de manera que el anillo magnético exterior se separe del anillo magnético interior por al menos el valor mínimo predeterminado de la distancia s.

60 En un ejemplo ilustrativo, los valores m y n determinados inicialmente en las etapas 21 y 23 son m=30 y n=35. Estos no son coprimos. La iteración de n en la etapa 26 da como resultado un par m,n de m= 30 y n=37. En la etapa 29 se identifican los siguientes pares de coprimos adicionales: m=31, n=36; m=31, n=37; m=32, n=37.

65

En la etapa 30, se selecciona uno de los m,n pares coprimos. Este par m,n puede ser el valor de m que se determinó en la etapa 21 y el valor de n que se determinó como coprimo con ese valor de m en la etapa 27, o alternativamente, el par m,n se pudo determinar en la etapa 29. El par m,n que se selecciona depende de la implementación.

5 En un ejemplo, el par coprimo m,n que tiene el valor más grande de m se selecciona en la etapa 30. En el ejemplo que se proporcionó anteriormente, se seleccionaría m=32, n=37. Seleccionar el par m,n con el valor más grande de m maximiza la precisión del sensor resultante, como se puede ver en la ecuación 1.

10 En otro ejemplo, el coprimo m,n par que tiene el valor más pequeño de n se selecciona en la etapa 30. En el ejemplo que se proporcionó anteriormente, se seleccionaría m=31, n=36. Seleccionar el par m,n con el valor más pequeño de n minimiza el radio exterior del disco r_o , por lo tanto, minimiza el espacio total que ocupa el sensor.

15 En otro ejemplo, el par coprimo m,n que tiene el valor más pequeño de n-m se selecciona en la etapa 30. La selección del par m,n con el valor más pequeño de n-m minimiza el ancho radial del disco, por lo tanto proporciona el sensor más compacto. En el ejemplo que se proporcionó anteriormente, dos m,n pares tienen el valor más pequeño de n-m: m=31, n=36; y m=32, n=37.

20 El par m,n que se selecciona en la etapa 30 puede elegirse en dependencia del ángulo máximo de rotación que se va a detectar. Como se describió anteriormente, el ángulo máximo de rotación especifica una precisión mínima requerida, que a su vez especifica una suma mínima requerida del número de pares de polos en los anillos magnéticos. Esta es una limitación competitiva para proporcionar un sensor compacto. Para equilibrar estos requisitos en competencia, se puede seleccionar en la etapa 30 el coprimo m,n par más pequeño cuya suma exceda la suma mínima requerida del número de pares de polos en los anillos magnéticos.

25 Cualquiera de estos criterios o una combinación de ellos puede aplicarse en una implementación específica. Por ejemplo, se puede seleccionar el par coprimo m,n que tenga el valor más pequeño de n-m. En el caso de que exista más de un coprimo m,n par que tenga el menor valor de n-m, se podrá seleccionar el que tenga el mayor m. Por lo tanto, en el ejemplo anterior, se elegiría m=32, n=37.

30 Una vez que se selecciona el par m,n coprimo en la etapa 30, m del par m,n que se selecciona se elige como el número de pares de polos en el anillo magnético interior, y n del m seleccionado, n par se elige para sea el número de pares de polos en el anillo magnético exterior. El método pasa luego a la etapa 25, donde la disposición de detección de posición se ensambla mediante el montaje de un disco que tiene un anillo magnético interior con m pares de polos y un anillo magnético exterior con n pares de polos en la estructura articulada como se describió anteriormente.

35 Ahora se describirá un método para determinar los valores de m y n para un ejemplo en el que el límite radial exterior del disco 3 es limitante. Por ejemplo, el disco puede montarse dentro de una carcasa y, por lo tanto, el radio del límite radial exterior r_o del disco 3 tiene que ser menor que la distancia más cercana de la carcasa al punto central del disco. La figura 7 ilustra las etapas de este método.

40 En la etapa 40, el máximo $r_{n,m\acute{a}x}$ se determina. Este es el radio máximo de la línea central 10 del anillo magnético exterior que se permite por el radio exterior límite r_o . Como se describe en la restricción 1 anterior, en su máximo, la línea central 10 del anillo magnético exterior se separa del límite radial exterior 4 por la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos 12 que se dispone entre la línea central 10 del anillo magnético exterior y el límite radial exterior 4. Esto es para asegurar que el conjunto de sensores magnéticos 12 se confine dentro del límite radial exterior. En un ejemplo, el máximo $r_{n,m\acute{a}x}$ se da por:

$$r_{n,m\acute{a}x} = r_o - (w_n + t)/2 \quad \text{(ecuación 6)}$$

50 En la etapa 41, se determina el número máximo de pares de polos n para el anillo magnético exterior. El anillo magnético tiene varios pares de polos. Por lo tanto, n es un número entero $r_{n,m\acute{a}x}$ se reduce al valor más alto de r_n , donde

$$2\pi r_n = n2y \quad \text{(ecuación 7)}$$

donde n es un número entero.

55 En la etapa 42, el máximo $r_{m,m\acute{a}x}$ se determina. Este es el radio máximo de la línea central 9 del anillo magnético interior permitido por el radio exterior límite r_o . Como se describe en la restricción 3 anterior, como mínimo, la línea central 9 del anillo magnético interior se separa radialmente de la línea central 10 del anillo magnético exterior por una distancia predeterminada. Esta distancia predeterminada es adecuadamente grande para reducir o minimizar la interferencia en la lectura del sensor de un anillo magnético como resultado del otro anillo magnético.

$$r_{m,m\acute{a}x} = r_n - s \quad \text{(ecuación 8)}$$

donde r_n es la de la ecuación 7, y s es la distancia predeterminada.

65 En la etapa 43, se determina el número máximo de pares de polos m para el anillo magnético interior. El anillo magnético tiene varios pares de polos. Por lo tanto, m es un número entero. $r_{m,m\acute{a}x}$ se reduce al valor más grande de r_m , donde

$$2\pi r_m = m2y$$

(ecuación 9)

Donde m es un número entero.

5 En la etapa 44, se determina si los valores de m y n determinados en las etapas 41 y 43 son coprimos. Si m y n son coprimos, entonces estos son los pares m,n que proporcionan el disco más compacto. En este caso, se elige m para que sea el número de pares de polos en el anillo magnético interior y n se elige como el número de pares de polos en el anillo magnético exterior. El método pasa a la etapa 45 donde la disposición de detección de posición se construye mediante el montaje de un disco que tiene un anillo magnético interior con m pares de polos y un anillo magnético exterior con n pares de polos en la estructura articulada. El disco se une rígidamente al elemento de la estructura articulada cuya posición se configura para detectar. El disco se monta de manera que gira alrededor del mismo eje que el elemento cuya posición se configura para detectar.

15 Si, en la etapa 44, se determina que los valores de m y n determinados en las etapas 41 y 43 no son coprimos, entonces el método pasa a la etapa 46. En la etapa 46, el valor de m que se determina en la etapa 43 se reduce en 1. En la etapa 47, se determina si el nuevo valor de m que se determina en la etapa 46 y el valor de n que se determina en la etapa 41 son coprimos. Si no son coprimos, el método vuelve a la etapa 46, donde el valor de m se reduce en 1. Luego, el método vuelve a la etapa 47 donde se determina si el nuevo valor de m es coprimo con n. Las etapas 46 y 47 continúan iterativamente, cada iteración disminuye el valor de m en 1, hasta que se alcanza un valor de m que es coprimo con n. De esta manera, cada iteración incrementa la diferencia entre m y n en 1.

20 Una vez que se encuentra un valor de m que es coprimo con n, el método pasa a la etapa 48. En la etapa 48, el valor de n que se determina en la etapa 41 se establece como el límite superior de un intervalo de número de pares de polos del anillo magnético exterior 7. También en la etapa 48, el valor de m que se determinó como coprimo con n en la etapa 47 se establece como el límite inferior de un intervalo de número de pares de polos del anillo magnético interior 6.

30 En la etapa 49, se identifican m,n pares de coprimos adicionales que se encuentran dentro de los intervalos que se establecen en la etapa 48. En otras palabras, se identifican valores adicionales de m y n que son coprimos y para los cuales m es mayor que el límite inferior que se establece en la etapa 48 y n es menor que el límite superior que se establece en la etapa 48. Estos pares m,n coprimos también satisfacen cualquier otra restricción, de manera que el anillo magnético exterior se separe del anillo magnético interior por al menos la distancia predeterminada.

35 En la etapa 50, se selecciona uno de los pares m,n coprimos. Este par m,n puede ser el valor de n que se determina en las etapas 41 y el valor de m que se determina como coprimo con ese valor de m en la etapa 47, o alternativamente, el par m,n se puede determinar en la etapa 49. El par m,n que se selecciona depende de la implementación.

En un ejemplo, el par coprimo m,n que tiene el valor más grande de m se selecciona en la etapa 40. Seleccionar el par m,n con el valor más grande de m maximiza la precisión del sensor resultante, que se puede ver en la ecuación 1.

40 En otro ejemplo, el par coprimo m,n que tiene el valor más pequeño de n-m se selecciona en la etapa 50. La selección del par m,n con el valor más pequeño de n-m minimiza el ancho radial del disco, por lo tanto proporciona el sensor más compacto.

45 El par m,n que se selecciona en la etapa 50 puede elegirse en dependencia del ángulo máximo de rotación que se va a detectar. El par coprimo m,n más pequeño cuya suma excede la suma mínima requerida del número de pares de polos en los anillos magnéticos puede seleccionarse en la etapa 50.

50 Cualquiera de estos criterios o una combinación de ellos puede aplicarse en una implementación específica. Por ejemplo, se puede seleccionar el par coprimo m,n que tenga el valor más pequeño de n-m. En el caso de que exista más de un coprimo m,n par que tenga el menor valor de n-m, se podrá seleccionar el que tenga el mayor m.

55 Una vez que se selecciona el par coprimo m,n en la etapa 50, m del par m,n que se selecciona se elige como el número de pares de polos en el anillo magnético interior, y n del m seleccionado, n par se elige para sea el número de pares de polos en el anillo magnético exterior. El método pasa luego a la etapa 45, donde la disposición de detección de posición se ensambla mediante el montaje de un disco que tiene un anillo magnético interior con m pares de polos y un anillo magnético exterior con n pares de polos en la estructura articulada como se describió anteriormente.

60 Se entenderá que los diagramas de flujo de las figuras 6 y 7 representan métodos ilustrativos para determinar el número de polos en los anillos magnéticos interior y exterior en los casos en los que el límite radial interior o el límite radial exterior del disco son limitantes. No todas las etapas que se describen son necesarias para determinar el número de polos. Por ejemplo, el número mínimo de polos m y n que se determina en las etapas 21 y 23 de la figura 6 podría determinarse sin determinar realmente los radios mínimos $r_{m,\min}$ y $r_{n,\min}$. De manera similar, el número máximo de polos m y n que se determina en las etapas 41 y 43 de la figura 7 podría determinarse sin determinar realmente los radios máximos $r_{m,\max}$ y $r_{n,\max}$.

65

El ángulo de rotación que detecta el sensor se puede determinar a partir de las lecturas del sensor del anillo magnético interior y el anillo magnético exterior de la siguiente manera. El ángulo de rotación que se detecta es igual al número de revoluciones completas del anillo magnético exterior más la lectura actual del sensor para el anillo magnético exterior. La figura 8 es un gráfico que ilustra las mediciones teóricas y reales del sensor tomadas de una disposición de detección de posición de la forma que se muestra en la figura 1. El eje x es la medición del sensor de posición de la serie de sensores magnéticos exteriores 12. El eje y es una lectura de sensor combinada que es ((lectura de la serie de sensores exteriores x n) - (lectura de la serie de sensores interiores x m)). El gráfico de líneas estrelladas ilustra la medición teórica con una precisión del 100 %. El gráfico de línea continua ilustra ejemplos de lecturas reales. El gráfico de líneas estrelladas es una serie de líneas rectas. Cada línea recta representa un número específico de revoluciones del anillo magnético exterior y un número específico de revoluciones del anillo magnético interior. Por lo tanto, un método para determinar el ángulo de rotación que se detecta por el sensor es determinar:

$$X = (\text{lectura de la serie de sensores exteriores } x \text{ n}) - (\text{lectura de la serie de sensores interiores } x \text{ m}) \quad (\text{ecuación 10})$$

Y comparar X con una tabla de búsqueda que asigna X a un número de revoluciones del anillo exterior. El ángulo de rotación es entonces:

$$\text{Ángulo de rotación} = \text{no. de revoluciones del anillo exterior} + \text{lectura actual de la serie de sensores exteriores} \quad (\text{ecuación 11})$$

El ángulo de rotación podría determinarse alternativamente de una manera similar con respecto a las lecturas de la serie de sensores interiores.

En el ejemplo que se muestra en las figuras 1 y 2, ambos anillos magnéticos 6 y 7 se disponen en la misma superficie del disco 3. Sin embargo, los anillos magnéticos 6 y 7 pueden disponerse en superficies opuestas del disco 3. En este caso, las series de sensores magnéticos se montan sobre superficies opuestas del disco 3. La serie de sensores magnéticos interiores se monta sobre el anillo magnético interior para detectar las transiciones de los polos en ese anillo magnético interior. La serie de sensores magnéticos exteriores se monta sobre la serie de sensores magnéticos exteriores para detectar las transiciones de los polos en ese anillo magnético exterior. En este caso, la separación radial mínima s entre las líneas centrales 9 y 10 de los anillos magnéticos interior y exterior es menor que si los anillos magnéticos estuvieran en la misma superficie del disco. Esto se debe a que la interferencia causada a una serie de sensores magnéticos por un anillo magnético cuyos polos se exponen en la superficie opuesta del disco a la serie de sensores magnéticos es menor que la interferencia causada por un anillo magnético a la misma distancia en el mismo lado del disco como la serie de sensores magnéticos. Por lo tanto, la distancia radial entre las líneas centrales de los anillos magnéticos interior y exterior puede ser menor que la longitud de un par de polos 2y.

En el ejemplo que se muestra en la figura 1 y 2, los anillos magnéticos interior y exterior 6,7 están en el mismo disco 3. Alternativamente, el anillo magnético interior y el anillo magnético exterior pueden disponerse en discos diferentes. Esos diferentes discos tienen el mismo eje de rotación, que es el mismo que el elemento cuya rotación se desea detectar. Sin embargo, esos diferentes discos se separan a lo largo del eje de rotación. Por ejemplo, al medir la rotación de una articulación mecánica, los discos pueden montarse en lados opuestos de la articulación. Esto puede ser conveniente por razones de empaque/compacidad. En este ejemplo, el número de pares de polos m y n en los anillos magnéticos interior y exterior se determinaría como se describe en el presente documento. Sin embargo, dado que los anillos magnéticos interior y exterior se separan axialmente, la interferencia causada por un anillo magnético a la detección del otro anillo magnético es despreciable y, por lo tanto, no hay ninguna restricción para que los anillos magnéticos se separen radialmente.

El aparato y los métodos que se describen en el presente documento se pueden utilizar para detectar menos de una revolución completa de un elemento con relación a otro. El aparato y los métodos que se describen en el presente documento también se pueden utilizar para detectar más de una revolución completa de un elemento con respecto a otro.

En una implementación de ejemplo, un motor impulsa una caja de cambios que impulsa un elemento de la estructura articulada. Un anillo magnético se une rígidamente a la salida del eje del motor del motor. El otro anillo magnético se une rígidamente a la salida del eje de transmisión de la caja de cambios. Por lo tanto, los dos anillos magnéticos se separan axialmente. El eje de rotación del eje del motor y el eje de transmisión son los mismos. Ambos anillos magnéticos se centran en este eje de rotación. Adecuadamente, el anillo magnético interior que tiene m polos se une al eje del motor, y el anillo magnético exterior que tiene n polos se une al eje de transmisión n > m. Si se utiliza una relación de transmisión fraccionada, se puede distinguir más de una revolución del eje de transmisión. Por ejemplo, con una relación de transmisión de 13:4, se pueden distinguir hasta cuatro revoluciones del eje de transmisión. Esto es útil en la implementación de un robot porque permite determinar la posición del eje de transmisión durante la configuración sin tener que girar completamente el eje de transmisión en una dirección y luego en la otra.

En una disposición en la que m es menor que un umbral, la serie de sensores magnéticos 11 para el anillo magnético interior se implementa como una serie circular en el eje en lugar de una serie lineal. El umbral es el número máximo de

polos m para los cuales la serie de sensores magnéticos lineales no interseca el arco de la línea central del anillo magnético interior lo suficiente como para proporcionar una lectura utilizable.

5 En una implementación, $m=1$. En este caso, solo hay un par de polos en el anillo magnético interior. Este par de polos se centra en el centro del disco 3. Este par de polos está en el eje de rotación del disco. Este par de polos no se alinea con ninguno de los pares de polos del anillo magnético exterior. Esto permite detectar el sentido de giro. La utilización de $m=1$ permite utilizar un sensor muy compacto, sin embargo, tiene una precisión baja (consulte la ecuación 1).

10 Como se describió anteriormente, los pares m,n seleccionados son coprimos. En todos los casos $n - m > 1$. En el caso de que los anillos magnéticos interior y exterior 6,7 estén en la misma superficie del disco 3, $n - m \geq 7$. Esto se debe a que la distancia radial s entre las líneas centrales de los anillos magnéticos interior y exterior es mayor o igual que la longitud de un par de polos para evitar interferencias. El número de pares de polos en cada anillo magnético es un número entero. Por lo tanto, la diferencia mínima entre el número de pares de polos en los dos anillos magnéticos es el primer número entero mayor que 2π , que es 7. En un ejemplo, $n - m \geq 8$. Por ejemplo, $n = 41$, $m = 33$. En otro ejemplo, $n - m \geq 10$. Por ejemplo, $n = 47$, $m = 37$.

15 El aparato y los métodos que se describieron anteriormente se refieren a la detección de la rotación de dos anillos magnéticos 6, 7. Los mismos métodos se pueden adaptar para detectar la rotación de tres o más anillos magnéticos. Todos los anillos magnéticos son coaxiales. Todos se pueden disponer en el mismo disco o varios discos que se separan axialmente a lo largo de su eje de rotación. La ecuación 1 muestra que la precisión de la posición que se detecta aumenta a medida que aumenta la suma de los pares de polos en los anillos magnéticos. Por lo tanto, al utilizar anillos magnéticos adicionales, se mide una posición más precisa. El número de pares de polos de cada anillo magnético es coprimo con el número de pares de polos de todos los demás anillos magnéticos. Por lo tanto, en el caso de que haya tres anillos magnéticos, con m , n y h pares de polos, m , n y h son todos coprimos. Cada anillo magnético se separa adecuadamente de forma radial de los anillos magnéticos adyacentes al menos en la distancia predeterminada. Cuando los anillos magnéticos están todos en la misma superficie de un disco, cada anillo magnético se separa preferentemente de los anillos magnéticos adyacentes por al menos la longitud de un par de polos $2y$.

20 En el caso de la figura 6, para un sensor de posición que tiene más de dos anillos magnéticos, un mínimo m y un mínimo n se determinarían como se establece en las etapas 21 y 23. Si hay un tercer anillo magnético, entonces un mínimo h se determinaría de la misma manera que n se determinó a través de las etapas 22 y 23, pero esta vez la separación radial mínima es entre el anillo con n pares de polos y el anillo con h pares de polos. De manera similar, si hay anillos magnéticos adicionales, las etapas 22 y 23 se repiten para cada anillo magnético adicional de la manera correspondiente. Solo si todos los números del par de polos son coprimos en la etapa 24, el método pasa a la etapa 25. De lo contrario, las etapas 26 y 27 del método se realizan para cada anillo adicional hasta que se determina un conjunto de números del par de polos coprimos para cada anillo. El número par de polos del anillo magnético más pequeño se establece como el límite bajo para ese anillo magnético en la etapa 28. El número de par de polos para el anillo magnético más grande se establece como el límite alto para ese anillo magnético en la etapa 28. Se determinan números adicionales del par de polos coprimos para todos los anillos magnéticos en la etapa 29, asegurando que la separación entre los anillos adyacentes sea al menos la separación radial mínima. Se selecciona una combinación del par de polos en la etapa 30 de acuerdo con los métodos que se describieron anteriormente. La disposición de detección de posición se construye mediante el montaje de un disco en la estructura articulada que tiene un grupo de anillos magnéticos con el número de pares de polos en cada anillo que se selecciona en la etapa 30.

30 En el caso de la figura 7, para un sensor de posición que tiene más de dos anillos magnéticos, se determinaría un máximo n y un máximo m como se establece en las etapas 41 y 43. Si hay un tercer anillo magnético, entonces un máximo h se determinaría de la misma manera que m se determinó a través de las etapas 42 y 43, pero esta vez la separación radial mínima es entre el anillo con m pares de polos y el anillo con h pares de polos. De manera similar, si hay anillos magnéticos adicionales, las etapas 42 y 43 se repiten para cada anillo magnético adicional de una manera correspondiente. Solo si todos los números del par de polos son coprimos en la etapa 44, el método pasa a la etapa 45. De lo contrario, las etapas 46 y 47 del método se realizan para cada anillo adicional hasta que se determina un conjunto de números del par de polos coprimos para cada anillo. El número par de polos del anillo magnético más pequeño se establece como el límite bajo para ese anillo magnético en la etapa 48. El número de par de polos para el anillo magnético más grande se establece como el límite alto para ese anillo magnético en la etapa 48. Se determinan números adicionales del par de polos coprimos para todos los anillos magnéticos en la etapa 49, asegurando que la separación entre los anillos adyacentes sea al menos la separación radial mínima s . Se selecciona una combinación de par de polos en la etapa 50 de acuerdo con los métodos que se describieron anteriormente. La disposición de detección de posición se ensambla mediante el montaje de un disco en la estructura articulada que tiene un grupo de anillos magnéticos con el número de pares de polos en cada anillo que se selecciona en la etapa 50.

60 El sensor de posición que se describe en el presente documento es capaz de determinar de forma absoluta la posición de rotación relativa de dos objetos. En otras palabras, la posición se puede determinar directamente a partir de la salida de los sensores sin, por ejemplo, la necesidad de contar el movimiento, ya que la posición de rotación relativa estaba en una configuración de referencia.

65

El aparato y los métodos que se describen con referencia a las figuras 1 y 2 se refieren a la medición de la rotación relativa de dos elementos. Sin embargo, se aplican los mismos principios para medir el movimiento lineal relativo de dos elementos. En este caso, en lugar de disponer la serie magnética como anillos de pares de polos magnéticos, se disponen como pistas lineales de pares de polos magnéticos. Se utilizan dos o más pistas lineales. Las pistas tienen números coprimos de pares de polos magnéticos. Cada pista se encuentra paralela al movimiento lineal del elemento cuya posición se detecta. Una serie de sensores magnéticos lineales respectiva se monta sobre cada pista magnética, de manera que cuando el elemento se mueve, la serie de sensores magnéticos lineales detecta las transiciones de polos de esa serie de sensores magnéticos lineales. Por ejemplo, para un elemento que se mueve linealmente dentro de una carcasa, las series de sensores magnéticos pueden montarse en el elemento y las pistas magnéticas fijarse a la carcasa.

En la fabricación, el disco 3 se magnetiza para hacer que los anillos magnéticos 6, 7 tengan la disposición que se describe anteriormente. Los cabezales de magnetización se montan sobre el disco de la misma manera que las series de sensores magnéticos 11, 12 de la figura 1 para magnetizar el disco. Se coloca una placa trasera magnética en la superficie opuesta del disco a la superficie sobre la que se montan los cabezales de magnetización. El disco gira, magnetizando de esta manera cada par de polos de los anillos magnéticos.

La precisión con la que se colocan los polos en el disco se limita por errores de fabricación. Estos errores incluyen errores de posicionamiento radial y errores de separación angular. Los errores de posicionamiento radial ocurren cuando hay un desplazamiento entre el centro de los anillos magnéticos y el eje de rotación del disco cuando se monta en la estructura articulada. Cuando se monta, la línea central de cada anillo magnético no estará en un radio constante desde el eje de rotación. Cuando se utiliza en un sensor de posición, el radio de la línea central de cada anillo magnético desde el eje de rotación es variable alrededor de su circunferencia y, por lo tanto, es diferente para diferentes pares de polos del anillo magnético. También se producen errores de posicionamiento radial si hay un desplazamiento entre las posiciones radiales previstas y reales del cabezal de magnetización. En tal caso, el anillo magnético que se induce por el cabezal de magnetización tiene un radio constante desde el centro del disco, pero no el radio previsto. Por lo tanto, un número entero de pares de polos no encaja alrededor de la circunferencia del anillo magnético, lo que conduce a longitudes desiguales de uno o más pares de polos del anillo magnético.

Se pretende que los pares de polos de cada anillo magnético tengan una longitud circunferencial constante de $2y$. Los errores de separación angular ocurren cuando la longitud circunferencial de los polos no está incluso alrededor del anillo magnético. Esto puede ocurrir si el disco no se giró uniformemente debajo de los cabezales de magnetización durante la magnetización. Si los polos no tienen una longitud uniforme, la posición detectada será inexacta.

Los errores de posicionamiento radial y los errores de separación angular dan como resultado un patrón de polos que es irregular y no concéntrico al eje de rotación. La precisión de la medición de posición requerida depende de para qué se esté utilizando. En el campo de la robótica, particularmente la robótica quirúrgica, las mediciones de posición deben ser muy precisas. Las medidas de posición de todas las articulaciones del brazo del robot se utilizan en combinación con la disposición que se conoce del brazo del robot para determinar la posición del efector final. La posición del efector final debe conocerse con alta precisión con el fin de controlarlo para realizar procedimientos donde se requiere un control fino, como suturar tejido en un paciente. Es posible que se requiera que la medición de la posición tenga una precisión de $\pm 25\mu\text{m}$, donde la precisión se determina mediante la ecuación 1. Como se discutió anteriormente, la precisión requerida varía con el ángulo de rotación que necesita ser detectable. Cuanto mayor sea el ángulo de rotación que debe detectarse, mayor será la precisión requerida.

Todos los anillos magnéticos del disco 3 se magnetizan al mismo tiempo en la misma plantilla de magnetización. La plantilla de magnetización tiene tantos cabezales de magnetización como anillos magnéticos para magnetizar en el disco. Cada cabezal de magnetización induce el patrón del par de polos magnéticos de un anillo magnético. En una implementación ilustrativa, la diferencia entre la colocación de los polos en los dos anillos magnéticos es precisa dentro de $\pm 2y \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sum \text{pares de polos}}$. Al magnetizar todos los anillos magnéticos utilizando la misma configuración al mismo tiempo, cualquier error de posicionamiento radial se aplica de manera consistente a todos los anillos magnéticos. De manera similar, cualquier error de separación angular se debe a que el disco no gira a una velocidad uniforme, se aplicará consistentemente a todos los anillos magnéticos. Estos errores sistemáticos afectan por igual a los pares de polos de todos los anillos magnéticos, por lo que el error que se introduce en la diferencia entre la colocación de los polos en los dos anillos magnéticos será menor que la suma de los errores que se introducen en los dos anillos individualmente. Por lo tanto, la tolerancia requerida en la magnetización cuando ambos anillos se magnetizan juntos para lograr la precisión deseada es significativamente (casi la mitad) la tolerancia requerida si los anillos se magnetizan individualmente. Los errores sistemáticos pueden detectarse en las mediciones de posición y compensarse. Por ejemplo, con referencia a la figura 5, una parte del error en los datos reales del gráfico de línea continua es sistemático, lo que se puede ver en el hecho de que la línea continua está constantemente desplazada de la línea de datos teóricos. Es probable que este desplazamiento se debe a un error de magnetización del tipo que se describe anteriormente. Este desplazamiento constante se puede determinar y eliminar para producir un resultado más preciso.

Los cabezales de magnetización de la plantilla de magnetización se pueden colocar en la misma línea radial desde el centro de rotación del disco cuando se monta en la plantilla de magnetización. Esto asegura que cualquier error que se introduce por la rotación desigual del disco durante la magnetización se aplique a lo largo de la misma línea radial a todos los anillos magnéticos. Las series de sensores magnéticos de la disposición de detección de posición se colocan en la

misma línea radial desde el centro de rotación del disco cuando se monta en la estructura articulada. Las series de sensores magnéticos se ubican en la misma posición y orientación con relación al disco en el que se encuentran los cabezales de magnetización durante la magnetización.

5 Los sensores de las series de sensores magnéticos pueden ser monolíticos. Al formar los sensores en el mismo proceso, cualquier error es consistente entre los sensores y, por lo tanto, se identifica más fácilmente como un error sistemático cuando se evalúan las lecturas del sensor para generar una medición de posición.

10 Los valores m , n , h , etc. para el número de pares de polos en los anillos magnéticos del disco pueden elegirse para que sean lo más grandes posible dentro de las otras restricciones. Esto aumenta la precisión de las mediciones posteriores y, por lo tanto, reduce la concentricidad y los errores de posición que se introducen por el proceso de fabricación.

15 El disco se monta en la estructura articulada en la misma configuración que se monta en la plantilla de magnetización. En otras palabras, el disco se monta en la estructura articulada en la misma posición y orientación que se monta en la plantilla de magnetización. Adecuadamente, hay una única orientación en la que el disco se puede montar en la plantilla de magnetización y la estructura articulada. El disco comprende una disposición de montaje que ayuda al usuario a montar el disco en la estructura articulada en la misma configuración en la que se monta en la plantilla de magnetización.

20 La figura 9 ilustra una disposición de montaje ilustrativo. La disposición de montaje comprende un conjunto de orificios pasantes 60a, 60b, 60c, 60d. Estos orificios pasantes forman un patrón asimétrico en el disco. Los orificios pasantes permiten montar el disco con características complementarias en la plantilla de magnetización y la estructura articulada. Esas características complementarias se disponen en el mismo patrón asimétrico que el patrón asimétrico de los orificios pasantes del disco. Por ejemplo, el disco puede montarse en pasadores que sobresalen de la plantilla de magnetización/estructura articulada en la misma disposición que el patrón de orificios pasantes en el disco. En este ejemplo, el disco se asegura a la plantilla de magnetización/estructura articulada mediante un mecanismo de retención que retiene el disco contra la plantilla de magnetización/estructura articulada. Por ejemplo, las clavijas pueden ser clavijas roscadas y una tuerca roscada puede enroscarse en la clavija roscada para retener el disco en la plantilla de magnetización/estructura articulada. En otro ejemplo, la plantilla de magnetización/estructura articulada puede tener rebajes roscados en el mismo patrón asimétrico que el patrón de orificios pasantes en el disco. El disco se puede retener a la plantilla de magnetización/estructura articulada atornillando el disco a la plantilla de magnetización/estructura articulada a través de los orificios pasantes en los rebajes roscados.

35 La figura 9 ilustra los orificios pasantes como características de montaje de la disposición de montaje. Sin embargo, otros tipos de características de montaje serían apropiadas, siempre que se proporcionen características complementarias en la plantilla de magnetización/estructura articulada en el mismo patrón asimétrico, y siempre que el disco pueda fijarse a la plantilla de magnetización/estructura articulada por las características de montaje y las características complementarias. Por ejemplo, las características de montaje en el disco pueden ser pasadores, y la plantilla de magnetización/estructura articulada tienen características complementarias.

40 Por lo tanto, la utilización del patrón de características de montaje descentrado que se muestra en la figura 9 permite que el disco se monte en una plantilla de magnetización complementaria/estructura articulada en una única orientación.

45 La figura 9 también ilustra una disposición adicional de montaje ilustrativo. La disposición de montaje comprende una o más muescas de alineación 61. Cuando se monta en la plantilla de magnetización o estructura articulada, la muesca de alineación 61 se alinea con una característica complementaria en la plantilla de magnetización/estructura articulada. Esto asegura que el disco esté en la misma orientación cuando se monta tanto en la plantilla de magnetización como en la estructura articulada. La figura 9 ilustra una muesca de alineación, pero cualquier tipo de marca en la característica del disco sería adecuado, siempre que se proporcione una marca correspondiente en la plantilla de magnetización/estructura articulada para alinear la marca del disco.

50 Una vez que el disco se magnetiza durante la fabricación, las posiciones de los polos pueden medirse y registrarse con precisión. Se puede registrar la longitud de cada poste, o el error de cada longitud de poste con respecto a la longitud prevista. Se puede registrar la distancia radial entre el eje de rotación del disco y los polos. Estas medidas pueden registrarse en la unidad de procesamiento 14. Esta caracterización de las posiciones de los polos se puede utilizar posteriormente cuando el sensor de posición esté en uso para compensar los errores que se introducen durante la fabricación. Mediante la utilización de una disposición de montaje que garantiza que el disco se monte en la estructura articulada en la misma orientación en la que se montó en la plantilla de magnetización, la unidad de procesamiento puede mapear los datos que se detectan de los sensores de las series de sensores a los datos de caracterización que se registran del anillo magnético y corregir los errores de fabricación que se conocen, de esta manera resulta una medición de posición más precisa.

60 Alternativamente, o adicionalmente, la disposición de detección de posición puede calibrarse. El proceso de calibración implica generar una función de corrección que posteriormente se aplica a las lecturas de posición para producir lecturas de posición corregidas que son más precisas.

65

La figura 10 ilustra el campo magnético que se detecta por una serie de sensores magnéticos cuando un anillo magnético gira con relación a él. 70 indica la parte del gráfico que muestra el campo magnético que se detecta desde un primer par de polos magnéticos, y 71 indica la parte del gráfico que muestra el campo magnético que se detecta desde un segundo par de polos magnéticos. Los sensores individuales pueden ubicarse en las posiciones marcadas 1, 2, 3 y 4 con relación a los pares de polos magnéticos. En otras palabras, como se describió anteriormente, los centros de los sensores se separan por un cuarto de la longitud de un par de polos. Los centros de los sensores exterior (marcados con 1 y 4) se separan por tres cuartos de la longitud de un par de polos. En teoría, el campo magnético varía sinusoidalmente a medida que un anillo magnético pasa por la serie de sensores magnéticos, con un período de la onda sinusoidal que representa un par de polos. Sin embargo, las imperfecciones en la fabricación del anillo magnético y la alineación del conjunto de sensores magnéticos con el anillo magnético hacen que el campo magnético se desvíe de una onda sinusoidal perfecta.

La figura 11 ilustra una lectura teórica del sensor tomada mientras un solo par de polos magnéticos pasa por el conjunto de sensores magnéticos. Esta lectura teórica del sensor es de varios bits y se representa por la línea 72 en la figura 11. La figura 11 también ilustra una lectura de sensor real tomada mientras un solo par de polos magnéticos pasa por el conjunto de sensores magnéticos. La lectura real del sensor es de varios bits y se representa por la curva 73 en la figura 11.

Ahora se describirá un proceso de calibración que tiene como objetivo corregir las lecturas de posición del sensor medidas para el error que se muestra en la figura 11. Este proceso se aplica a cada anillo magnético del disco individualmente.

En primer lugar, la serie de sensores magnéticos toma una lectura de posición 73 para cada par de polos del anillo magnético. Esta lectura de posición se denomina a continuación la lectura de posición del par de polos de calibración para ese par de polos. Para cada par de polos, la lectura de la posición del par de polos de calibración 73 se compara con una lectura de la posición del par de polos del modelo 72 para generar una función de corrección del par de polos para ese par de polos. Como puede verse en la figura 11, la curva de la lectura de posición del par de polos de calibración 73 oscila alrededor de la línea recta de la lectura de posición del par de polos del modelo 72. La curva de la lectura de la posición del par de polos de calibración 73 puede oscilar periódicamente alrededor de la línea recta de la lectura de la posición del par de polos del modelo 72. Para cada par de polos, la función de corrección del par de polos se puede generar ajustando una curva a la lectura de posición del par de polos de calibración 73, y luego deduciendo la línea recta de la lectura de posición del par de polos del modelo de la curva ajustada. Esta curva puede ajustarse utilizando un método de mínimos cuadrados. Alternativamente, la curva se puede ajustar utilizando cualquier otro método que se conozca en la técnica. La curva ajustada puede describirse mediante una función de oscilación periódica. Por ejemplo, la curva ajustada puede ser una función sinusoidal. La figura 12 ilustra una función de corrección para un par de polos, que es una onda sinusoidal de amplitud A. En otras palabras, $A \sin \theta$, donde θ es el ángulo dentro de la onda sinusoidal del par de polos. Aunque la figura 12 solo muestra el primer armónico, $A \sin \theta$, los armónicos más altos pueden incluirse en la función de corrección para el par de polos.

Las funciones de corrección de pares de polos de los pares de polos del anillo magnético se promedian luego para generar una función de corrección del par de polos promedio para el anillo magnético. Si la función de corrección de cada par de polos se representa por una onda sinusoidal, entonces la función de corrección del par de polos promedio viene dada por:

$$\frac{1}{m} \sum_1^m A_m \sin m\theta \quad (\text{ecuación 12})$$

Donde m es el número de pares de polos en el anillo magnético.

Adecuadamente, esta función de corrección se almacena en la unidad de procesamiento 14. Posteriormente, cuando el sensor de posición toma una medición de posición, la medición de posición se corrige utilizando la función de corrección de par de polos promedio. La medición de posición comprende una pluralidad de lecturas de posición del par de polos. La función de corrección de par de polos promedio se deduce de cada lectura de posición de par de polos de la medición de posición, de esta manera genera una medición de posición corregida.

Deducir la función de corrección de par de polos promedio de cada lectura de posición de par de polos de un anillo magnético es menos preciso que utilizar los errores de cada par de polos individual. Sin embargo, almacenar solo una función de corrección de par de polos promedio por anillo magnético reduce la utilización de memoria que se requiere para la corrección. Además, deducir la función de corrección del par de polos promedio es menos complejo algorítmicamente que utilizar errores del par de polos individuales y, por lo tanto, reduce la potencia de procesamiento que se requiere para la corrección.

La figura 13 ilustra las lecturas teóricas del sensor tomadas mientras un anillo magnético completo pasa por el conjunto de sensores magnéticos. Estas lecturas teóricas del sensor son de varios bits y se representan por la línea 74 de la figura 13. La figura 13 también ilustra las lecturas reales del sensor tomadas mientras todo el anillo magnético pasa por el conjunto de sensores magnéticos. Estas lecturas reales del sensor son de varios bits y se representa por la curva 75 en la figura 13. La curva 76 representa las lecturas reales del sensor que se corrigen para el error del par de polos como se describe en relación con las figuras 10 a 12. La figura 13 ilustra un error adicional en las lecturas reales del sensor. Este error es aproximadamente un error de onda sinusoidal en comparación con las lecturas teóricas del sensor que se representa por la línea recta 74.

Ahora se describirá un proceso de calibración que tiene como objetivo corregir las lecturas de posición del sensor medidas para el error adicional que se muestra en la figura 13. Este proceso se aplica a cada anillo magnético del disco individualmente.

5

En primer lugar, la serie de sensores magnéticos toma una lectura de posición 73 para cada par de polos del anillo magnético. Como se indicó anteriormente, esta lectura de posición se denomina lectura de posición del par de polos de calibración para ese par de polos. Para cada par de polos, la lectura 73 de la posición del par de polos de calibración se compara con una lectura 72 de la posición del par de polos del modelo con el fin de generar una función de corrección del par de polos para ese par de polos como se discutió anteriormente. Para cada par de polos, se genera una lectura de la posición del par de polos de calibración que se corrige deduciendo la función de corrección del par de polos de la lectura de la posición del par de polos de calibración para ese par de polos. En el ejemplo de la figura 13, la curva 76 representa las lecturas corregidas de la posición del par de polos de calibración de todos los pares de polos del anillo magnético.

10

15

Se genera entonces una función de corrección de revoluciones comparando las lecturas corregidas de la posición del par de polos de calibración para todos los pares de polos del anillo magnético con las lecturas de posición de las revoluciones del modelo. Como puede verse en la figura 13, la curva de lecturas corregidas de la posición del par de polos de calibración 76 oscila alrededor de la línea recta de las lecturas de la posición de las revoluciones del modelo 74. La curva de las lecturas corregidas de la posición del par de polos de calibración 76 puede oscilar periódicamente alrededor de la línea recta de las lecturas de la posición de las revoluciones del modelo 74. La función de corrección de las revoluciones puede generarse ajustando una curva de las lecturas corregidas de la posición del par de polos de calibración 76, y luego deduciendo la línea recta de las lecturas de la posición de las revoluciones del modelo 74 de la curva ajustada. Esta curva puede ajustarse utilizando un método de mínimos cuadrados. Alternativamente, la curva se puede ajustar utilizando cualquier otro método que se conozca en la técnica. La curva ajustada puede describirse mediante una función de oscilación periódica. Por ejemplo, la curva ajustada puede ser una función sinusoidal. La función sinusoidal puede ser una onda sinusoidal de amplitud B , es decir, $B\sin\phi$, donde ϕ es el ángulo dentro de la onda sinusoidal de revolución. Aunque en este ejemplo, la curva ajustada es solo un primer armónico, $B\sin\phi$, también se pueden incluir armónicos más altos.

20

25

La función de corrección de revoluciones puede almacenarse en la unidad de procesamiento 14. Posteriormente, cuando el sensor de posición toma una medición de posición, la medición de posición se corrige utilizando la función de corrección de revoluciones deduciendo la función de corrección de revoluciones de la lectura de posición.

30

Ambos mecanismos de calibración que se describen pueden llevar a cabo en las medidas de posición, de modo que las medidas de posición se corrijan utilizando tanto la función de corrección del par de polos promedio como la función de corrección de revoluciones. Alternativamente, solo se puede realizar uno de los mecanismos de calibración. Este único mecanismo de calibración puede ser el mecanismo de corrección del par de polos promedio o el mecanismo de corrección de revoluciones.

35

Los mecanismos de calibración pueden realizarse una vez se monta el disco magnético en la articulación mecánica u otros elementos cuya rotación relativa se esté detectando en la estructura articulada. Al realizar la calibración en esta etapa, los errores se introducen durante el ensamble del sensor de posición en su lugar (por ejemplo, al alinear el conjunto de sensores magnéticos sobre el disco magnético), así como los que se introducen durante la fabricación, pueden detectarse y compensarse. El sensor puede recalibrarse en uso, utilizando los mecanismos de calibración que se describen anteriormente. Los mecanismos de calibración se pueden llevar a cabo durante la fabricación, y el sensor de posición se puede suministrar con las funciones de corrección que se describen y se almacenan en la unidad de procesamiento 14 y se aplican posteriormente a las lecturas de posición medidas durante la utilización.

40

45

En el campo de la robótica, y en particular de la robótica quirúrgica, es conveniente que el brazo del robot sea lo más pequeño y ligero posible. Los sensores de posición que se utilizan en cada articulación del brazo del robot también son preferiblemente pequeños y ligeros. Por ejemplo, el disco 3 se puede hacer de aluminio. En este campo, magnetizar el disco en el lugar del brazo del robot es poco práctico. Dada la naturaleza compacta del brazo del robot, no hay espacio suficiente para aplicar una plantilla de magnetización estándar alrededor del brazo del robot para magnetizar el disco. Además, se utiliza una placa trasera magnética para el disco durante la magnetización para magnetizar el disco. Por ejemplo, se utiliza acero como placa trasera. Para magnetizar el disco en el lugar, el disco debería estar hecho de acero u otro material magnético. Esto impediría fabricar el disco de un material ligero como el aluminio. Por lo tanto, el disco no se magnetiza en el lugar, sino que se toman las medidas que se describen en el presente documento para replicar el entorno de la plantilla de magnetización en la estructura articulada con el fin de compensar los errores que se introducen durante la fabricación.

50

55

REIVINDICACIONES

1. Un método de ensamble de una disposición de detección de posición para detectar la posición de una articulación mecánica de un brazo de robot, la disposición de detección de posición comprende un conjunto de sensores magnéticos (11, 12) y un disco (3) que tiene un anillo magnético interior (6) con j pares de polos magnéticos y un anillo magnético exterior (7) con k pares de polos magnéticos, en donde $|j-k|>1$ y en donde la forma y el tamaño de los polos magnéticos en los anillos magnéticos interior y exterior son los mismos, el límite radial interior (5) el disco se restringe por un eje del brazo del robot y el límite radial exterior (4) del disco se restringe por una carcasa del brazo del robot, el método comprende:
- determinar un número de pares de polos del anillo magnético interior p de manera que una línea central (9) del anillo magnético interior (6) se separe del límite radial interior del disco (5) por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) que se dispone entre la línea central (9) del anillo magnético interior (6) y el límite radial interior (5);
- determinar un número de pares de polos del anillo magnético exterior para que sea un número entero q de manera que el anillo magnético exterior se separe radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; y
- sí p y q son coprimos:
- seleccionar j para que sea p y k para que sea q ; y
- ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
- el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
- el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
2. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde si p y q no son coprimos:
- determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior (7) de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y
- para cada iteración, si p y q son coprimos:
- seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y
- seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares de números coprimos p' , q' , donde:
- p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y
- para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos;
- seleccionar el par p' , q' identificado que tiene el mayor valor de p' ;
- seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y
- ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
- el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
- el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
3. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde si p y q no son coprimos:
- determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior (7) de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y
- para cada iteración, si p y q son coprimos:
- seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y
- seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares de números coprimos p' , q' , donde:
- p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y
- para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos;

seleccionar el par p' , q' identificado que tiene el mayor valor de q' ;
seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y
ensamblar la disposición de detección de posición mediante:

- 5 el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
- 10 4. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde si p y q no son coprimos:

determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior (7) de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y
para cada iteración, si p y q son coprimos:
15 seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares de números coprimos p' , q' , donde:
20 p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del primer anillo magnético por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos;
25 seleccionar el par p' , q' identificado que tiene el valor más pequeño de q' ;
seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y
ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
30 el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
- 35 5. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde si p y q no son coprimos:

determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior (7) de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y
para cada iteración, si p y q son coprimos:
40 seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares de números coprimos p' , q' , donde:
45 p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p' , q' , el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos;
50 seleccionar el par p' , q' identificado que tiene el valor más pequeño de $|p'-q'|$;
seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y
ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
55 el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
- 60 6. Un método como se reivindicó en cualquier reivindicación anterior, en donde el anillo magnético interior (6) y el anillo magnético exterior (7) son concéntricos.
- 65 7. Un método como se reivindicó en la reivindicación 6, cuando depende de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, que comprende determinar iterativamente un valor q adicional incrementando q en 1 cada iteración, en donde $p' > p$ y $q' < q$, y en donde para cada iteración, si p y q son coprimos, el método comprende seleccionar p para que sea el límite inferior de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior (6), y seleccionar q para que sea el límite superior de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior (7).

8. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde si p y q no son coprimos:
- determinar iterativamente un valor adicional q para el número de pares de polos del anillo magnético exterior (7) de manera que la diferencia entre p y q se incremente en uno en cada iteración; y
 5 para cada iteración, si p y q son coprimos:
- seleccionar p para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y seleccionar q para que sea un límite de un intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior; identificar uno o más pares de números coprimos p', q', donde:
- 10 p' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético interior, y q' está en el intervalo de números de pares de polos del anillo magnético exterior, y para ese par p', q', el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos;
- 15 seleccionar un par p', q' identificado en función del ángulo máximo de rotación de la articulación mecánica a detectar por la disposición de detección de posición; seleccionar j para que sea el p' seleccionado y k para que sea el q' seleccionado; y ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
- 20 el montaje del disco (3) en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y el montaje del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
- 25 9. Un método como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el disco comprende además un tercer anillo magnético con pares de polos l, el método comprende, además:
- determinar un número de pares de polos del tercer anillo magnético como un número entero s de manera que el tercer anillo magnético separe radialmente del anillo magnético exterior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos; y
 30 si p, q y s son coprimos:
- seleccionar j para que sea p, k para que sea q e l para que sea s; y
 35 ensamblar la disposición de detección de posición mediante:
- el montaje del disco en el brazo del robot de manera que se permita que tanto el disco como la articulación mecánica giren alrededor del mismo eje; y
 40 el montaje del conjunto de sensores magnéticos en el brazo del robot para permitir la detección de la rotación relativa del disco y el conjunto de sensores magnéticos.
10. Un brazo de robot que comprende una disposición de detección de posición montada en el brazo de robot, la disposición de detección de posición comprende:
- 45 un anillo magnético interior (6) que tiene j pares de polos magnéticos; un anillo magnético exterior (7) con k pares de polos magnéticos, en donde la forma y el tamaño de los polos magnéticos de los anillos magnéticos interior y exterior son los mismos, el anillo magnético exterior es inamovible con relación al anillo magnético interior, los anillos magnéticos interior y exterior se disponen en un disco, el límite radial interior (4) del disco se limita por un eje del brazo robótico y el límite radial exterior (5) del disco se limita por una carcasa del brazo robótico; y
 50 un conjunto de sensores magnéticos (11, 12) para detectar la posición relativa del conjunto de sensores magnéticos y los anillos magnéticos interior y exterior; en donde j y k son coprimos y $|j-k|>1$;
- 55 en donde la disposición de detección de posición es para detectar la posición de una articulación mecánica del brazo del robot, el anillo magnético interior y el anillo magnético exterior se montan en el brazo del robot de manera que el anillo magnético interior, el anillo magnético exterior y la articulación mecánica se permiten todos girar sobre el mismo eje,
- 60 en donde una línea central (9) del anillo magnético interior (6) se separa del límite radial interior del disco (5) por al menos la porción del ancho radial del conjunto de sensores magnéticos (11, 12) que se dispone entre la línea central (9) del anillo magnético interior (6) y el límite radial interior (5), y el anillo magnético exterior se separa radialmente del anillo magnético interior por al menos la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos.
11. Un brazo de robot como se reivindicó en la reivindicación 10, en donde el conjunto de sensores magnéticos (11, 12) comprende una primera serie de sensores magnéticos (11) que se disponen sobre el anillo magnético interior (6) y una segunda serie de sensores magnéticos (12) que se disponen sobre el anillo magnético exterior (7), los
- 65

sensores adyacentes de cada una de las primeras y segundas series de sensores magnéticos se separan por un cuarto de la longitud circunferencial de cada par de polos magnéticos.

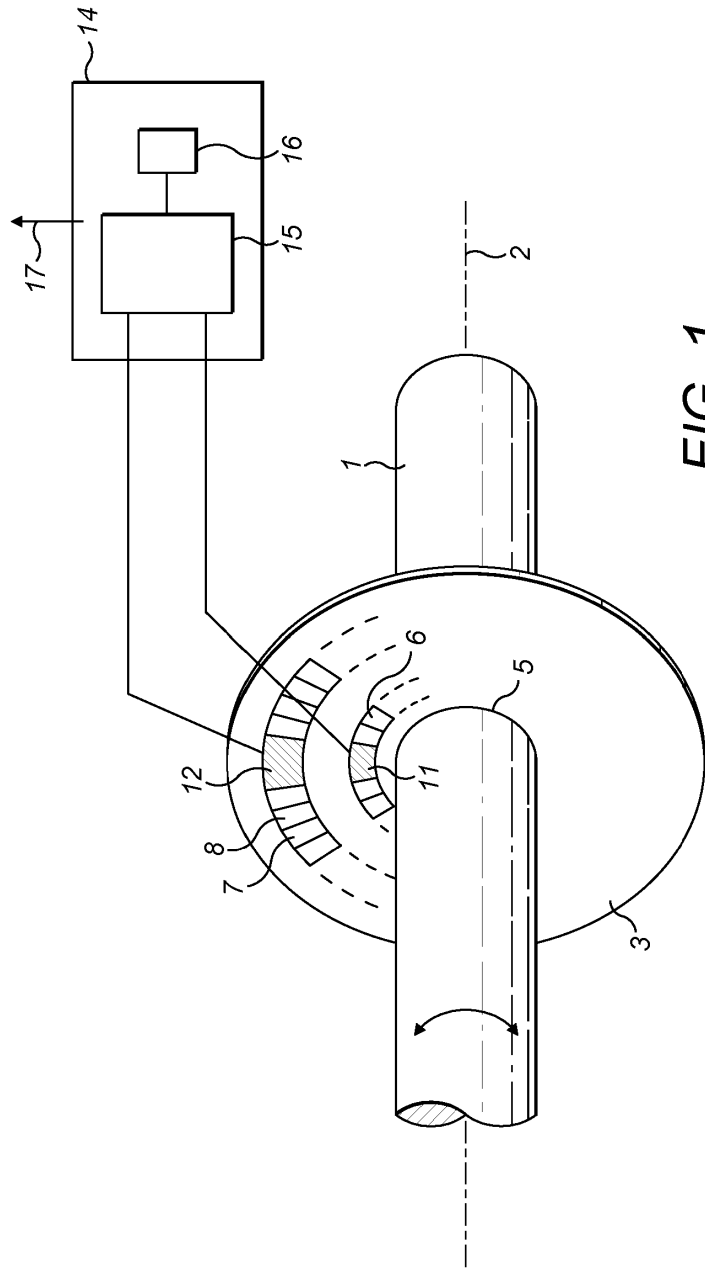


FIG. 1

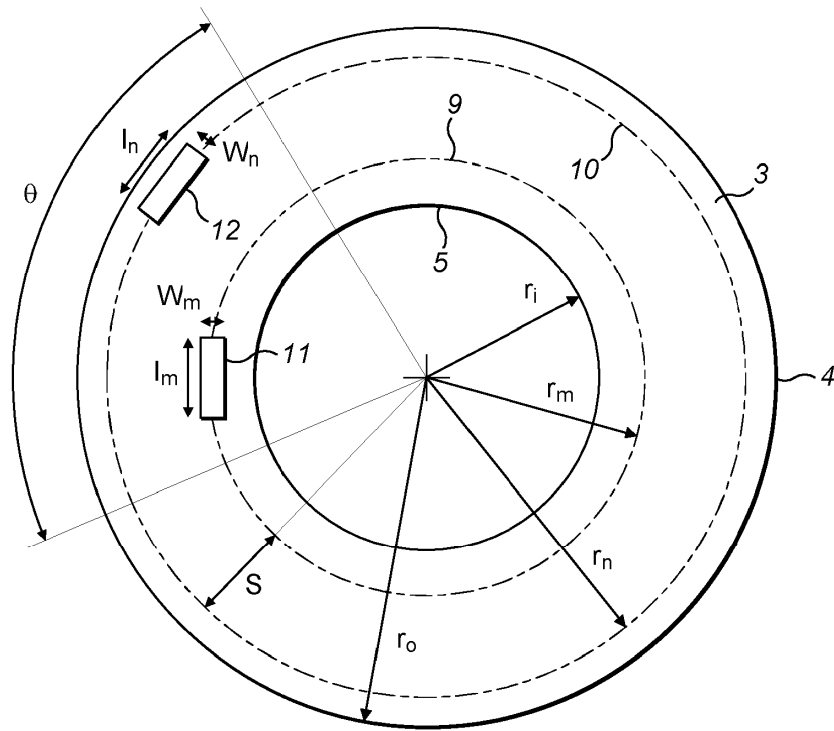


FIG. 2

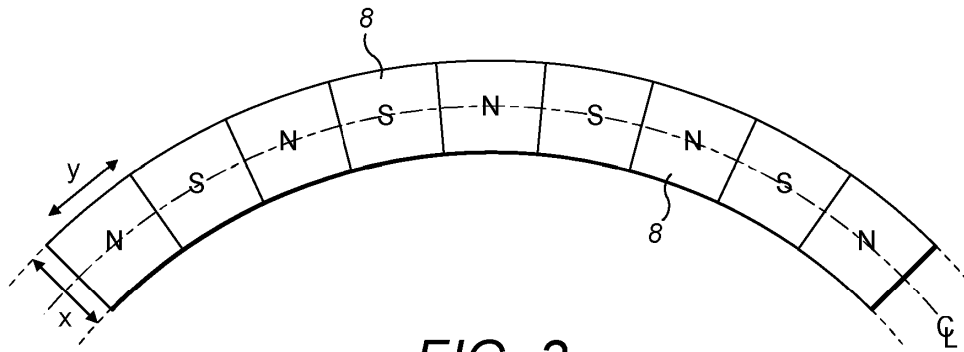


FIG. 3

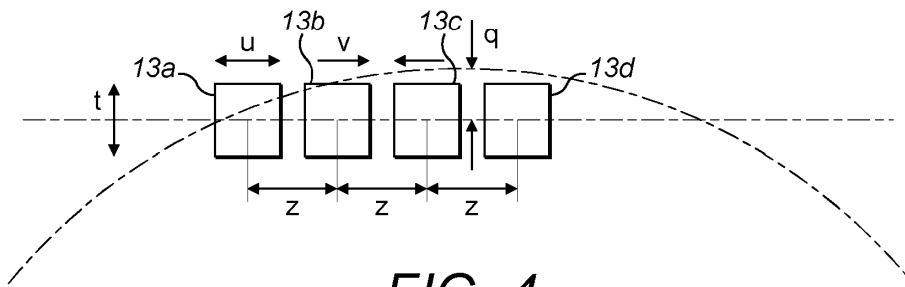


FIG. 4

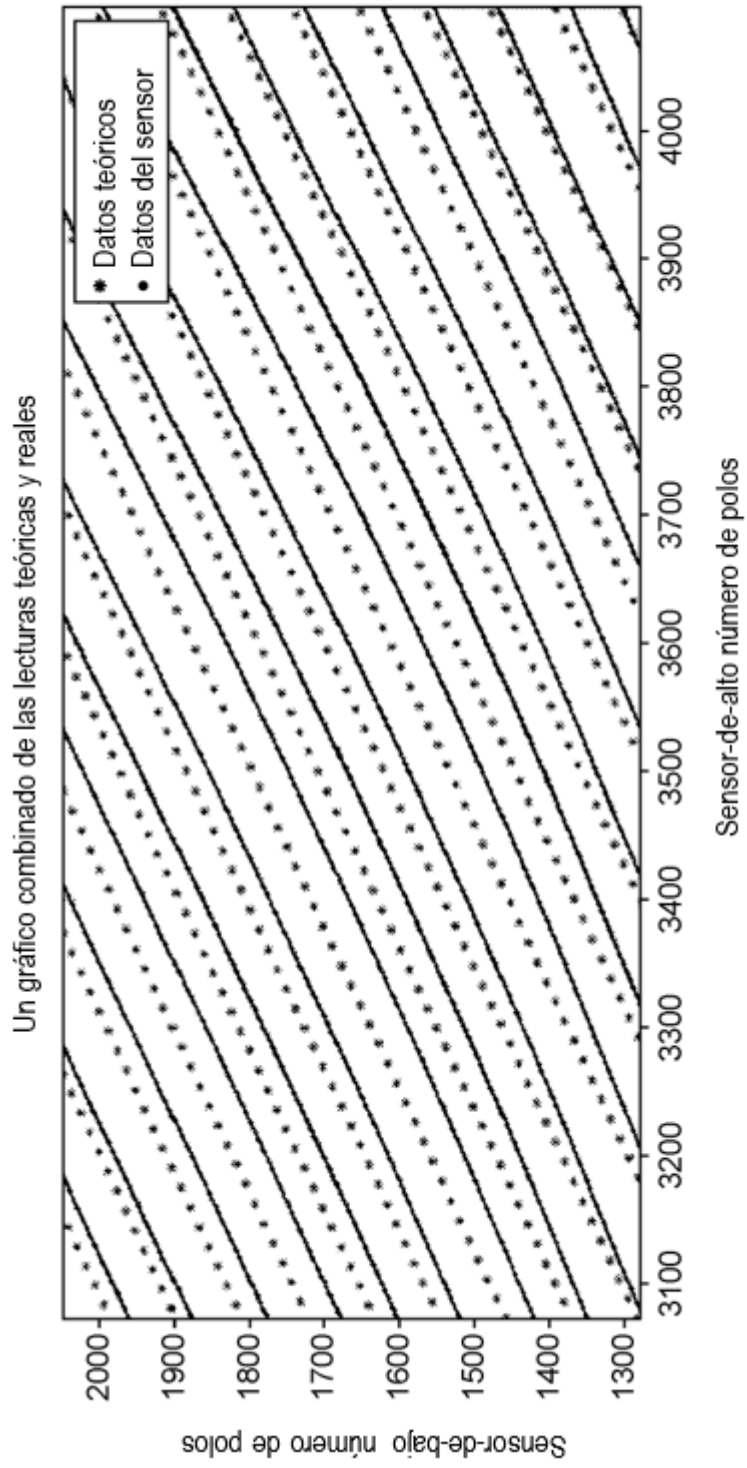


FIG. 5

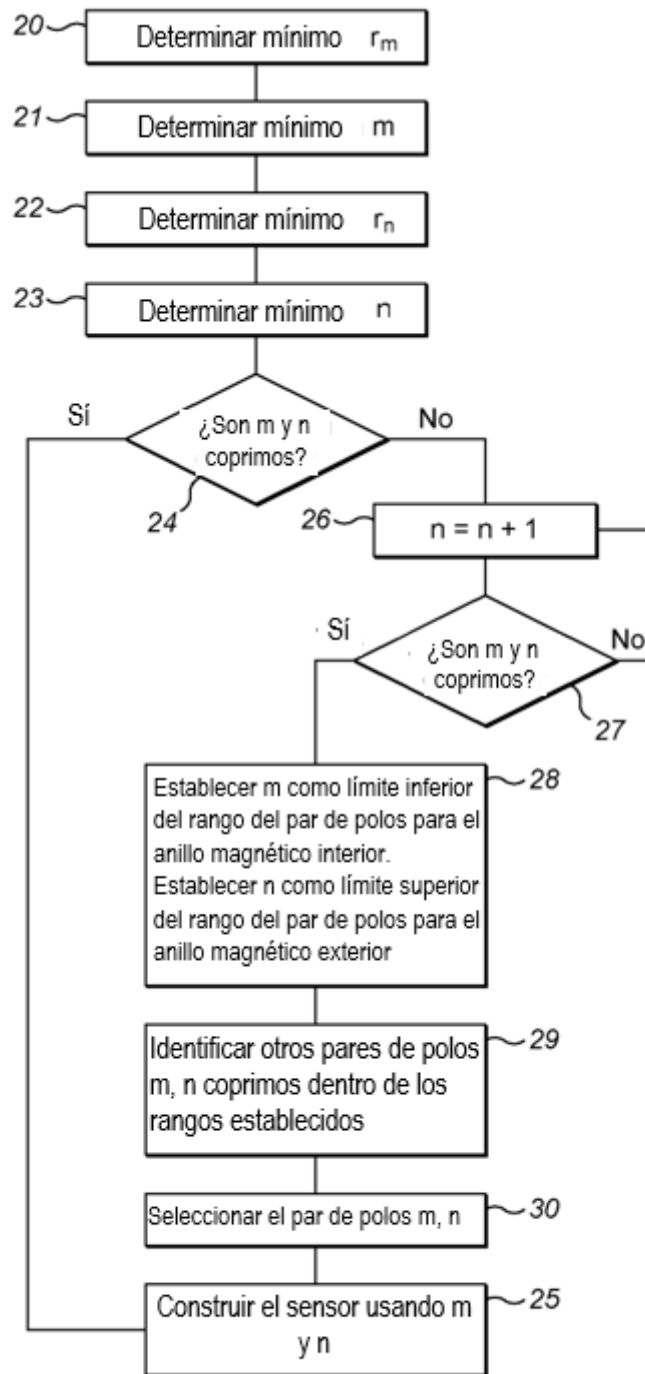


FIG. 6

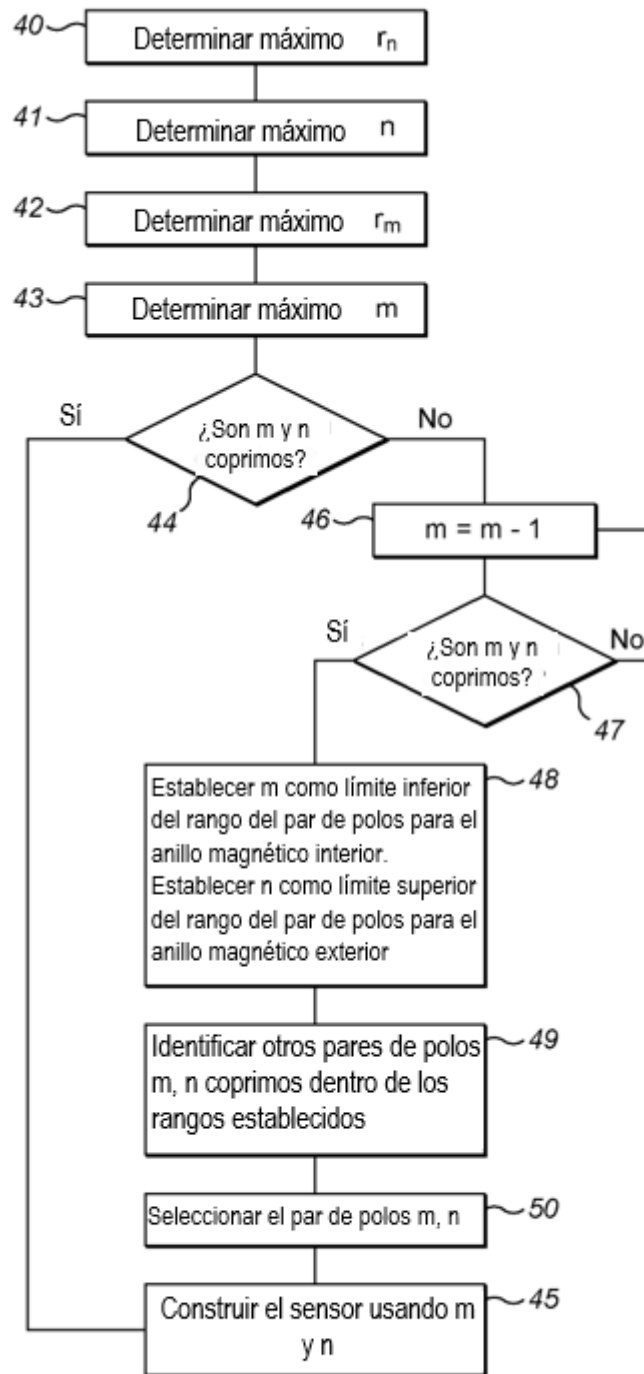


FIG. 7

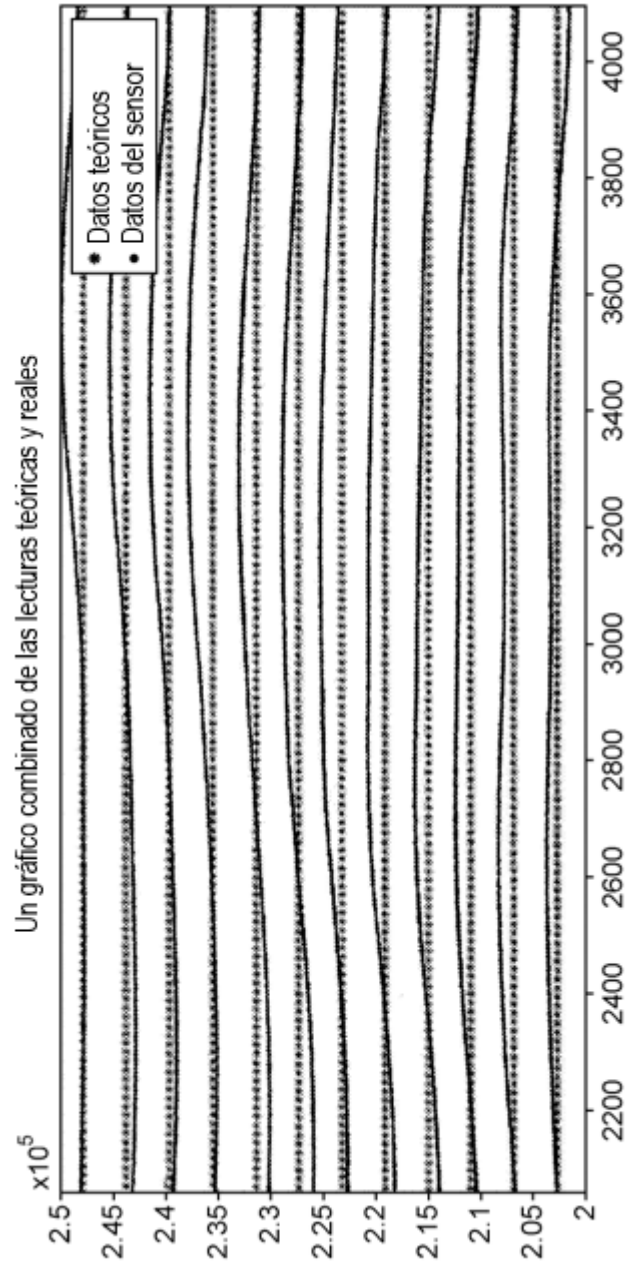


FIG. 8

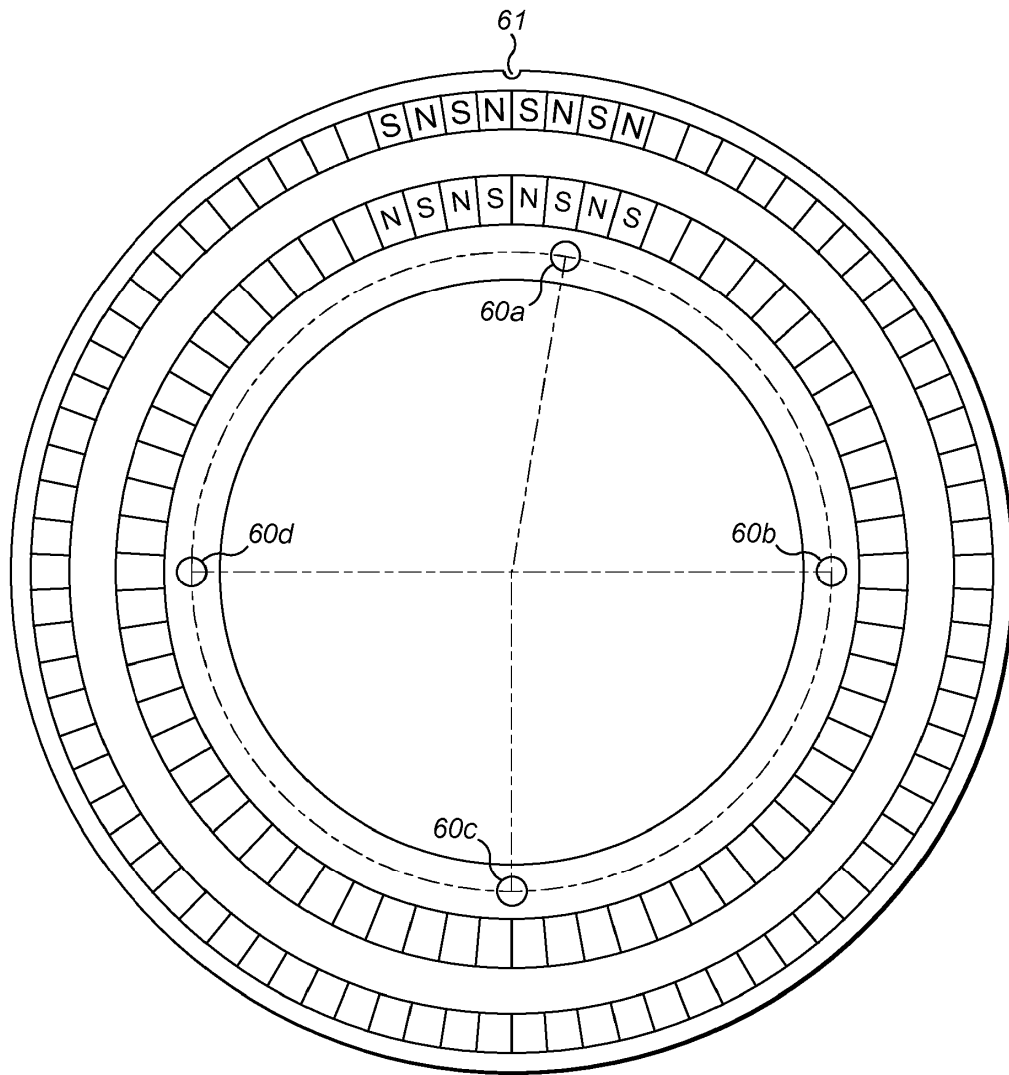


FIG. 9

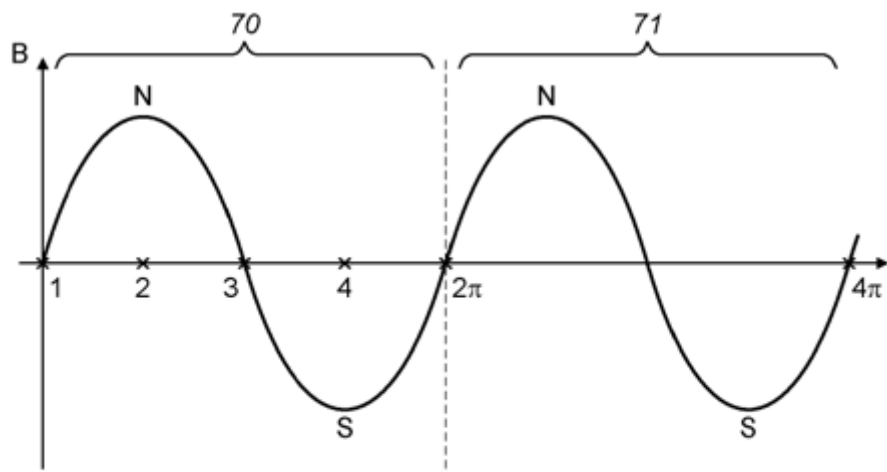


FIG. 10

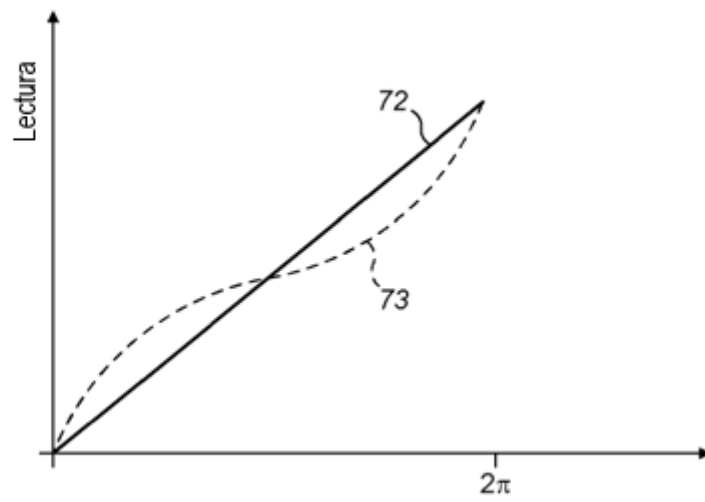


FIG. 11

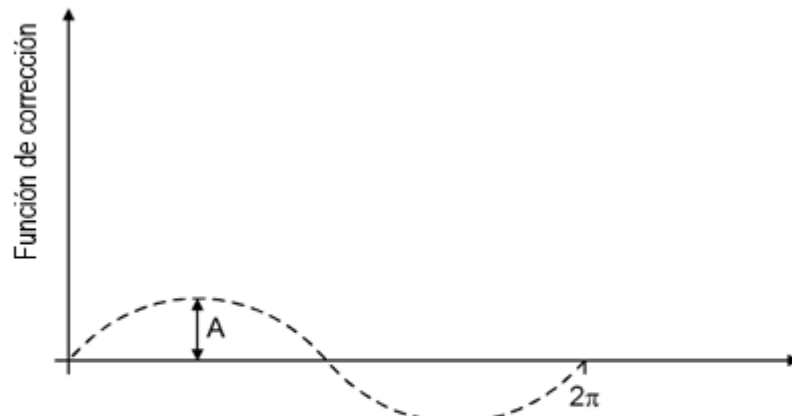


FIG. 12

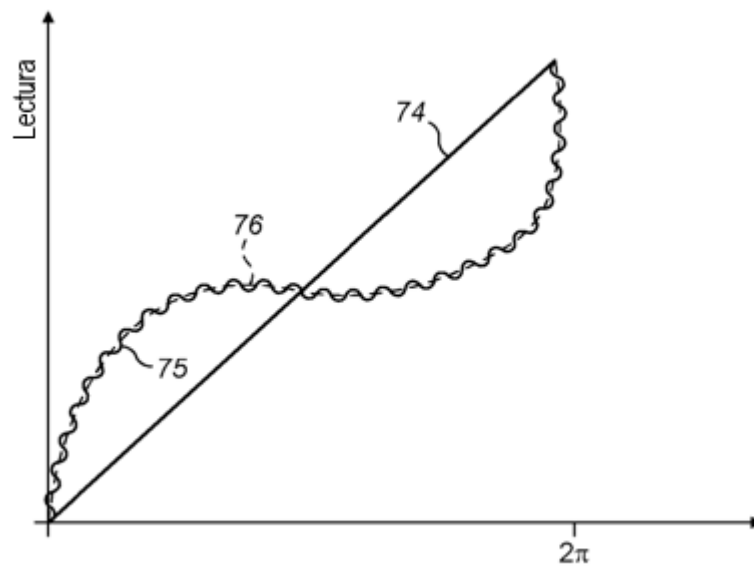


FIG. 13