

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 600 352**

51 Int. Cl.:

**G05D 1/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.06.2002 E 10184290 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.08.2016 EP 2330473**

54 Título: **Robot móvil**

30 Prioridad:

**12.06.2001 US 297718 P**

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

**08.02.2017**

73 Titular/es:

**IROBOT CORPORATION (100.0%)**

**8 Crosby Drive**

**Bedford, MA 01730, US**

72 Inventor/es:

**JONES, JOSEPH y**

**MASS, PHILIP R.**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 600 352 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

Robot móvil

## SECTOR TÉCNICO DE LA INVENCIÓN

5 Esta invención se refiere, en general, a vehículos autónomos o robots, y más específicamente a procedimientos y a dispositivos robóticos para cubrir un área específica, tal como pueden requerir los robots limpiadores o máquinas cortacésped, o para ser utilizados como tales.

## ANTECEDENTES

10 Para los objetivos de esta descripción, los ejemplos se centrarán en los problemas presentados en la técnica anterior relacionada con la limpieza robótica (por ejemplo, limpieza del polvo, abrillantado, barrido, fregado, fregado en seco o aspirado). Sin embargo, la invención reivindicada está limitada solamente por las propias reivindicaciones, y un experto en la materia reconocerá los innumerables usos de la presente invención más allá de la limpieza doméstica de interiores.

15 Los ingenieros de robótica han trabajado mucho en el desarrollo de un procedimiento eficaz de limpieza autónoma. A modo de introducción, el rendimiento de los robots de limpieza se debería centrar en tres medidas de éxito: la cobertura, la velocidad de limpieza y la eficacia percibida. La cobertura es el porcentaje del espacio disponible visitado por el robot durante un tiempo de limpieza fijo y, en el caso ideal, un robot limpiador proporcionaría una cobertura del 100 por ciento dado un tiempo de servicio infinito. Desgraciadamente, los diseños de la técnica anterior dejan a menudo partes del área no cubiertas, independientemente de la cantidad de tiempo que se permita al dispositivo para completar sus tareas. La incapacidad de conseguir una cobertura completa puede ser resultado de limitaciones mecánicas -por ejemplo, el tamaño y la forma del robot pueden impedir que éste llegue a ciertas áreas- o bien el robot puede quedar atrapado, incapaz de variar su control para escapar. La incapacidad de conseguir una cobertura completa puede asimismo ser resultado de un algoritmo de cobertura inadecuado. El algoritmo de cobertura es el conjunto de instrucciones utilizadas por el robot para controlar su movimiento. Para los propósitos de la presente invención, la cobertura se describe como un porcentaje del área disponible visitada por el robot durante un tiempo de limpieza finito. Debido a limitaciones mecánicas y/o algorítmicas, ciertas áreas en el interior del espacio disponible pueden ser desatendidas sistemáticamente. Dicha desatención sistemática es una limitación importante en la técnica anterior.

20 Una segunda medida del rendimiento de un robot de limpieza es la velocidad de limpieza, proporcionada en unidades de área limpiada por unidad de tiempo. La velocidad de limpieza se refiere a la velocidad a la que aumenta el área de suelo limpiado; la velocidad de cobertura se refiere a la velocidad a la que el robot cubre el suelo independientemente de si el suelo estaba anteriormente limpio o sucio. Si la velocidad del robot es  $v$  y la anchura del mecanismo de limpieza del robot (denominada asimismo anchura de trabajo) es  $w$ , entonces la velocidad de cobertura del robot es simplemente  $w \cdot v$ , pero su velocidad de limpieza puede ser drásticamente inferior.

25 Un robot que se mueve de manera totalmente aleatoria en un entorno cerrado tiene una velocidad de limpieza que disminuye en función del tiempo con respecto a la velocidad de cobertura del robot. Esto se debe a que cuanto más tiempo funcione el robot más probable es que vuelva a visitar áreas ya limpiadas. El diseño óptimo tiene una velocidad de limpieza equivalente a la velocidad de cobertura, minimizando de ese modo innecesarias limpiezas repetidas de la misma zona. En otras palabras, la relación de la velocidad de limpieza con la velocidad de cobertura es una medida de la eficiencia, y una velocidad de limpieza óptima significaría una cobertura del máximo porcentaje del área designada con el mínimo número de pases acumulados o redundantes sobre un área ya limpiada.

30 Una tercera métrica del rendimiento de un robot de limpieza es la eficacia percibida del robot. Esta medida se ignora en la técnica anterior. Se prima el movimiento deliberado y cierto movimiento pautado dado que los usuarios percibirán como más eficaz un robot que presente movimiento deliberado.

35 Aunque la cobertura, la velocidad de limpieza y la eficacia percibida son los criterios de rendimiento discutidos en la presente memoria, una realización preferida de la presente invención tiene en cuenta asimismo la facilidad de uso en habitaciones de diversas formas y tamaños (que contienen diversos obstáculos desconocidos) y el coste de los componentes robóticos. Otros criterios de diseño pueden asimismo influir sobre el diseño, por ejemplo, la necesidad de evitación de colisiones y la respuesta adecuada a otros peligros.

40 Tal como se describe en detalle en el documento de Jones, Flynn & Seiger, "Mobile Robots: Inspiration to Implementation" (robots móviles: inspiración para su implementación), segunda edición, 1999, A K Peters, Ltd., y en otros, se han realizado muchos intentos para construir robots de aspirado y limpieza. Cada uno de estos robots se ha enfrentado a un desafío similar: cómo cubrir eficientemente el área designada dadas unas reservas de energía limitadas.

45 Los inventores se refieren a la limpieza de máxima eficiencia, donde la velocidad de limpieza es igual a la velocidad de cobertura, como limpieza determinista. Tal como se muestra en la figura 1A, un robot 1 que sigue una trayectoria determinista se mueve de tal modo que cubre completamente el área 2 evitando al mismo tiempo toda limpieza redundante. La limpieza determinista requiere que el robot sepa dónde está y dónde ha estado; esto requiere, a su

vez, un sistema de posicionamiento. Dicho sistema de posicionamiento -un sistema de posicionamiento lo suficientemente preciso como para permitir una limpieza determinista puede depender de dispositivos de telemetría por escaneo láser, transductores ultrasónicos, GPS diferencial por fase portadora u otros procedimientos- puede tener costes prohibitivos e involucrar configuración por el usuario específica para las geometrías de las habitaciones particulares. Además, los procedimientos que dependen del posicionamiento global quedan habitualmente incapacitados por el fallo de cualquier parte del sistema de posicionamiento.

Un ejemplo de utilización de tecnologías de sensor extremadamente sofisticadas (y costosas) para producir limpieza determinista es el dispositivo RoboScrub, construido por Denning Mobile Robotics and Windsor Industries, que utilizaba sonar, detectores de infrarrojos, sensores de golpe y navegación láser de alta precisión. El sistema de navegación del RoboScrub requería fijar grandes blancos de código de barras en diversas posiciones en la habitación. El requisito de que el RoboScrub pueda ver por lo menos cuatro blancos simultáneamente era un problema de funcionamiento significativo. Por lo tanto, el RoboScrub se limitó a la limpieza de grandes áreas abiertas.

Otro ejemplo, RoboKent, un robot construido por Kent Corporation, sigue una estrategia de posicionamiento global similar a RobotScrub. RoboKent se deshace del sistema de posicionamiento láser más costoso de RobotScrub, pero al hacerlo, RoboKent se tiene que limitar solamente a áreas con una geometría rectangular simple, por ejemplo, largos pasillos. En estas zonas más limitadas, la corrección de la posición mediante mediciones de telemetría sonar es suficiente. Se describen otros sistemas de limpieza deterministas, por ejemplo, en las patentes U.S.A. números 4.119.900 (Kremnitz), 4.700.427 (Knepper), 5.353.224 (Lee et al.), 5.537.017 (Feiten et al.), 5.548.511 (Bancroft) y 5.650.702 (Azumi).

La memoria WO99/59042 A1 da a conocer un robot que se mueve en el interior de un área delimitada, marcada por un marcador de límite de borde exterior, no se proporciona un mapa del área. Los obstáculos se marcan con marcadores de obstáculo. Un sistema de navegación del robot mueve el robot hacia delante a lo largo de una trayectoria recta hasta que detecta el marcador de límite de borde exterior o el marcador de obstáculo. En cada encuentro, el sistema de navegación, utilizando una brújula, gira el robot 180 grados a un lado del mismo, de tal modo que la trayectoria de retorno es paralela a la trayectoria de avance anterior, estando la anchura de trabajo de cada trayectoria junto a la trayectoria anterior o solapándola ligeramente.

Debido a las limitaciones y dificultades de la limpieza determinista, algunos robots han dependido de sistemas pseudodeterministas. Un procedimiento para proporcionar limpieza pseudodeterminista es un procedimiento de navegación autónoma conocido como navegación por estima. La navegación por estima consiste en la medición de la rotación precisa de cada rueda motriz del robot (utilizando, por ejemplo, codificadores de eje ópticos). El robot puede calcular a continuación su posición esperada en el entorno, dados un punto de inicio y una orientación conocidos. Un problema de esta técnica es el patinaje de las ruedas. Si se produce patinaje, el codificador de dicha rueda registra una rotación de la rueda aunque dicha rueda no está impulsando el robot con respecto al suelo. Tal como se muestra en la figura 1B, a medida que el robot 1 navega por la habitación, estos errores de patinaje de las ruedas motrices se acumulan haciendo que este tipo de sistema no sea fiable para recorridos de cualquier duración sustancial. (La trayectoria ya no consiste en líneas muy compactadas, en comparación con la cobertura determinista mostrada en la figura 1A.) El resultado de depender de la navegación por estima es una desatención sistemática insuperable; en otras palabras, quedan áreas del suelo sin limpiar.

Un ejemplo de un sistema pseudodeterminista es el robot Cyé, de Probotics. Cyé depende exclusivamente de navegación por estima y, por lo tanto, adopta medidas heroicas para maximizar el rendimiento de su sistema de navegación por estima. Cyé tiene que comenzar en una zona de registro físico instalada por el usuario en una posición conocida en la que el robot fija su posición y orientación. A continuación, Cyé mantiene un seguimiento de su posición a medida que se aleja de dicha zona. A medida que Cyé se desplaza, la incertidumbre sobre su posición y su orientación aumenta. Cyé se tiene que asegurar de volver a una zona de calibración antes de que este error crezca tanto que sea improbable localizar una zona de calibración. Si una zona de calibración es desplazada o bloqueada, o si se produce un excesivo patinaje de las ruedas, entonces Cyé se pierde (posiblemente sin saber que se ha perdido). Por lo tanto, Cyé es adecuado para su utilización solamente en entornos favorables relativamente pequeños. Se dan a conocer otros ejemplos de este enfoque en las patentes U.S.A. números 5.109.566 (Kobayashi et al.) y 6.255.793 (Peless et al.).

Otro enfoque para la limpieza robótica es el movimiento puramente aleatorio. Tal como se muestra en la figura 1C, en una típica habitación sin obstáculos, un algoritmo de movimiento aleatorio proporcionará una cobertura aceptable dado un tiempo de limpieza significativo. Comparado con un robot con un algoritmo determinista, un robot de limpieza aleatoria tiene que funcionar durante un tiempo mayor para conseguir una cobertura aceptable. Para tener un buen nivel de confianza de que el robot de movimiento aleatorio ha limpiado el 98% de una habitación sin obstáculos, el robot de movimiento aleatorio tiene que funcionar aproximadamente cinco veces el tiempo de un robot determinista con el mismo mecanismo de limpieza y moviéndose a la misma velocidad.

Las limitaciones de cobertura de un algoritmo aleatorio se pueden ver en la figura 1D. Un obstáculo 5 en la habitación puede crear el efecto de segmentar la habitación en una colección de cámaras. La cobertura con el tiempo de un robot de algoritmo aleatorio en dicha habitación es análoga a la densidad temporal de un gas liberado

5 en una cámara de volumen confinado. Inicialmente, la densidad del gas es máxima en la cámara en la que se ha liberado y mínima en las cámaras más distantes. Análogamente, es más probable que el robot limpie exhaustivamente la cámara en la que comienza, y no las cámaras más distantes, al comienzo del proceso. Dado el tiempo suficiente, el gas alcanza el equilibrio con densidad igual en todas las cámaras. Análogamente, pasado un tiempo, el robot limpiaría exhaustivamente todas las áreas. Sin embargo, las limitaciones de las fuentes de energía realistas garantizan normalmente que el robot no tendrá el tiempo suficiente para limpiar todas las áreas de un espacio lleno de obstáculos. Los inventores hacen referencia a este fenómeno como el problema de difusión del robot

10 Tal como se ha explicado, la técnica anterior disponible comercialmente no ha sido capaz de producir un algoritmo de cobertura eficaz para un área de geometría desconocida. Tal como se ha indicado anteriormente, la técnica anterior ha dependido de sistemas sofisticados de marcadores o balizas, o bien ha limitado la utilidad del robot a habitaciones con geometrías rectangulares simples. Los intentos de algoritmos de control pseudodeterministas pueden dejar áreas del espacio sistemáticamente desatendidas.

#### RESUMEN DE LA INVENCIÓN

15 Un objetivo de la presente invención es dar a conocer un robot móvil que pueda funcionar en una serie de modos para cubrir de manera efectiva un área.

Un objetivo de la presente invención es dar a conocer un robot móvil que alterne entre los modos de seguimiento de obstáculos y de rebote para garantizar la cobertura.

20 Un objetivo de la invención es dar a conocer un robot móvil que pueda monitorizar la distancia promedio entre obstáculos y utilizar la distancia promedio como entrada para alternar entre modos de funcionamiento.

Otro objetivo más de la invención es optimizar la distancia en la que el robot se desplaza en un modo de seguimiento de obstáculos en función de la frecuencia del seguimiento de obstáculos y de la anchura de trabajo del robot, y dar a conocer distancias mínima y máxima para funcionar en el modo de seguimiento de obstáculos.

25 Finalmente, un objetivo de la invención es dar a conocer uno o varios procedimientos para controlar un robot móvil que se beneficie de los diversos objetivos y ventajas dados a conocer en la presente memoria.

De acuerdo con la presente invención, se da a conocer un robot móvil que comprende:

medios de desplazamiento del robot sobre una superficie;

un sensor de detección de obstáculos; y

30 un sistema de control conectado operativamente a dicho sensor de detección de obstáculos y a dichos medios de desplazamiento.

en el que:

dicho sistema de control tiene un modo de seguimiento de obstáculos, mediante el cual dicho robot se desplaza junto a un obstáculo detectado, y un modo de cobertura de habitación, mediante el cual el robot se desplaza sustancialmente en una dirección alejándose del obstáculo;

35 dicho sistema de control está configurado para hacer funcionar el robot en uno o varios comportamientos que incluyen un comportamiento de cobertura en el que el sistema de control alterna cíclicamente entre dicho modo de seguimiento de obstáculos y dicho modo de cobertura de habitación; y

caracterizado por que:

40 dicho sistema de control puede funcionar para conmutar de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo de cobertura de habitación una vez se ha recorrido una distancia de desplazamiento mínima de aproximadamente el doble de la anchura de trabajo del robot.

En una realización, dicho sistema de control conmuta además de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo de cobertura de habitación:

después de un número aleatorio de interacciones mediante el sensor de detección de obstáculos; o

45 después de un número particular de interacciones mediante el sensor de detección de obstáculos; o

después de desplazarse una distancia aleatoria; o

después de un tiempo aleatorio; o

después de un tiempo determinado; o

después de que se produce una interacción mediante el sensor de detección de obstáculos antes de una distancia máxima; o

de acuerdo con un número particular de interacciones con obstáculos en el tiempo; o después de una rotación de más de un número particular de grados.

5 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Estas y otras características de la presente invención resultarán evidentes haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

las figuras 1A-D muestran patrones de cobertura de varios robots en la técnica anterior;

10 la figura 2 es una representación esquemática en una vista superior, de los componentes básicos de un robot móvil utilizado en una realización preferida de la invención;

la figura 3 muestra un diagrama de bloques de hardware del robot mostrado en la figura 2;

la figura 4A es un diagrama que muestra un procedimiento de determinación del ángulo en el que el robot encuentra un obstáculo; la figura 4B es un diagrama que muestra la orientación de una realización preferida del sistema de control del robot;

15 la figura 5 es una representación esquemática de los modos de funcionamiento de la presente invención;

la figura 6A es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de un comportamiento ESPIRAL; la figura 6B es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización alternativa de comportamiento ESPIRAL; la figura 6C es una representación esquemática del patrón de cobertura para otra realización alternativa de comportamiento espiral;

20 la figura 7 es una ilustración de un diagrama de flujo del algoritmo de cobertura de zona, de una realización preferida de la invención;

las figuras 8A y 8B son representaciones esquemáticas del patrón de cobertura para una realización preferida de funcionamiento en modo de seguimiento de obstáculos;

25 la figura 9A es una ilustración de un diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento de obstáculos de una realización preferida de la invención; la figura 9B es una ilustración de un diagrama de flujo de un algoritmo preferido para determinar cuándo salir del modo de seguimiento de obstáculos.

la figura 10 es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de un comportamiento de REBOTE;

30 la figura 11 es una ilustración de un diagrama de flujo del algoritmo de cobertura de habitación de una realización preferida de la invención;

las figuras 12A y 12B son ilustraciones de diagrama de flujo de un comportamiento de escape a modo de ejemplo;

35 la figura 13A es una representación esquemática del patrón de cobertura de un robot móvil con solamente un único modo de funcionamiento; la figura 13B es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de la presente invención utilizando modos de seguimiento de obstáculos y de cobertura de habitación; y

la figura 14 es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de la presente invención utilizando modos de cobertura de zona, de seguimiento de obstáculos y de cobertura de habitación.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA REALIZACIÓN PREFERIDA

40 En la presente invención, un robot móvil está diseñado para proporcionar cobertura máxima a una velocidad de cobertura eficaz en una habitación de geometría desconocida. Además, la eficacia percibida del robot se mejora mediante la inclusión de un movimiento pautado o deliberado. Adicionalmente, en una realización preferida, la cobertura eficaz requiere un sistema de control que puede impedir que el robot quede inmovilizado en un entorno desconocido.

45 Aunque las estructuras físicas de los robots móviles son conocidas en la técnica, en la presente memoria se describen los componentes de una realización preferida, a modo de ejemplo, de la presente invención. Una realización preferida de la presente invención es sustancialmente una máquina barredora robótica sustancialmente circular que contiene ciertas características. Tal como se muestra en la figura 2, por ejemplo, el robot móvil 10 de una realización preferida incluye un chasis 11 que soporta componentes mecánicos y eléctricos. Estos componentes incluyen varios sensores, que incluyen dos sensores de golpe 12 y 13 situados en la posición delantera del robot, 50 cuatro sensores de desnivel 14 situados en la carcasa 15 del robot y un sensor 16 de seguimiento de paredes

montado en la carcasa 15 del robot. En otras realizaciones, puede ser utilizado tan sólo un sensor en el robot. Un experto en la materia reconocerá que el sensor o sensores pueden ser de diversos tipos que incluyen sonar, táctil, electromagnético, capacitivo, etc. Debido a limitaciones de coste, una realización preferida de la presente invención utiliza sensores de golpe (táctiles) 12 y 13, y sensores reflectantes de proximidad por IR para los sensores de desnivel 14 y el sensor 16 de seguimiento de la pared. Se describen detalles de los sensores de IR en la solicitud de patente U.S.A. U.S.S.N. 09/768/773.

Una realización preferida del robot contiene asimismo dos ruedas 20, motores 21 para accionar independientemente las ruedas, un microcontrolador de gama baja económico 22, y una batería recargable 23 u otra fuente de potencia conocida en la técnica. Estos componentes son bien conocidos en la técnica y no se explican en detalle en la presente memoria. El dispositivo robótico de limpieza 10 incluye además uno o varios cabezales de limpieza 30. El cabezal de limpieza puede contener una aspiradora, varios cepillos, esponjas, mopas, paños electrostáticos o una combinación de diversos elementos de limpieza. La realización mostrada en la figura 2 incluye asimismo un cepillo lateral 32.

Tal como se ha mencionado anteriormente, una realización preferida de un dispositivo robótico de limpieza 10 comprende una carcasa exterior 15 que define un lado dominante, un lado no dominante y una parte frontal del robot 10. El lado dominante del robot es el lado que se mantiene cerca, o en contacto con un objeto (u obstáculo) cuando el robot limpia el área adyacente a dicho objeto (u obstáculo). En una realización preferida, tal como se muestra en la figura 1, el lado dominante del robot 10 es el lado derecho con respecto a la dirección principal de desplazamiento, aunque en otras realizaciones el lado dominante puede ser el lado izquierdo. En otras realizaciones, el robot puede ser simétrico y por ello no necesita un lado dominante; sin embargo, en una realización preferida, se elige un lado dominante por razones de coste. La dirección principal de desplazamiento se muestra en la figura 2 mediante la flecha 40.

En una realización preferida, dos sensores de golpe 12 y 13 están situados delante de las ruedas 20 con respecto a la dirección de movimiento de avance, mostrada por la flecha 40. Un sensor de golpe 13 está situado en el lado dominante del robot 10 y el otro sensor de golpe 12 está situado en el lado no dominante del robot 10. Cuando estos dos sensores de golpe 12 y 13 se activan simultáneamente, el robot 10 reconoce un obstáculo en la posición frontal. En otras realizaciones, se pueden utilizar más o menos sensores de golpe individuales. Análogamente, se puede utilizar cualquier número de sensores de golpe para dividir el dispositivo en una serie de segmentos radiales. Aunque en una realización preferida los sensores de golpe 12 y 13 son sensores IR de rotura del haz activados por contacto entre el robot 10 y un obstáculo, se pueden utilizar otros tipos de sensores, incluyendo conmutadores mecánicos y sensores capacitivos que detectan la capacidad de los objetos que hacen contacto con el robot o entre dos placas metálicas en el paragolpes, que se comprimen por contacto. Se pueden utilizar asimismo sensores sin contacto, que permiten que el robot detecte la proximidad a objetos sin tocar físicamente el objeto, tal como sensores capacitivos o una cortina de luz IR.

Es útil tener uno o varios sensores que puedan no sólo indicar si se ha producido (o está próximo) el contacto con una superficie, sino asimismo el ángulo en el que se realiza el contacto con respecto al robot. En el caso de una realización preferida, el robot puede calcular el tiempo entre la activación de los conmutadores derecho e izquierdo de golpe 12 y 13, si ambos se han activado. El robot puede a continuación estimar el ángulo en el que se ha realizado el contacto. En una realización preferida mostrada en la figura 4A, el sensor de golpe comprende un único paragolpes mecánico 44 en la parte frontal del robot, con sensores 42 y 43 sustancialmente en los dos extremos del paragolpes, que detectan el movimiento del paragolpes. Cuando el paragolpes se comprime, se utiliza el tiempo entre los eventos de sensor para calcular el ángulo aproximado en el que el robot contactó con el obstáculo. Cuando el paragolpes se comprime desde el lado derecho, el sensor de golpe derecho detecta el primer golpe, seguido por el sensor de golpe izquierdo, debido a la elasticidad del paragolpes y a la geometría del detector de golpes. De este modo, el ángulo del golpe se puede aproximar con solamente dos sensores de golpe.

Por ejemplo, en la figura 4A, los sensores de golpe 42 y 43 pueden dividir la posición delantera del robot en seis zonas (I-VI). Cuando se activa un sensor de golpe, el robot calcula el tiempo antes de que se active (si lo hace) el otro sensor. Por ejemplo, cuando se activa el sensor de golpe derecho 43, el robot mide el tiempo (t) antes de que se active el sensor de golpe izquierdo 42. Si t es menor que  $t_1$ , entonces el robot asume que el contacto se ha producido en la zona IV. Si t es mayor o igual que  $t_1$  y menor que  $t_2$ , entonces el robot asume que el contacto se ha realizado en la zona V. Si t es mayor o igual que  $t_2$  (incluyendo el caso en que el sensor de golpe izquierdo 42 no se activa dentro del tiempo monitorizado), entonces el robot asume que el contacto se ha producido en la zona VI. Si los sensores de golpe se activan simultáneamente, el robot asume que el contacto ha sido frontal. El procedimiento puede ser utilizado para dividir el paragolpes en un gran número arbitrario de zonas (para mayor precisión), en función de la temporización utilizada y de la geometría del paragolpes. Como una extensión, se pueden utilizar tres sensores para calcular el ángulo del golpe en tres dimensiones en lugar de sólo en dos dimensiones tal como en el ejemplo anterior.

Una realización preferida contiene asimismo un sensor 16 de seguimiento de la pared o de detección de pared montado en el lado dominante del robot 10. En una realización preferida, el sensor de seguimiento de la pared es un sensor IR compuesto de un par colimado de emisor y receptor, de tal modo que se produce un volumen finito de intersección en la posición esperada de la pared. Este punto focal está aproximadamente tres pulgadas por delante

de la rueda motriz en la dirección del movimiento de avance del robot. El alcance radial de detección de la pared es de aproximadamente 0,75 pulgadas.

Una realización preferida contiene asimismo cualquier cantidad de sensores de desnivel IR 14 que impiden que el dispositivo caiga por escaleras u otros cortes verticales. Estos sensores de desnivel son una construcción similar a la del sensor de seguimiento de la pared, pero dirigida a observar el suelo en lugar de la pared. Como una medida adicional de seguridad y detección, el robot 10 incluye un sensor de rueda suspendida que puede detectar si una o varias ruedas no están soportadas por el suelo. Por lo tanto, el sensor de rueda suspendida puede detectar no sólo desniveles sino asimismo diversos obstáculos sobre los que el robot se puede conducir, tal como bases de lámparas, transiciones altas de suelos, pilas de cables, etc.

Otras realizaciones pueden utilizar otros sensores conocidos o combinaciones de sensores conocidos.

La figura 3 muestra un diagrama de bloques de hardware del controlador y el robot de una realización preferida de la invención. En una realización preferida, se utiliza un procesador de la serie Winbond W78XXX. Se trata de un microcontrolador compatible con la familia MCS-51 con 36 puertos E/S de propósito general, 256 octetos de RAM y 16K de ROM. Está temporizado a 40 MHz que se dividen para una velocidad de procesador de 3,3 MHz. Tiene dos temporizadores que se utilizan para desencadenar interrupciones utilizadas para procesar sensores y generar señales de salida así como un temporizador de vigilancia. Los bits más bajos del temporizador rápido se utilizan asimismo como números aleatorios aproximados cuando se requiere en los comportamientos. Hay asimismo dos interruptores externos que se utilizan para capturar las entradas al codificador procedentes de las dos ruedas motrices. El procesador tiene asimismo un DART que se utiliza para verificar y depurar el programa de control del robot.

Los puertos de E/S del microprocesador están conectados a los sensores y a los motores del robot y son la interfaz que los conectan al estado interno del robot y a su entorno. Por ejemplo, los sensores de rueda suspendida están conectados a un puerto de entrada y la señal PWM del motor del cepillo se genera en un puerto de salida. La ROM del microprocesador se utiliza para almacenar el programa de cobertura y control para el robot. Esto incluye los comportamientos (explicados a continuación), los algoritmos de procesamiento de los sensores y la generación de señales. La RAM se utiliza para almacenar el estado activo del robot, tal como la distancia promedio de golpe, el tiempo de servicio y la distancia, y el ID del comportamiento en control y sus comandos de motor actuales.

Con el propósito de comprender el movimiento del dispositivo robótico, la figura 4B muestra la orientación del robot 10 centrado en torno a los ejes x e y en un plano de coordenadas; este sistema de coordenadas está unido al robot. El movimiento direccional del robot 10 se puede entender como el radio al que se moverá al robot 10. Para apartarse rápidamente de la pared 100, el robot 10 debería ajustar un valor pequeño positivo de  $r$  ( $r_3$  en la figura 4B); para volverse rápidamente hacia la pared, el robot debería ajustar un valor pequeño negativo de  $r$  ( $r_1$  en la figura 4B). Por otra parte, para realizar giros moderados, el robot debería ajustar valores absolutos mayores para  $r$  -valores positivos para moverse hacia la izquierda (es decir, alejándose de la pared,  $r_4$  en la figura 4B) y valores negativos para moverse hacia la derecha (es decir hacia la pared,  $r_2$  en la figura 4B). Este esquema de coordenadas se utiliza en los ejemplos de control explicados a continuación. El microcontrolador 22 que controla la velocidad diferencial a la que se hacen funcionar los motores 21 de las ruedas individuales determina el radio de giro.

Asimismo, en ciertas realizaciones, el robot puede incluir una o varias entradas de usuario. Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 2, una realización preferida incluye tres botones simples 33 que permiten al usuario introducir el tamaño aproximado de la superficie que hay que cubrir. En una realización preferida, estos botones identificados como "pequeña", "media", y "grande" corresponden respectivamente a habitaciones de 11,1, 20,8 y 27,9 metros cuadrados.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el robot a modo de ejemplo es una realización preferida para practicar la presente invención, y un experto en la materia puede elegir entre elementos conocidos en la técnica para diseñar un robot para un propósito particular. Ejemplos de diseños adecuados incluyen los descritos en las siguientes patentes U.S.A.: 4.306.329 (Yokoi), 5.109.566 (Kobayashi et al.), 5.293.955 (Lee), 5.369.347 (Yoo), 5.440.216 (Kim), 5.534.762 (Kim), 5.613.261 (Kawakami et al), 5.634.237 (Paranjpe), 5.781.960 (Kilstrom et al.), 5.787.545 (Colens), 5.815.880 (Nakanishi), 5.839.156 (Park et al.), 5.926.909 (McGee), 6.038.501 (Kawakami) y 6.076.226 (Reed).

La figura 5 muestra una representación simple de bloques de los diversos modos de funcionamiento de un dispositivo. En una realización preferida, y solamente a modo de ejemplo, los modos de funcionamiento pueden incluir limpieza de zonas (donde el usuario o el robot designa una zona específica para limpieza), limpieza de bordes y limpieza de la habitación. Cada modo de funcionamiento comprende combinaciones complejas de instrucciones y/o comportamientos internos, explicados a continuación. Sin embargo, éstas complejidades permanecen generalmente ocultas al usuario. En una realización, el usuario puede seleccionar el modo de funcionamiento particular utilizando un elemento de entrada, por ejemplo, un conmutador selector o un pulsador. En otras realizaciones preferidas, tal como se describe a continuación, el robot puede alternar cíclicamente de manera autónoma a través de los modos de funcionamiento.

El robot de cobertura de la presente invención utiliza estos diversos modos de funcionamiento para cubrir de manera efectiva el área. Aunque un experto en la materia puede implementar estos diversos modos de funcionamiento en

diversas arquitecturas conocidas, una realización preferida se basa en el control del comportamiento. En este caso, los comportamientos son simplemente capas de sistemas de control que se ejecutan en paralelo en su totalidad. El microcontrolador 22 ejecuta entonces un esquema de arbitraje priorizado para resolver el comportamiento dominante para un escenario determinado. Se puede encontrar una descripción del control del comportamiento en "Mobile Robots", más arriba, cuyo texto se incorpora como referencia a la presente memoria.

En otras palabras, en una realización preferida, el microprocesador y el software de control del robot ejecutan simultáneamente una serie de comportamientos. En función de la situación, el control del robot se asignará a uno o varios comportamientos distintos. Con el propósito de detallar el funcionamiento preferido de la presente invención, los comportamientos se describirán como (1) comportamientos de cobertura, (2) comportamientos de escape o (3) comportamientos de usuario/seguridad. Los comportamientos de cobertura están indicados principalmente para permitir que el robot lleve a cabo su operación de cobertura de manera eficiente. Los comportamientos de escape son comportamientos especiales que reciben prioridad cuando una o varias entradas de sensor sugieren que el robot puede no estar funcionando libremente. Por convenio para esta descripción, los comportamientos explicados a continuación se escriben en letras mayúsculas.

### 1. Comportamientos de cobertura

Las figuras 6 a 14 muestran detalles de cada uno de los modos de funcionamiento preferidos: cobertura de zona, seguimiento de paredes (o seguimiento de obstáculos) y cobertura de habitaciones.

Modo de funcionamiento: cobertura de zona

La cobertura de zona o, por ejemplo, limpieza de zona permite al usuario limpiar un área sucia aislada. El usuario sitúa el robot 10 en el suelo cerca del centro del área que requiere limpieza y selecciona el modo de funcionamiento de limpieza de zona. El robot se mueve a continuación de tal modo que el área inmediata en el interior de, por ejemplo, un radio definido, se pone en contacto con el cabezal de limpieza 30 o con el cepillo lateral 32 del robot.

En una realización preferida, el procedimiento para conseguir una limpieza de zona es un algoritmo de control que proporciona un movimiento espiral hacia el exterior, o comportamiento ESPIRAL, tal como se muestra en la figura 6A. En general, el movimiento espiral se genera aumentando el radio de giro en función del tiempo. En una realización preferida, el robot 10 inicia su espiral en sentido antihorario, marcada en la figura 6A por la línea de movimiento 45, para mantener el lado dominante en el borde de ataque exterior de la espiral. En otra realización, mostrada en la figura 6B, el movimiento espiral del robot 10 se genera hacia dentro de tal modo que el radio de giro disminuye continuamente. La espiral hacia dentro se muestra como la línea de movimiento 45 en la figura 6B. Sin embargo, no es necesario mantener el lado dominante del robot hacia fuera durante el movimiento espiral.

El procedimiento de limpieza de zona utilizado en una realización preferida - espiral hacia fuera -se expone en la figura 7. Una vez se ha iniciado la espiral (etapa 201) y el valor de  $r$  se ajusta a su mínimo valor positivo (que producirá el giro antihorario más cerrado posible), el comportamiento espiral recalcula el valor de  $r$  en función de  $\theta$ , donde  $\theta$  representa el giro angular desde el inicio del comportamiento espiral (etapa 210). Utilizando la ecuación  $r = a\theta$ , donde  $a$  es un coeficiente constante, se puede controlar el grado de cierre o el solape deseado de la espiral. (Se debe observar que  $\theta$  no está normalizado a  $2\pi$ ). El valor de  $a$  se puede elegir mediante la ecuación  $a = d/2\pi$ ; donde  $d$  es la distancia entre dos pasos consecutivos de la espiral. Para una limpieza eficaz, se debería elegir un valor  $d$  que sea menor que la anchura del mecanismo de limpieza 30. En una realización preferida, se selecciona un valor de  $d$  que esté entre la mitad y dos tercios de la anchura del cabezal de limpieza 30.

En otras realizaciones, el robot monitoriza su distancia total recorrida en modo espiral. Debido a que la espiral se deteriorará después de cierta distancia, es decir, el centro del movimiento espiral tenderá a derivar con el tiempo debido a un patinaje de las ruedas dependiente de la superficie y/o a errores en el algoritmo de aproximación espiral y en la precisión del cálculo. En ciertas realizaciones, el robot puede salir del modo espiral después de que se ha desplazado una distancia específica ("distancia espiral máxima"), tal como 6,3 ó 18,5 metros (etapa 240). En una realización preferida, el robot utiliza múltiples distancias espirales máximas en función de si el robot está realizando una espiral inicial o una espiral posterior. Si se alcanza la distancia espiral máxima sin un golpe, el robot proporciona el control a un comportamiento diferente, y el robot, por ejemplo, continúa entonces moviéndose en una línea fundamentalmente recta. (En una realización preferida, un comportamiento de LÍNEA RECTA es un comportamiento por defecto, de baja prioridad, que impulsa el robot en una línea aproximadamente recta a una velocidad predeterminada de aproximadamente 0,306 m/s cuando no están activos otros comportamientos.

En modo espiral, se pueden adoptar diversas acciones cuando se encuentra un obstáculo. Por ejemplo, el robot podría (a) intentar evitar el obstáculo y continuar la espiral en el sentido antihorario, (b) intentar evitar el obstáculo y continuar la espiral en el sentido opuesto (por ejemplo, cambiando de antihorario a horario) o cambiar modos de funcionamiento. Continuar la espiral en el sentido opuesto se conoce como espiral reflectante y se representa en la figura 6C, donde el robot 10 invierte su trayectoria de movimiento 45 cuando entra en contacto con el obstáculo 101. En una realización preferida, que se detalla en la etapa 220, el robot 10 sale del modo de limpieza de zona tras el primer encuentro del sensor de golpe 12 ó 13 con un obstáculo.

Si bien una realización preferida describe un movimiento espiral para la cobertura de zona, se puede utilizar cualquier área auto-limitada, incluyendo de forma no limitativa formas de polígonos regulares tales como cuadrados, hexágonos, elipses, etc.

Modo de funcionamiento: seguimiento de paredes/obstáculos

- 5 El seguimiento de la pared o, en el caso de un robot de limpieza, la limpieza de bordes, permite al usuario limpiar solamente los bordes de una habitación o los bordes de objetos en el interior de una habitación. El usuario sitúa el robot 10 en el suelo cerca de un borde que hay que limpiar y selecciona el modo de funcionamiento de limpieza de bordes. El robot 10 se mueve a continuación de tal modo que sigue el borde y limpia las áreas que entran en contacto con el cabezal de limpieza 30 del robot.
- 10 El movimiento del robot 10 en una habitación 110 se muestra en la figura 8. En la figura 8A, el robot 10 se sitúa junto a la pared 100, con el lado dominante del robot contiguo a la pared. A continuación, el robot discurre indefinidamente a lo largo de la pared siguiendo la trayectoria de movimiento 46. Análogamente, en la figura 8B, el robot 10 se sitúa en la proximidad de un obstáculo 101. A continuación, el robot sigue indefinidamente el borde del obstáculo 101 siguiendo la trayectoria de movimiento 47.
- 15 En una realización preferida, en el modo de seguimiento de la pared, el robot utiliza el sensor 16 de seguimiento de la pared para situarse a una distancia establecida respecto de la pared. A continuación, el robot pasa a desplazarse a lo largo del perímetro de la pared. Tal como se muestra en las figuras 8A y 8B, en una realización preferida, el robot 10 no puede distinguir entre una pared 100 y otro obstáculo sólido 101.
- 20 El procedimiento utilizado en una realización preferida para seguir la pared se detalla en la figura 9A y proporciona una operación de seguimiento de la pared suave incluso con un sensor de un bit. (En este caso, un sensor de un bit detecta solamente la presencia o ausencia de la pared dentro de un volumen particular, en lugar de la distancia entre la pared y el sensor.) Pueden ser utilizados otros procedimientos de detección de una pared u objeto, tal como detección de golpes o sensores sonar.
- 25 Una vez se ha iniciado (etapa 301) el modo de funcionamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED, o el comportamiento de seguimiento de la pared de una realización preferida, el robot ajusta en primer lugar su valor inicial de dirección a  $r_0$ . El comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED inicia a continuación la rutina de emisión-detección en el sensor 16 seguidor de la pared (etapa 310). La existencia de una reflexión para la parte del transmisor IR del sensor 16 se traduce en la existencia de un objeto dentro de una distancia predeterminada desde el sensor 16. El comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED determina a continuación si ha habido una transición de reflexión (objeto dentro del alcance) a no reflexión (objeto fuera del alcance) (etapa 320). Si se ha producido una transición (en otras palabras, la pared está ahora fuera del alcance), el valor de  $r$  se ajusta a su valor más negativo y el robot girará ligeramente a la derecha (etapa 325). El robot comienza de nuevo la secuencia de emisión-detección (etapa 310). Si no ha habido una transición de reflexión a no reflexión, el comportamiento de seguimiento de la pared determina a continuación si ha habido una transición de no reflexión a reflexión (etapa 330).
- 30 Si se ha producido dicha transición, el valor de  $r$  se ajusta a su valor más positivo y el robot girará levemente a la izquierda (etapa 335).
- 35 En ausencia de ambos tipos de evento de transición, el comportamiento de seguimiento de la pared reduce el valor absoluto de  $r$  (etapa 340) e inicia de nuevo la secuencia de emisión-detección (etapa 310). Al disminuir el valor absoluto de  $r$ , el robot 10 comienza a girar de manera más cerrada cualquiera que sea la dirección actual del rumbo.
- 40 En una realización preferida, la velocidad de disminución del valor absoluto de  $r$  es una velocidad constante dependiente de la distancia recorrida.
- 45 El modo seguidor de pared puede proseguir durante un tiempo predeterminado o aleatorio, una distancia predeterminada o aleatoria, o hasta que se cumplan algunos criterios adicionales (por ejemplo, se activa el sensor de golpe, etc.). En una realización, el robot se mantiene indefinidamente siguiendo la pared. En una realización preferida, tal como se muestra en las figuras 8C y 8D, se determinan distancias mínima y máxima de desplazamiento, con lo que el robot permanecerá en comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED hasta que el robot se haya desplazado la distancia máxima (figura 8D) o bien se haya desplazado por lo menos la distancia mínima y haya encontrado un obstáculo (figura 8C). Esta implementación del comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED garantiza que el robot pasa una cantidad de tiempo adecuada en comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED en comparación con sus otros modos de funcionamiento, disminuyendo de ese modo la desatención sistemática y distribuyendo la cobertura a todas las áreas. Aumentando el seguimiento de la pared el robot se puede mover en más espacios pero es menos eficiente limpiando cualquier espacio. Además, tendiendo a salir del comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED después de la detección de un obstáculo, el robot aumenta su eficacia percibida.
- 50 La figura 9B es una ilustración de diagrama de flujo que muestra esta realización de determinar cuándo salir del comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED. El robot determina en primer lugar la distancia mínima que debe seguir la pared ( $d_{min}$ ) y la distancia máxima que debe seguir la pared ( $d_{max}$ ). Estando en un modo de seguimiento de la pared (o de un obstáculo), el sistema de control monitoriza la distancia que el robot ha recorrido en dicho modo ( $d_{WF}$ ). Si  $d_{WF}$  es mayor que  $d_{max}$  (etapa 350), entonces el robot sale del modo de seguimiento de la pared (etapa

380). Sin embargo, si  $d_{WF}$  es menor que  $d_{max}$  (etapa 350), y  $d_{WF}$  es menor que  $d_{max}$  (etapa 360), el robot permanece en el modo de seguimiento de la pared (etapa 385). Si  $d_{WF}$  es mayor que  $d_{min}$  (etapa 360) y se encuentra un obstáculo (etapa 370), el robot sale del modo de seguimiento de la pared (etapa 380).

5 Teóricamente, la distancia óptima para que el robot se desplace en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED es función del tamaño de la habitación y de la configuración y el tamaño del robot. En una realización preferida, las distancias mínima y máxima para permanecer en el SEGUIMIENTO DE LA PARED se ajustan en base al tamaño aproximado de la habitación, a la anchura del robot y a un componente aleatorio, por lo que la distancia de desplazamiento mínima promedio es  $2w/p$ , donde  $w$  es la anchura del elemento de trabajo del robot y  $p$  es la probabilidad de que el robot entre en el comportamiento de seguimiento de la pared en una determinada interacción con un obstáculo. A modo de ejemplo, en una realización preferida,  $w$  está aproximadamente entre 15 cm y 25 cm, y  $p$  es 0,09 5 (donde el robot encuentra de 6 a 15 obstáculos, o un promedio de 10,5 obstáculos, antes de entrar en el modo de seguimiento de obstáculos). La distancia mínima se ajusta entonces aleatoriamente como una distancia entre aproximadamente 115 cm y 350 cm; la distancia máxima se ajusta entonces aleatoriamente como una distancia entre aproximadamente 170 cm y 520 cm. En ciertas realizaciones, la relación entre la distancia mínima y la distancia máxima es de 2:3. En beneficio de la eficiencia percibida, el funcionamiento inicial del robot en modo de seguimiento de obstáculos se puede ajustar para que sea más largo que sus operaciones posteriores en el modo de seguimiento de obstáculos. Además, los usuarios pueden situar el robot a lo largo de la pared más larga cuando arrancan el robot, lo que mejora tanto la cobertura real como la percibida.

20 La distancia que el robot se desplaza en el modo de seguimiento de la pared puede ser asimismo ajustada por el robot en función del número y de la frecuencia de los objetos encontrados (que se determina mediante otros sensores), que es una medida del "desorden" de la habitación. Si se encuentran más objetos, el robot seguiría la pared durante una distancia mayor para acceder a todas las áreas del suelo. A la inversa, si se encuentran pocos obstáculos, el robot seguiría menos la pared para no cubrir en exceso los bordes del espacio en beneficio de los pases a través del centro del espacio. Se puede incluir asimismo una distancia inicial de seguimiento de la pared para permitir que el robot siga la pared durante una distancia mayor o menor durante su periodo inicial, cuando el comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED tiene el control.

En una realización preferida, el robot puede salir asimismo del modo de seguimiento de la pared si el robot gira, por ejemplo, más de 270 grados y no puede localizar la pared (o el objeto) o si el robot ha girado un total de 360 grados desde que entró en el modo de seguimiento de la pared.

30 En ciertas realizaciones, cuando el comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED está activo y se produce un golpe, se activa el comportamiento de ALINEAR. El comportamiento de ALINEAR gira el robot en sentido antihorario para alinear el robot con la pared. El robot gira siempre un ángulo mínimo para evitar que el robot entre en ciclos de muchos giros pequeños. Después de que ha girado en su ángulo mínimo, el robot monitoriza su sensor de pared y, si detecta una pared y a continuación la detección de la pared desaparece, el robot deja de girar. Esto se debe a que, en el extremo del alcance del seguidor de la pared, el robot está bien alineado para comenzar el SEGUIMIENTO DE LA PARED. Si cuando alcanza su ángulo máximo el robot no ha comprobado que su detector de pared se encienda y se apague, se detiene en cualquier caso. Esto impide que el robot de vueltas en círculos cuando la pared está fuera del alcance de su sensor de pared. Cuando el golpe más reciente está dentro de 60 grados laterales del paracolpes en el lado dominante, el ángulo mínimo se ajusta a 14 grados y el ángulo máximo es de 19 grados. De lo contrario, si el golpe está dentro de 30 grados respecto del frontal del paracolpes en el lado dominante o en el lado no dominante, el ángulo mínimo es de 20 grados y el ángulo máximo es de 44 grados. Cuando el comportamiento de ALINEAR ha completado el giro, cede el control al comportamiento de SEGUIMIENTO DE LA PARED.

Modo de funcionamiento: cobertura de habitación

45 El tercer modo de funcionamiento se denomina en este caso cobertura de habitación o modo de limpieza de habitación, que permite al usuario limpiar cualquier área delimitada por paredes, escaleras, obstáculos u otras barreras. Para ejercitar esta opción, el usuario sitúa el robot en el suelo y selecciona el modo de limpieza de habitación. El robot se mueve a continuación por la habitación limpiando todas las áreas que puede alcanzar.

50 En una realización preferida, el procedimiento de ejecución del comportamiento de limpieza de la habitación es un comportamiento de REBOTE en combinación con el comportamiento de LÍNEA RECTA. Tal como se muestra en la figura 10, el robot 10 se desplaza hasta que un sensor de golpe 12 y/o 13 es activado por el contacto con un obstáculo 101 o una pared 100. A continuación, el robot 10 gira y se sigue desplazando. Se presenta una muestra de trayectoria de movimiento en la figura 11 como la línea 48.

55 El algoritmo para el comportamiento de rebote aleatorio se expone en la figura 10. El robot 10 continúa su movimiento de avance (etapa 401) hasta que se activa (etapa 410) un sensor de golpe 12 y/o 13. El robot 10 calcula a continuación un intervalo aceptable de nuevas direcciones en base a una determinación de qué sensor o sensores de golpe se han activado (etapa 420). A continuación se realiza una determinación con algún cálculo aleatorio para elegir el nuevo rumbo dentro de un intervalo aceptable, tal como de 90 a 270 grados con respecto al objeto que ha encontrado el robot. El ángulo del objeto que ha golpeado el robot se determina según se ha descrito anteriormente utilizando el tiempo entre los sensores de golpe derecho e izquierdo. El robot gira a continuación a su nuevo rumbo.

60

En una realización preferida, el giro es horario o bien antihorario en función de qué dirección necesita el último movimiento para conseguir el nuevo rumbo. En otras realizaciones, el giro está acompañado por un movimiento de avance para aumentar la eficiencia de cobertura del robot.

5 La estadística de la elección del rumbo realizada por el robot se puede distribuir uniformemente a través de todos los rumbos permitidos, es decir, hay una oportunidad equivalente para cada rumbo comprendido en el intervalo aceptable. Alternativamente, se pueden elegir estadísticas basadas en una distribución gaussiana u otras, diseñadas para conducir de manera preferente el robot perpendicularmente alejándose de una pared.

10 En otras realizaciones, el robot podría cambiar las direcciones en momentos aleatorios o predeterminados y no en base a la actividad de los sensores externos. Alternativamente, el robot podría realizar continuamente pequeñas correcciones angulares en base a sensores de largo alcance, para evitar incluso contactar con un objeto y, de ese modo, cubrir el área superficial con trayectorias curvas.

En una realización preferida, el robot permanece en el modo de limpieza de habitación hasta que se alcanza un cierto número de interacciones de rebote, normalmente entre 6 y 13.

## 2. Comportamientos de escape

15 Existen varias situaciones que el robot se puede encontrar mientras intenta cubrir un área, que dificultan o impiden que cubra eficientemente toda el área. Una clase general de sensores y comportamientos denominados comportamientos de escape están diseñados para sacar el robot de estas situaciones, o en casos extremos para apagar el robot si éste determina que no puede escapar. Para decidir si proporcionar una prioridad de comportamiento de escape entre los diversos comportamientos del robot, el robot determina lo siguiente: (1) es un comportamiento de escape necesario; (2) en caso afirmativo, ¿qué comportamiento de escape está justificado?

20 A modo de ejemplo, las siguientes situaciones muestran situaciones en las que se requiere un comportamiento de escape para un robot de limpieza interior, y la ejecución de un comportamiento apropiado:

25 (i) Situación 1. El robot detecta una situación en la que se puede atascar -por ejemplo, una zona elevada en una alfombra o cerca de la base de una lámpara que actúa como una rampa para el robot. El robot lleva a cabo comportamientos de "pánico" de pequeños giros para salir de la situación;

(ii) Situación 2. El robot está físicamente atascado -por ejemplo, el robot está atrapado bajo un sofá o contra una pared, enredado en cables o en flecos de alfombra, o atascado en una pila de cables eléctricos con sus ruedas girando en vacío. El robot lleva a cabo comportamientos de giro grande de pánico y apaga los motores pertinentes para escapar de la obstrucción;

30 (iii) Situación 3. El robot está en un área confinada, pequeña -por ejemplo, el robot está entre las patas de una silla o en el área abierta bajo una cómoda, o en un área pequeña creada al colocar una lámpara cerca de la esquina de una habitación. El borde del robot sigue utilizando su paragolpes y/o lleva a cabo comportamientos de giro de pánico para escapar del área; y

35 (iv) Situación 4. El robot ha quedado atascado y no se puede liberar por sí mismo -por ejemplo, el robot está en uno de los casos de la categoría (ii) anterior y no ha sido capaz de liberarse por sí mismo con ninguno de sus comportamientos de pánico. En este caso, el robot detiene el funcionamiento y lo señala al usuario en busca de ayuda. Esto preserva la duración de la batería e impide daños en el suelo o el mobiliario.

Para detectar la necesidad de cada situación de escape, se utilizan diversos sensores. Por ejemplo:

40 (i) Situación 1. (a) Cuando la corriente del cepillo o del cepillo lateral aumenta por encima de un umbral, se reduce la tensión aplicada al motor pertinente. Siempre que esto ocurre, se incrementa una variable de índice de parada. Cuando la corriente está por debajo del umbral, se reduce el índice de parada. Si el nivel de parada aumenta por encima de un umbral bajo y la pendiente del índice es positiva, el robot lleva a cabo comportamientos de giro pequeño de pánico cuando el nivel ha vuelto a cero y ha aumentado de nuevo hasta el umbral. (b) Análogamente, hay un nivel variable de rueda suspendida que se incrementa cuando se detecta un evento de rueda suspendida y se reduce constantemente con el tiempo. Cuando se detecta un evento de rueda suspendida y el nivel de rueda suspendida está por encima de un umbral (lo que significa que se han producido recientemente varias ruedas suspendidas), el robot lleva a cabo comportamientos de giro pequeño de pánico o grande en función del nivel de rueda suspendida.

50 (ii) Situación 2. (a) Cuando el índice de parada del cepillo aumenta por encima de un umbral alto y la pendiente es positiva, el robot apaga el cepillo durante 13 segundos y lleva a cabo comportamientos de giro grande de pánico en 1, 3 y 7 segundos. Al término de los 13 segundos, el cepillo se vuelve a encender. (b) Cuando el índice de parada de tracción aumenta por encima de un umbral medio y la pendiente es positiva, el robot lleva a cabo continuamente comportamientos de giro grande de pánico. (c) Cuando el índice de parada de tracción aumenta por encima de un umbral alto, el robot apaga todos los motores durante 15 segundos. Al término de los 15 segundos, los motores se vuelven a encender. (d) Cuando el paragolpes del

5 robot está presionado constantemente durante 5 segundos (tal como en una situación de bloqueo lateral), el robot lleva a cabo un comportamiento de giro grande de pánico. Éste repite el comportamiento de giro de pánico cada 5 segundos hasta que se libera el paragolpes. (e) Cuando el robot no ha recibido golpes durante una distancia de 6,096 m (20 pies), asume que puede estar atascado con sus ruedas girando en vacío. Para liberarse, realiza una espiral. Si sigue sin recibir ningún golpe durante 3,048m (10 pies) después del término de la espiral, lleva a cabo un comportamiento de giro grande de pánico. Sigue haciéndolo cada 3,048m (10 pies) hasta que recibe un golpe.

10 (iii) Situación 3. (a) Cuando la distancia promedio entre golpes cae por debajo de un umbral bajo, el robot lleva a cabo seguimiento de bordes utilizando su paragolpes para intentar escapar del área confinada. (b) Cuando la distancia promedio entre golpes cae por debajo de un umbral muy bajo, el robot lleva a cabo comportamientos de giro grande de pánico para orientarse de tal modo que pueda escapar mejor del área confinada.

15 (iv) Situación 4. (a) Cuando el cepillo se ha parado y ha sido apagado varias veces recientemente, y el índice de parada del cepillo es alto y la pendiente es positiva, el robot se apaga. (b) Cuando la tracción se ha parado y los motores se han apagado recientemente varias veces y el índice de parada de tracción es alto y la pendiente es positiva, el robot se apaga. (c) Cuando alguna de las ruedas está suspendida continuamente durante más de 2 segundos, el robot se apaga. (d) Cuando se producen muchos eventos de rueda suspendida en un tiempo corto, el robot se apaga. (e) Cuando alguno de los sensores de desnivel detecta un desnivel continuamente durante 10 segundos, el robot se apaga. (1) Cuando el sensor de golpe está presionado constantemente durante una cierta cantidad de tiempo, por ejemplo 10 segundos, es probable que el robot esté encajado, y el robot se apaga.

25 A modo de ejemplo descriptivo, las figuras 12A y 12B muestran el análisis utilizado en una realización preferida para identificar la necesidad de un comportamiento de escape con respecto a un motor de cepillo parado, tal como se ha descrito anteriormente en las situaciones 1, 2 y 4. Cada vez que la corriente del cepillo excede un límite determinado para el motor del cepillo (etapa 402), un registro del índice se aumenta en 1 (etapa 404); si no se excede el límite, el registro del índice se reduce en 1 (etapa 406). Un registro de pendiente independiente almacena los valores recientes durante un periodo de tiempo reciente, tal como 120 ciclos. Si el índice está por encima de 600 (donde 600 corresponde a un segundo de parada constante) (etapa 414) y la pendiente es positiva (etapa 416), entonces el robot ejecutará un comportamiento de escape (etapa 420) si el comportamiento de escape está activado (etapa 418). Los comportamientos de escape se desactivan después de la ejecución (etapa 428) hasta que el índice ha vuelto a cero (etapa 422), se reactivan (etapa 424) y aumentan de nuevo a 600. Esto se realiza para evitar que el comportamiento de escape se desencadene constantemente en índices por encima de 600.

35 Sin embargo, si el índice está por encima de 2400 (etapa 410) y la pendiente es positiva (etapa 412), el robot ejecutará un conjunto especial de comportamientos de escape, mostrados en la figura 12B. En una realización preferida, el motor del cepillo se apagará (etapa 430), el "nivel" se incrementa en una cantidad predeterminada (de 50 a 90) (etapa 430), se ajusta el tiempo de parada (etapa 430) y se lleva a cabo un comportamiento de pánico (etapa 452) en 1 segundo (etapa 445), 4 segundos (etapa 450) y 7 segundos (etapa 455) desde que se apagó el cepillo. El sistema de control reinicia a continuación el cepillo en 13 segundos (etapas 440 y 442). El nivel se reduce en 1 cada segundo (etapas 444). Si el nivel alcanza un umbral máximo (etapa 435), el robot detiene todo funcionamiento (etapa 437). Además, el robot puede adoptar acciones adicionales cuando se detectan ciertas paradas, tal como limitar la tensión al motor para impedir daños al motor.

Una realización preferida del robot tiene cuatro comportamientos de escape: GIRO, BORDE, RUEDA SUSPENDIDA y REDUCCIÓN.

45 GIRO. El robot gira en posición a una dirección aleatoria, empezando a una velocidad mayor (aproximadamente el doble de su velocidad de giro normal) y disminuyendo hasta una velocidad menor (aproximadamente la mitad de su velocidad de giro normal). Variar la velocidad puede ayudar a que el robot escape de diversas situaciones. El ángulo que el robot debería girar puede ser aleatorio o una función del grado de escape requerido, o ambos. En una realización preferida, en situaciones de pánico reducido el robot realiza cualquier giro entre 45 y 90 grados, y en situaciones de pánico elevado el robot realiza cualquier giro entre 90 y 270 grados.

50 BORDE. El robot sigue el borde utilizando su sensor de golpe hasta que (a) el robot gira 60 grados sin un golpe o (b) el robot ha girado acumulativamente más de 170 grados desde que se inició el comportamiento de BORDE. El comportamiento de BORDE puede ser útil si la distancia de golpe promedio es baja (pero no tanto que provoque un comportamiento de pánico). El comportamiento de BORDE permite al robot caber a través de las mínimas aberturas físicamente posibles para el robot y por lo tanto puede permitir que el robot escape de áreas confinadas.

55 RUEDA SUSPENDIDA. El robot hace retroceder brevemente las ruedas, y a continuación las detiene. El retroceso de las ruedas ayuda a minimizar los falsos positivos de rueda suspendida proporcionando a las ruedas un pequeño impulso en sentido opuesto. Si la rueda suspendida ha desaparecido en 2 segundos, el robot prosigue el funcionamiento normal.

REDUCCIÓN. Si un detector de rueda suspendida o de desnivel se apaga, el robot reduce la velocidad a 0,235 m/s (o al 77 % de su velocidad normal) durante una distancia de 0,5 m y a continuación acelera de nuevo hasta su velocidad normal.

5 Además de los comportamientos de cobertura y los comportamientos de escape, el robot puede contener asimismo comportamientos adicionales relacionados con la seguridad o la usabilidad. Por ejemplo, si se detecta un desnivel durante más de una cantidad de tiempo predeterminada, el robot se puede apagar. Cuando se detecta por primera vez un desnivel, el comportamiento de respuesta de evitación del desnivel tiene prioridad inmediata sobre todos los demás comportamientos, girando el robot alejándolo del desnivel hasta que el robot deja de detectar el desnivel. En una realización preferida, el evento de detección de desnivel no provoca un cambio en los modos de funcionamiento.

10 En otras realizaciones, el robot podría utilizar un algoritmo similar al comportamiento de seguimiento de la pared para permitir el seguimiento del desnivel.

El funcionamiento individual de los tres modos de funcionamiento se ha descrito en lo anterior; se pasa a continuación al modo preferido de conmutación entre los diversos modos.

15 Para conseguir la cobertura y la eficiencia de limpieza óptimas, una realización preferida utiliza un programa de control que otorga prioridad a varios comportamientos de cobertura. (Si es necesario, los comportamientos de escape reciben siempre una prioridad superior.) Por ejemplo, el robot 10 puede utilizar el modo de seguimiento de la pared durante un período de tiempo específico o aleatorio, y conmutar a continuación a los modos de funcionamiento para limpiar la habitación. Conmutando entre modos de funcionamiento, el dispositivo robótico de la presente invención puede aumentar la cobertura, la eficiencia de limpieza y la eficacia percibida.

20 A modo de ejemplo, las figuras 13A y 13B muestran un robot móvil 10 en un entorno en forma de "hueso de perro" en el que dos habitaciones 115 y 116 de dimensiones aproximadamente iguales están conectadas mediante un paso estrecho 105. (Este ejemplo muestra el problema de difusión del robot explicado anteriormente.) Esta disposición es una versión simplificada de los típicos entornos domésticos, en los que el "hueso de perro" se puede generar mediante las disposiciones de obstáculos en el interior de la habitación. En la figura 13A, la trayectoria del robot 10 se ha trazado como la línea 54 cuando el robot 10 funciona en un modo de rebote aleatorio. El robot 10 no puede pasar de la habitación 116 a la 115 durante la ejecución limitada debido a que no ha ocurrido que el comportamiento aleatorio del robot conduzca el robot a través del paso 105. Este procedimiento deja la cobertura muy por debajo de la óptima y la velocidad de limpieza reducida, debido al número de veces que el robot 10 cruza su propia trayectoria.

25

30 La figura 13B muestra el movimiento de una realización preferida del robot 10, con la que el robot alterna cíclicamente entre los comportamientos de REBOTE y de SEGUIMIENTO DE LA PARED. Cuando el robot sigue la trayectoria 99, cada vez que el robot 10 encuentra una pared 100, el robot sigue la pared durante una distancia igual al doble del diámetro del robot. Las partes de la trayectoria 99 en las que el robot 10 funciona en modo de seguimiento de la pared están identificadas como 51. Este procedimiento proporciona una cobertura considerablemente mayor, junto con los consiguientes incrementos en la velocidad de limpieza y la eficacia percibida.

35

Finalmente, se detalla en la figura 14 una realización preferida de la presente invención en la que se utiliza la totalidad de los tres modos de funcionamiento. En una realización preferida, el dispositivo 10 comienza en modo espiral (línea de movimiento 45). Si se utiliza un patrón espiral reflectante, el dispositivo continúa en modo espiral hasta que se ha producido un número predeterminado o aleatorio de eventos de reflexión. Si se utiliza una espiral estándar (tal como se muestra en la figura 14), el dispositivo debería continuar hasta algún evento del sensor de golpe. En una realización preferida, el dispositivo entra inmediatamente en el modo de seguimiento de la pared después de un evento desencadenante.

40

En una realización preferida, el dispositivo conmuta a continuación entre el modo de seguimiento de la pared (líneas de movimiento 51) y los modos de rebote aleatorio (líneas de movimiento 48) en base a eventos de sensor de golpe o a la finalización del algoritmo de seguimiento de la pared. En una realización, el dispositivo no vuelve al modo espiral; sin embargo, en otras realizaciones, el dispositivo puede entrar en modo espiral en base a un evento predeterminado o aleatorio.

45

En una realización preferida, el robot mantiene un registro de la distancia promedio recorrida entre golpes. El robot calcula a continuación una distancia de golpe promedio (ABD, average bump distance) utilizando la fórmula siguiente:  $(3/4 \times ABD) + (1/4 \times \text{distancia más reciente entre golpes})$ . Si la ABD está por encima de un umbral predeterminado, el robot proporcionará prioridad al comportamiento ESPIRAL. En otras realizaciones, el robot puede tener un número mínimo de eventos de golpe antes de que el comportamiento ESPIRAL reciba prioridad de nuevo. En otras realizaciones, el robot puede entrar en comportamiento ESPIRAL si se desplaza una distancia máxima, por ejemplo de 20 pies, sin un evento de golpe.

50

Además, el robot puede tener asimismo condiciones tras las cuales detiene todas las operaciones. Por ejemplo, para un tamaño de habitación determinado, que se puede seleccionar manualmente, se ajustan tiempos mínimo y máximo de servicio y se selecciona una distancia total mínima. Cuando se ha alcanzado el tiempo mínimo y la distancia mínima el robot se apaga. Análogamente, si se ha alcanzado el tiempo máximo, el robot se apaga.

55

5 Por supuesto, se puede utilizar asimismo un control manual para seleccionar entre modos de funcionamiento. Por ejemplo, se podría utilizar un control remoto para cambiar los comportamientos o modos de funcionamiento, o influir sobre los mismos. Análogamente, se podría utilizar un conmutador montado en la propia carcasa para ajustar el modo de funcionamiento o la conmutación entre modos. Por ejemplo, se podría utilizar un conmutador para ajustar el nivel de desorden en una habitación con el fin de permitir al robot un algoritmo de cobertura más adecuado con capacidad de detección limitada.

10 Un experto en la materia reconocerá que se pueden utilizar partes de la presente invención en vehículos autónomos con diversos propósitos además de la limpieza. El alcance de la invención se deberá determinar mediante las reivindicaciones adjuntas y sus equivalentes legales, y no mediante los ejemplos proporcionados.

**REIVINDICACIONES**

1. Un robot móvil (10), que comprende:  
medios (20, 21) de desplazamiento del robot sobre una superficie;  
un sensor de detección de obstáculos (12, 13, 16); y
- 5 un sistema de control (22) conectado operativamente a dicho sensor de detección de obstáculos y a dichos medios de desplazamiento; en el que  
dicho sistema de control tiene un modo de seguimiento de obstáculos, mediante el cual dicho robot se desplaza junto a un obstáculo detectado, y un modo de cobertura de habitación, mediante el cual el robot se desplaza sustancialmente en una dirección alejándose del obstáculo;
- 10 dicho sistema de control está configurado para hacer funcionar el robot en uno o varios comportamientos que incluyen un comportamiento de cobertura en el que el sistema de control alterna cíclicamente entre dicho modo de seguimiento de obstáculos y dicho modo de cobertura de habitación; y  
caracterizado por que:  
dicho sistema de control puede funcionar para conmutar de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo
- 15 de cobertura de habitación una vez se ha recorrido una distancia de desplazamiento mínima de aproximadamente el doble de la anchura de trabajo del robot.
2. Un robot móvil según la reivindicación 1, en el que dicho sistema de control conmuta además de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo de cobertura de habitación:  
después de un número aleatorio de interacciones mediante el sensor de detección de obstáculos; o
- 20 después de un número particular de interacciones mediante el sensor de detección de obstáculos;  
o  
después de desplazarse una distancia aleatoria; o  
después de un tiempo aleatorio; o  
después de un tiempo determinado; o
- 25 después de que se produce una interacción mediante el sensor de detección de obstáculos antes de una distancia máxima; o  
según el número particular de interacciones con obstáculos en el tiempo;  
o  
después de una rotación de más de un número particular de grados.
- 30 3. Un robot móvil según la reivindicación 2, en el que dicho número particular de interacciones está entre aproximadamente 5 y aproximadamente 15.
4. Un robot móvil según la reivindicación 2 ó 3, en el que dicha distancia particular es menor que dicha distancia máxima.
- 35 5. Un robot móvil según la reivindicación 4, en el que dicha distancia máxima es aproximadamente diez veces la anchura de trabajo del robot.
6. Un robot móvil según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que si se encuentran más obstáculos, la conmutación de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo de cobertura de habitación es más lenta, y si se encuentran menos obstáculos, la conmutación de dicho modo de seguimiento de obstáculos a dicho modo de cobertura de habitación es más rápida.
- 40 7. Un robot móvil según cualquier reivindicación anterior, en el que dicho sistema de control ajusta un ciclo inicial entre el modo de seguimiento de obstáculos y el modo de cobertura de habitación para que sea mayor que los ciclos posteriores.
8. Un robot móvil según cualquier reivindicación anterior, en el que dicho modo de cobertura de habitación incluye llevar a cabo uno o varios de:
- 45 un comportamiento de rebote, en el que el robot se aparta del obstáculo; y

un comportamiento en línea recta en el que el robot sigue moviéndose en una línea fundamentalmente recta.

9. Un robot móvil según cualquier reivindicación anterior, en el que dicho modo de seguimiento de obstáculos incluye llevar a cabo uno o varios de:

un seguimiento de la pared en el que el robot sigue una pared fundamentalmente recta de un obstáculo;

5 un seguimiento de alineamiento, en el que el robot gira para alinearse con una pared un obstáculo;

un seguimiento de borde, en el que el robot sigue el borde de un obstáculo.

10. Un robot móvil según la reivindicación 8, en el que dicho sensor de detección de obstáculos puede determinar un ángulo de contacto del robot con respecto a un obstáculo y en el que dicho modo de cobertura de habitación incluye llevar a cabo un comportamiento de rebote en el que el robot se aleja del obstáculo para desplazarse en un rumbo elegido en relación con el obstáculo.

10

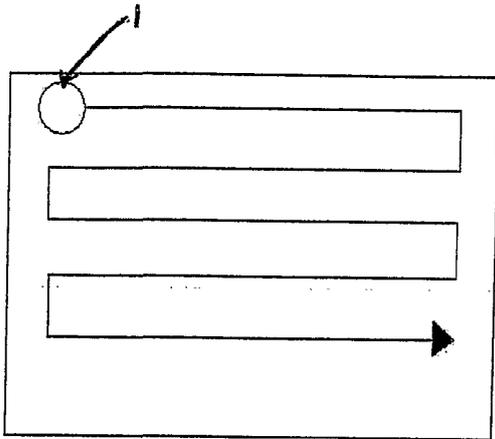


FIG. 1A

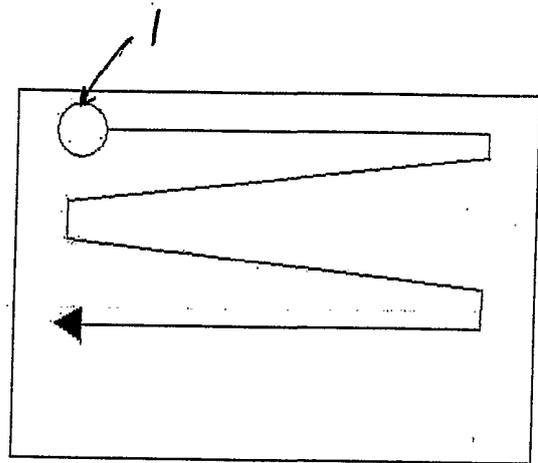


FIG. 1B

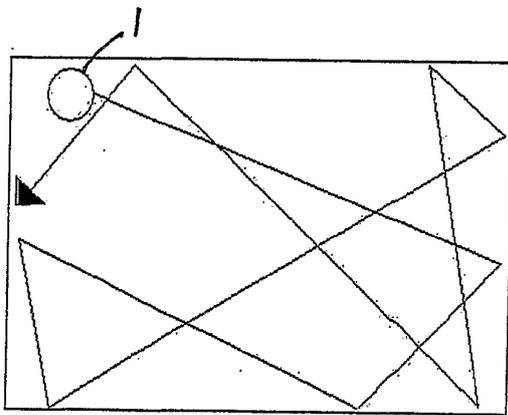


FIG. 1C

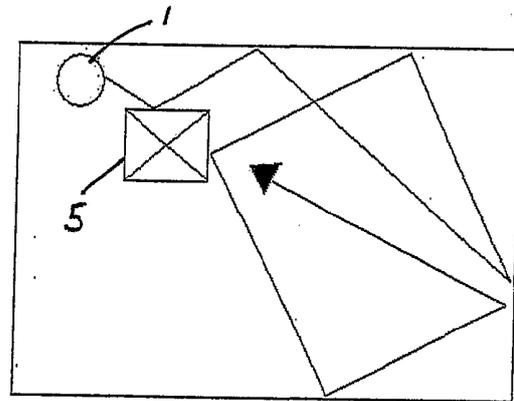


FIG. 1D

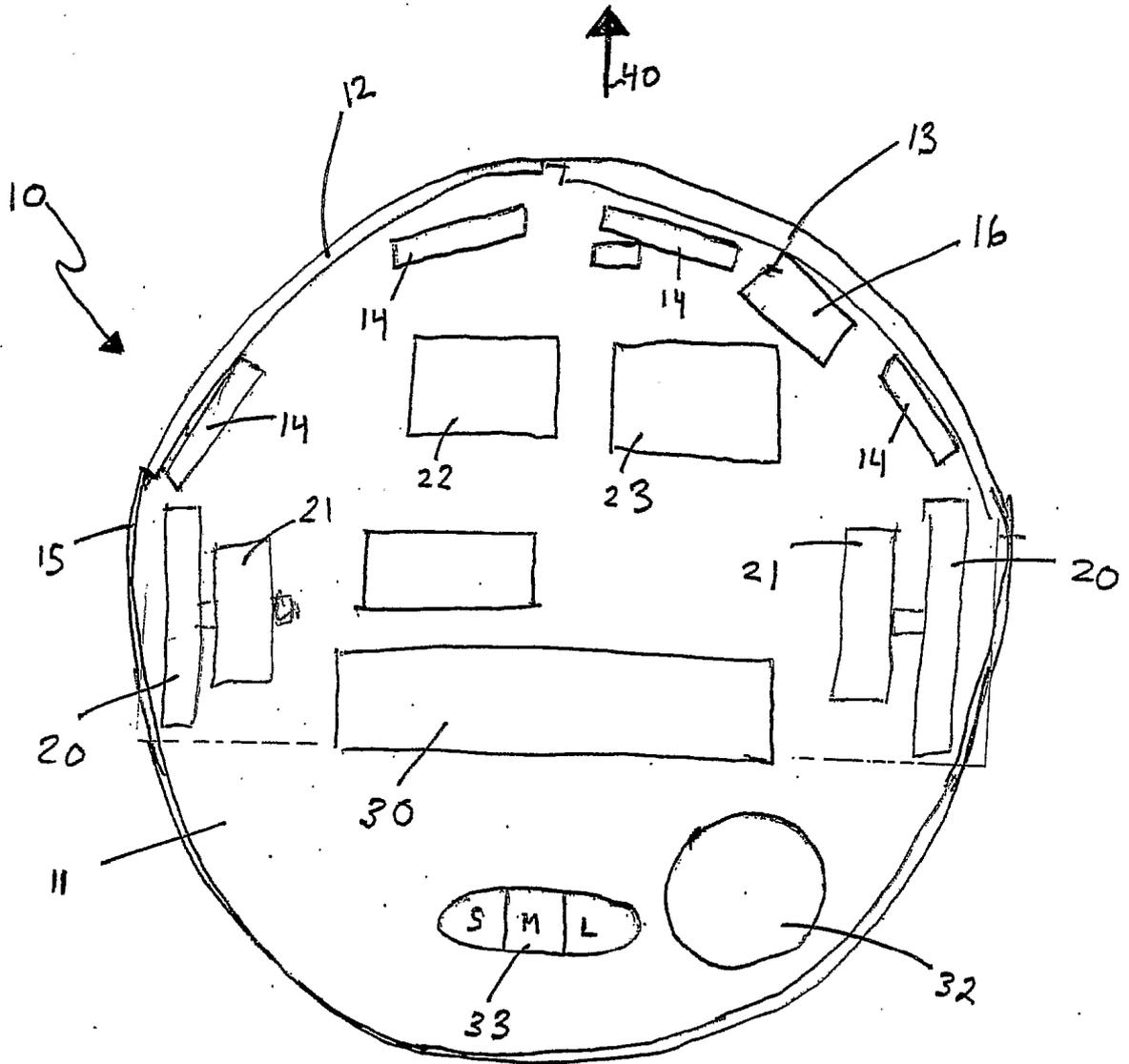
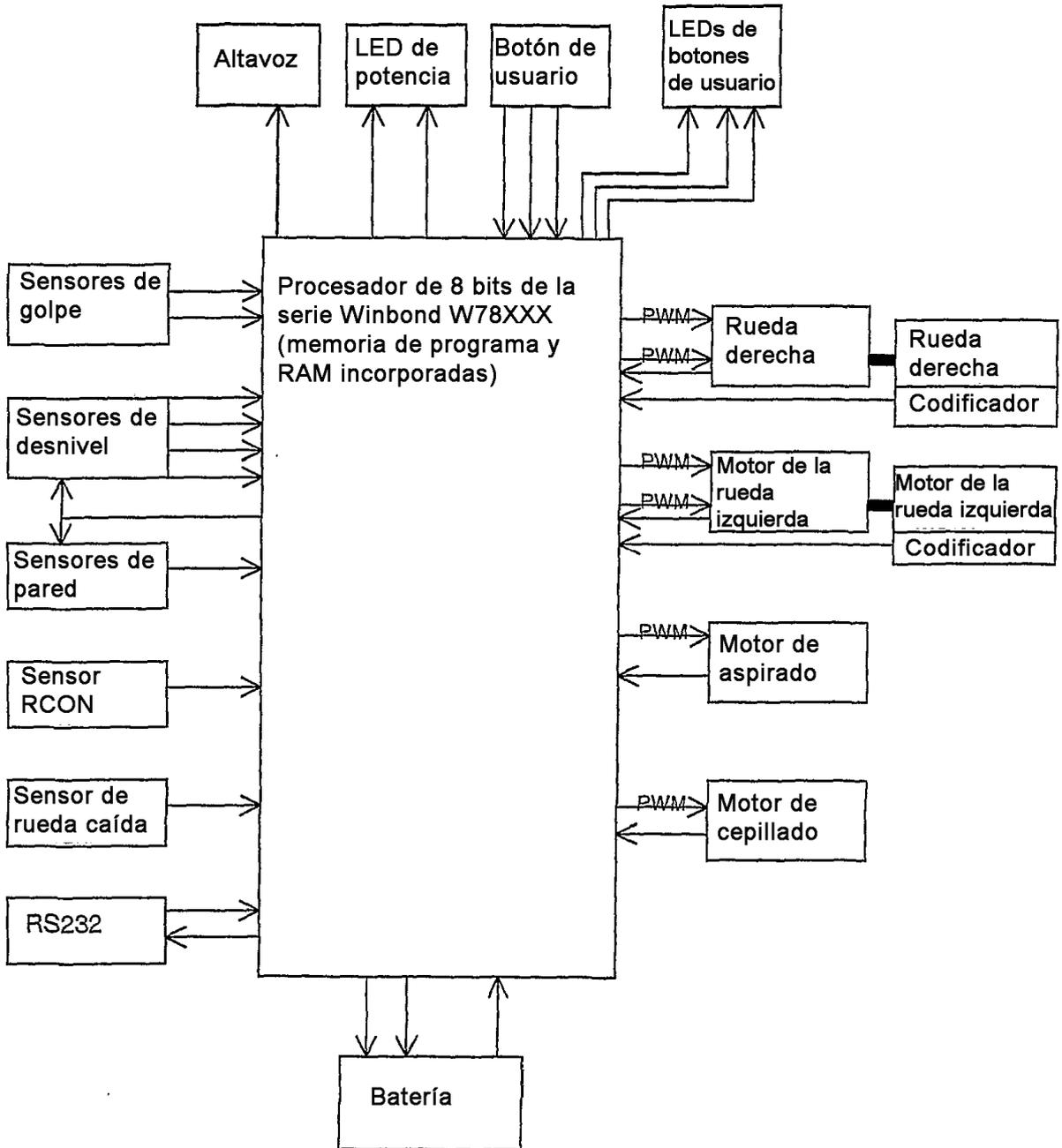


FIG. 2

FIG. 3



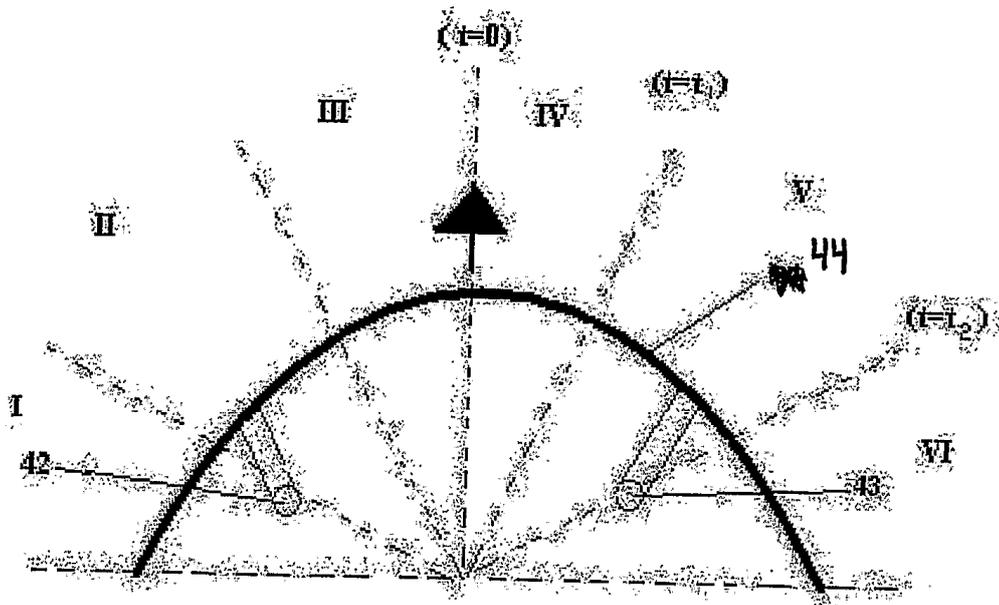


FIG. 4A

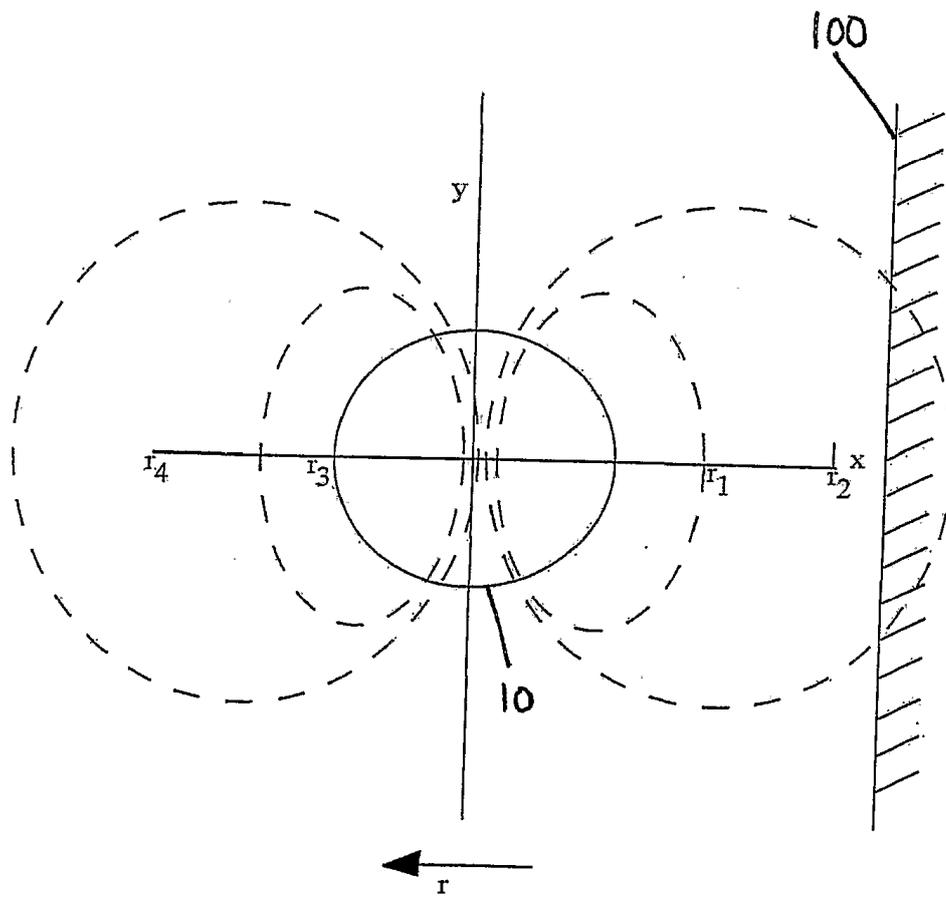


FIG. 4B

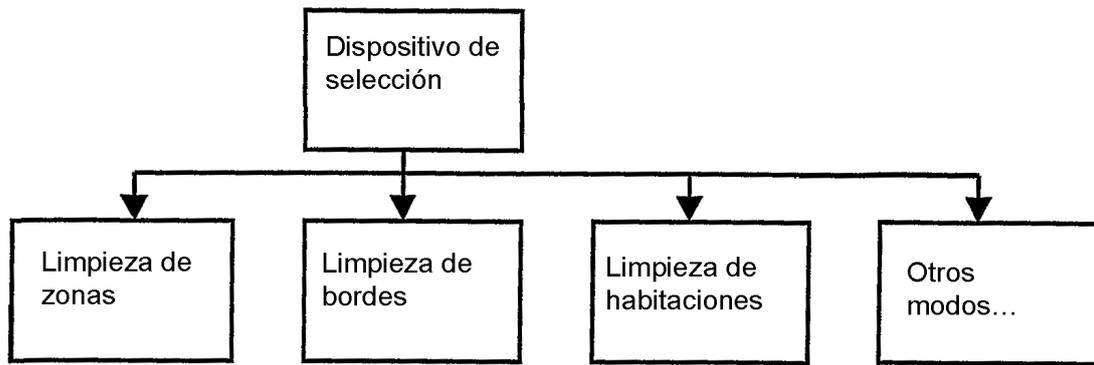


FIG. 5

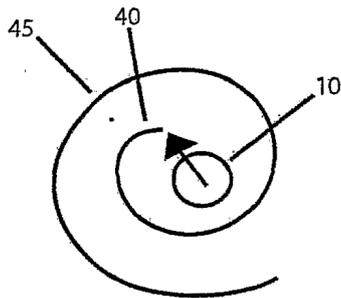


FIG. 6A

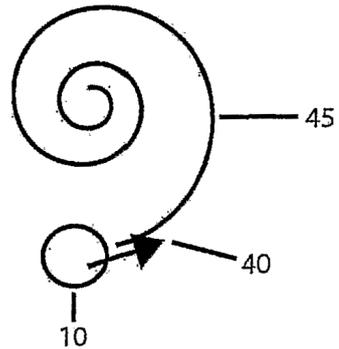


FIG. 6B

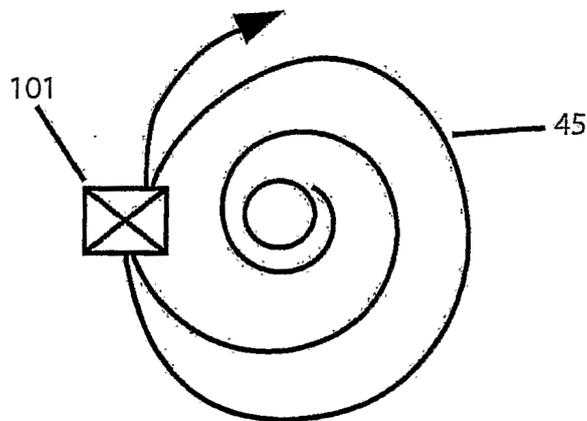


FIG. 6C

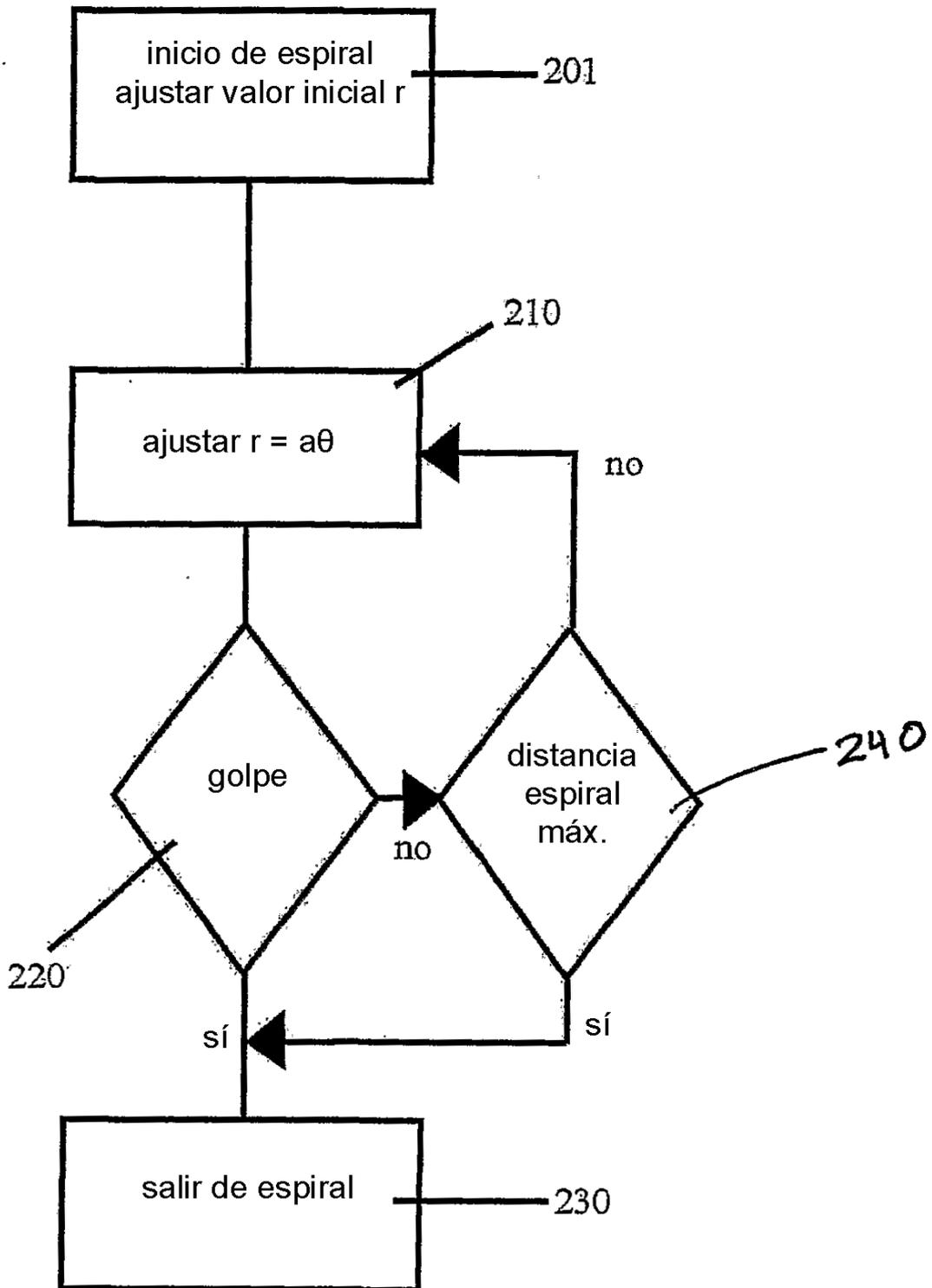
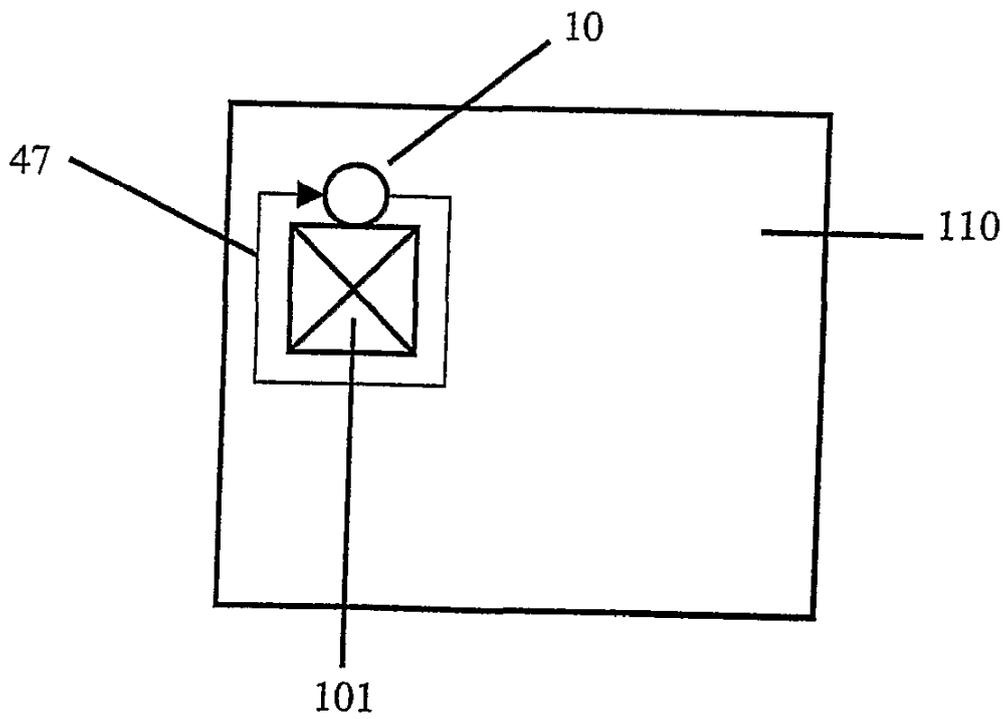
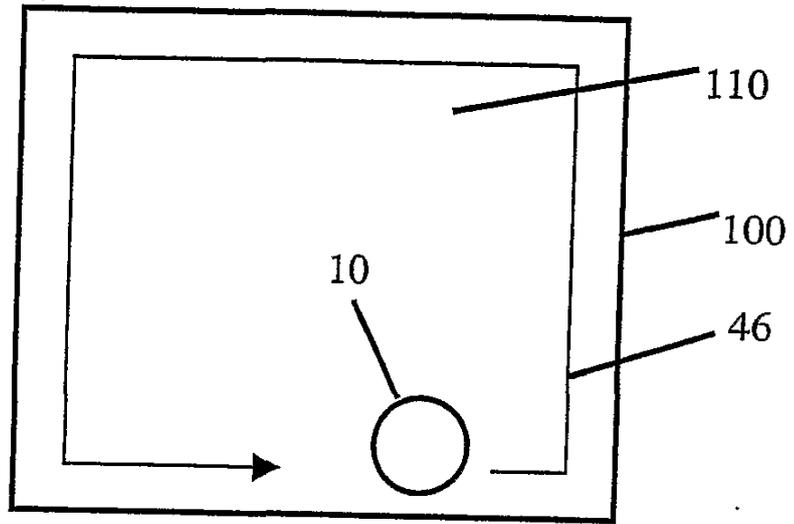
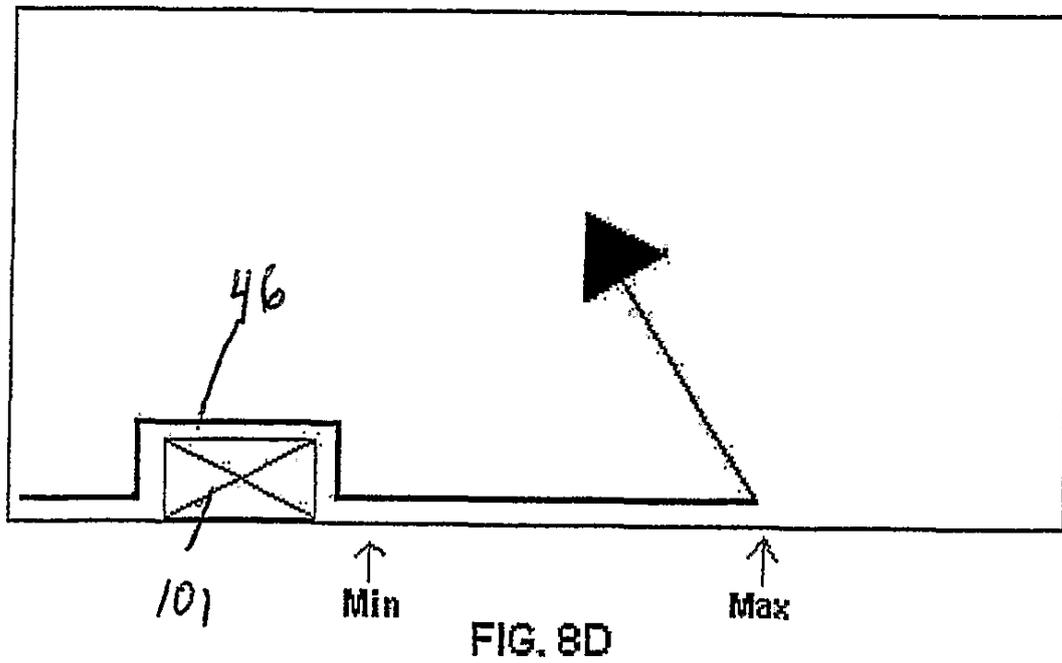
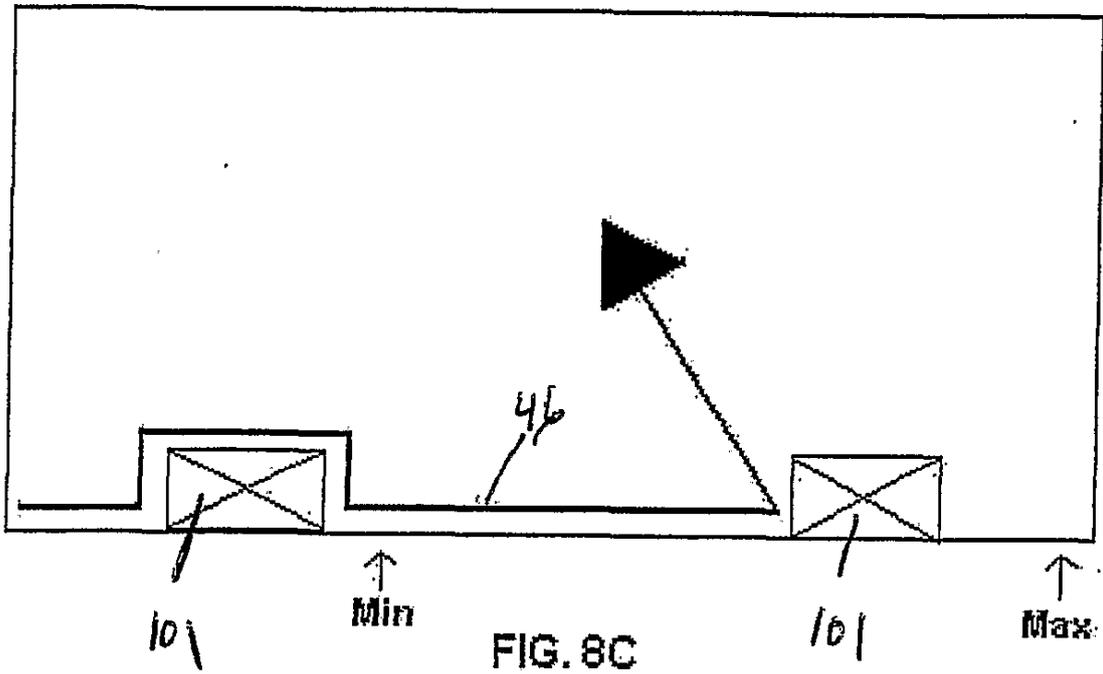


FIG. 7





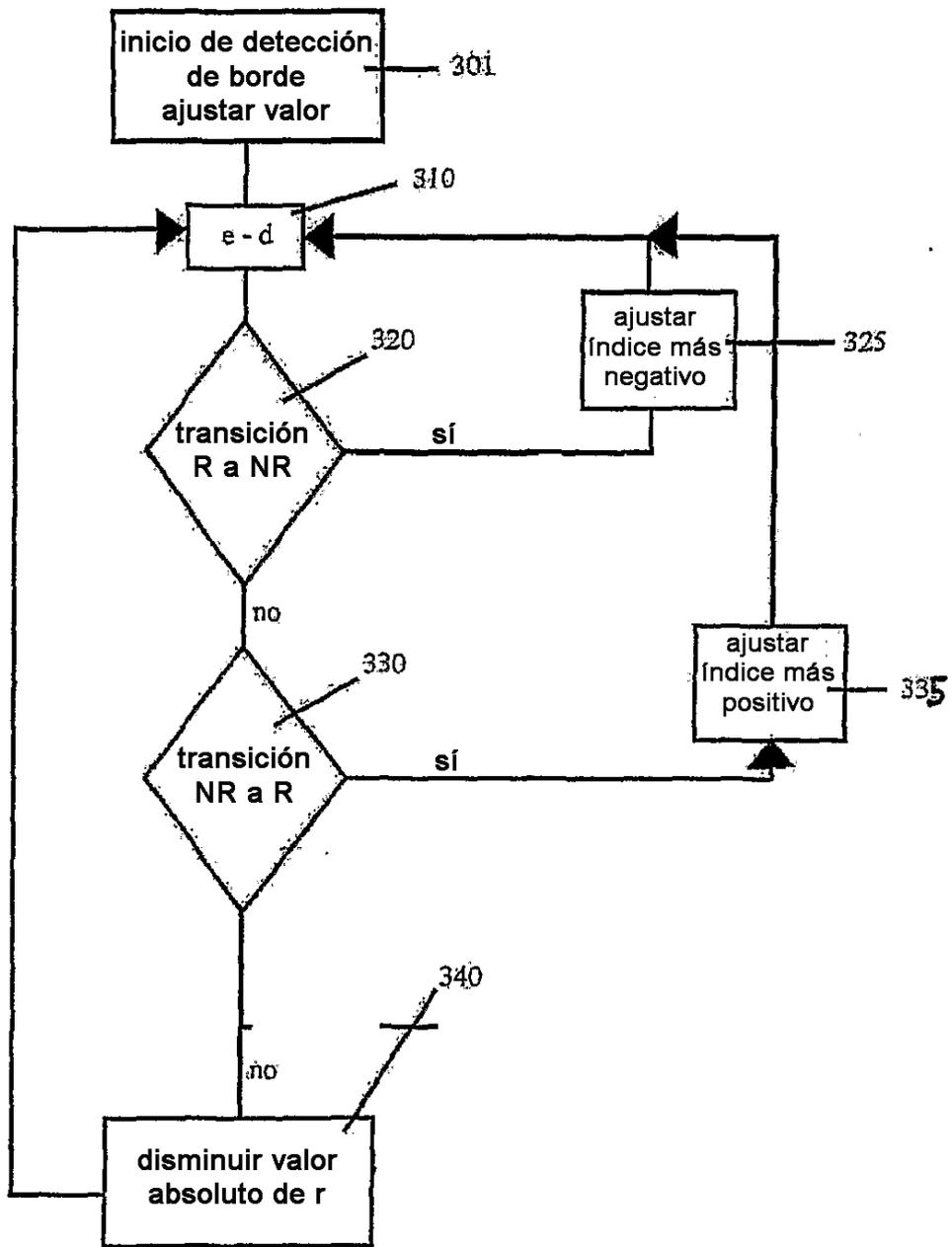


FIG. 9A

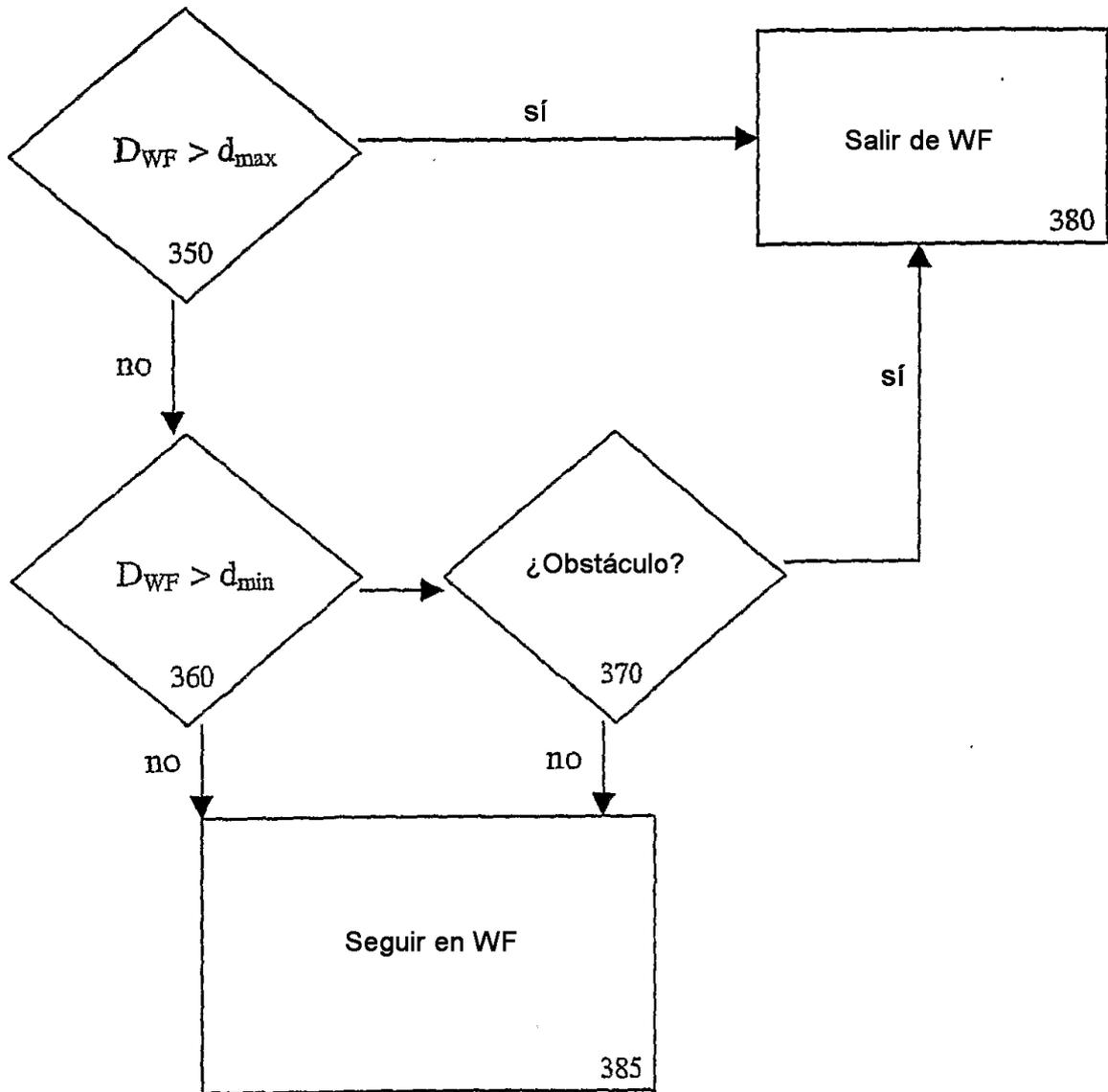


FIG. 9B

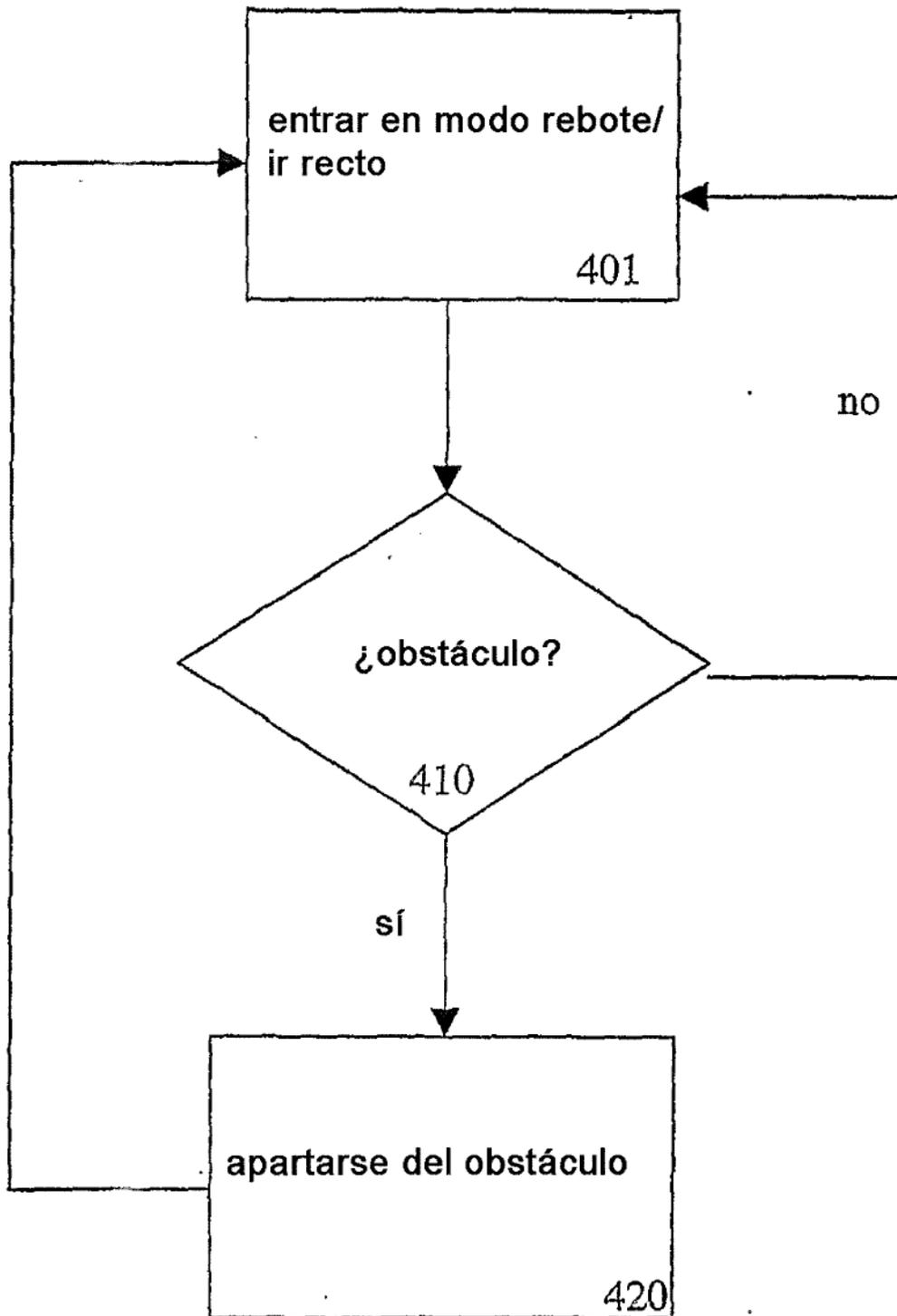


FIG. 10

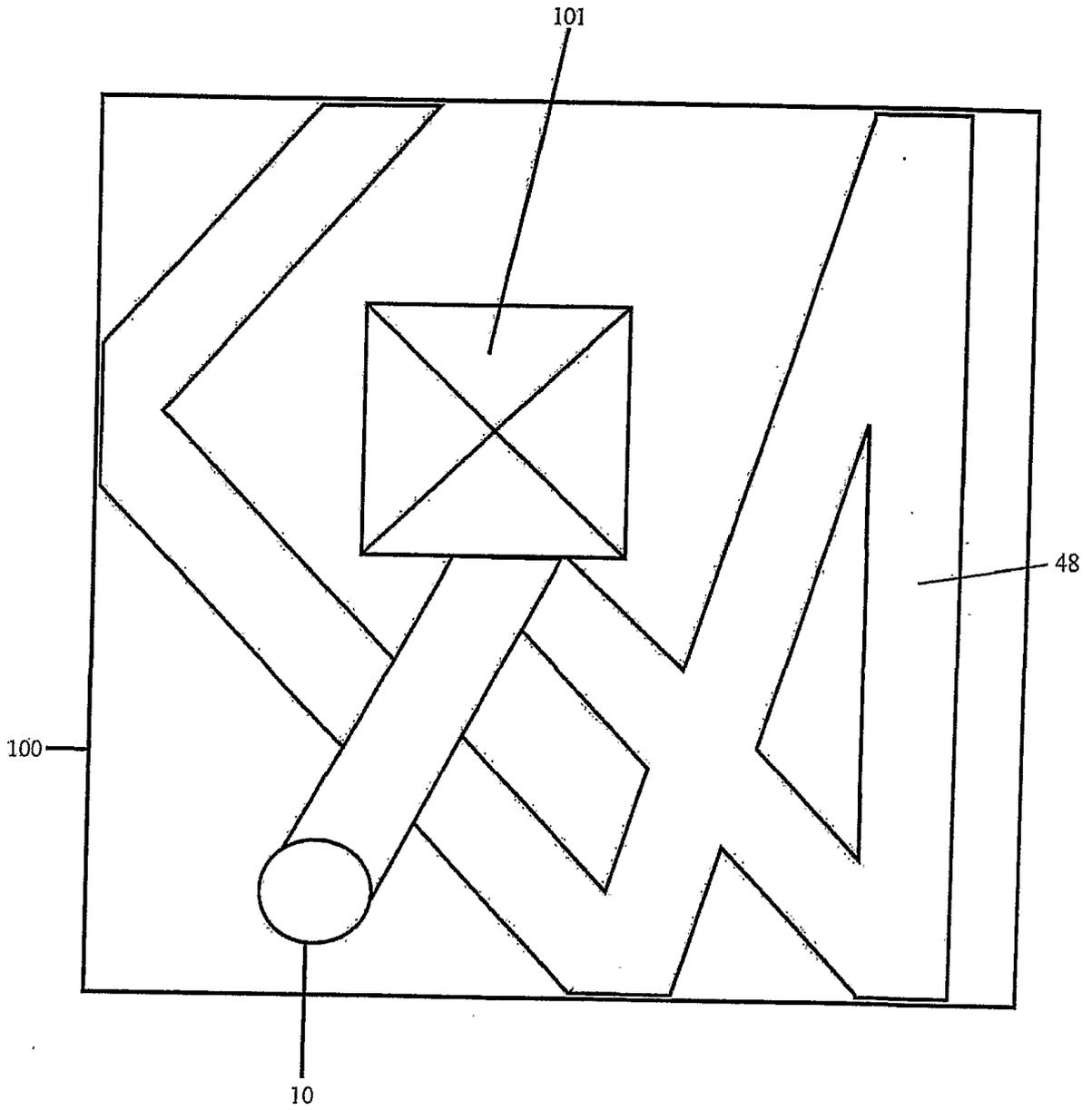


FIG. 11

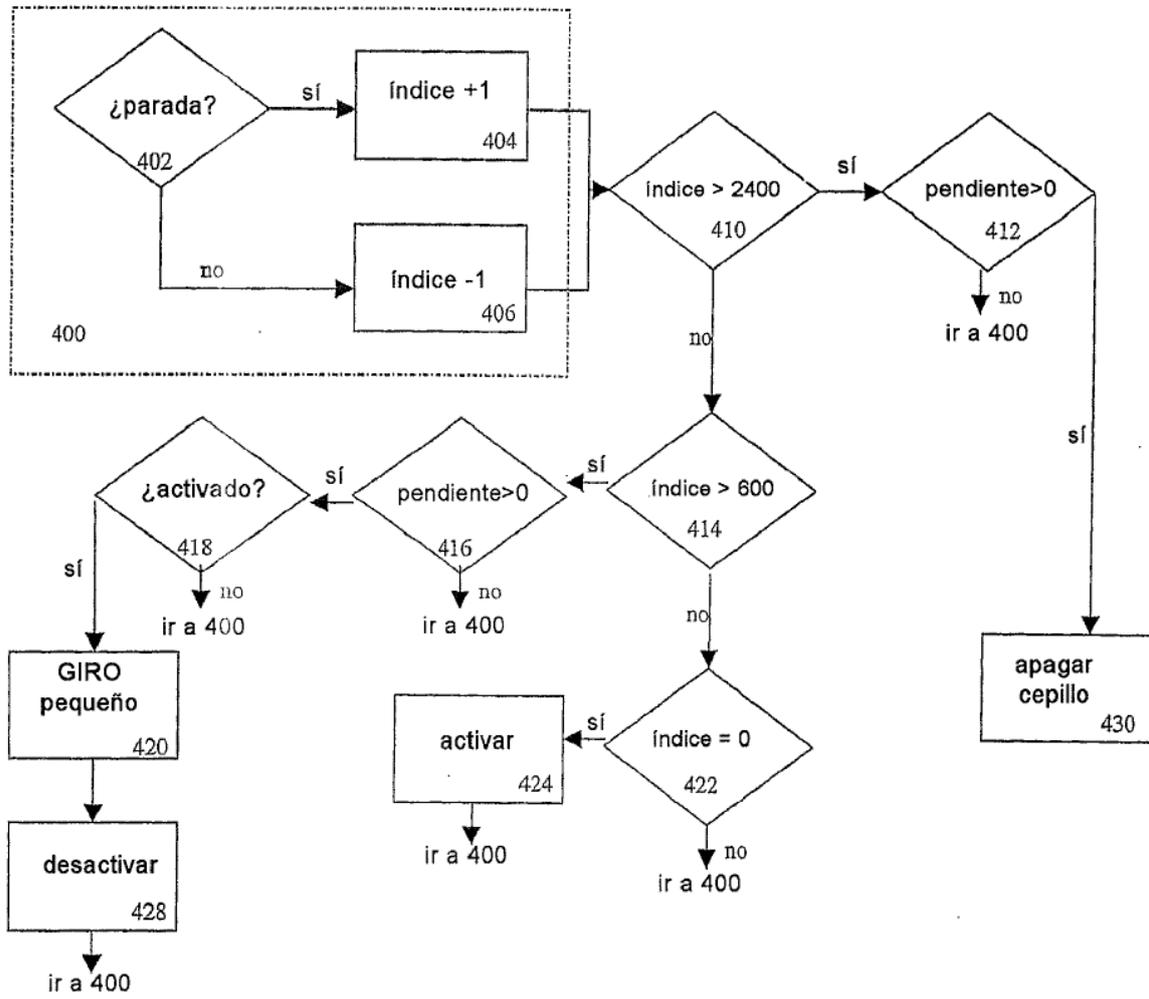


FIG. 12A

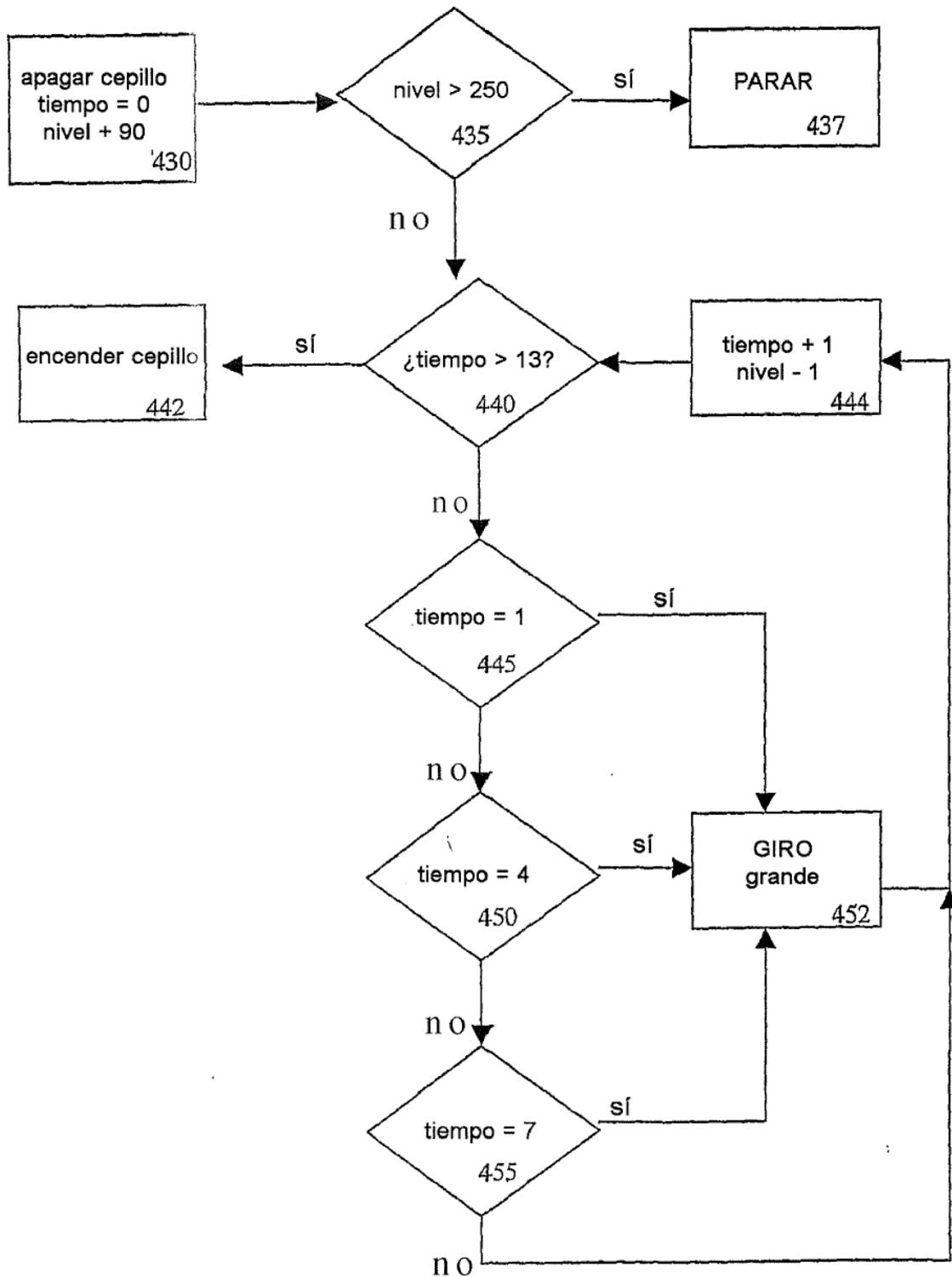


FIG. 12B

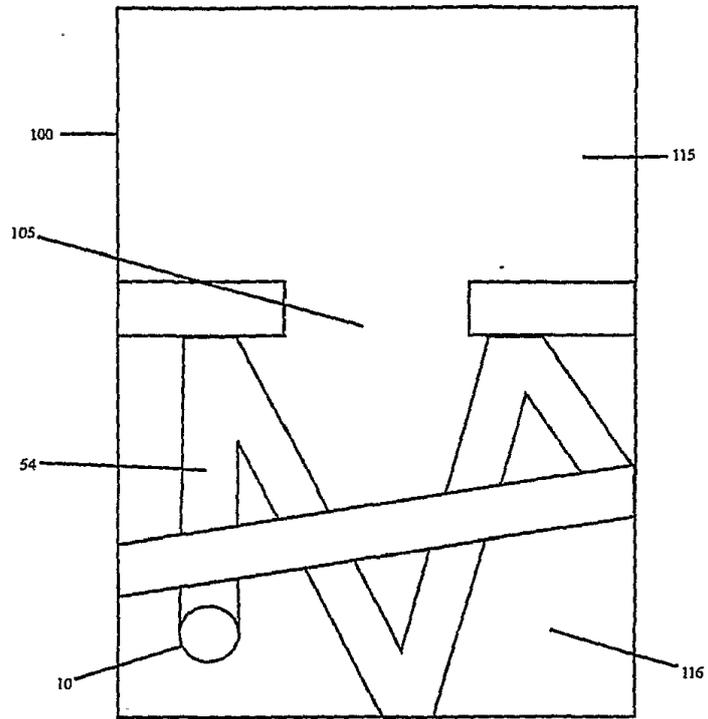


FIG. 13A

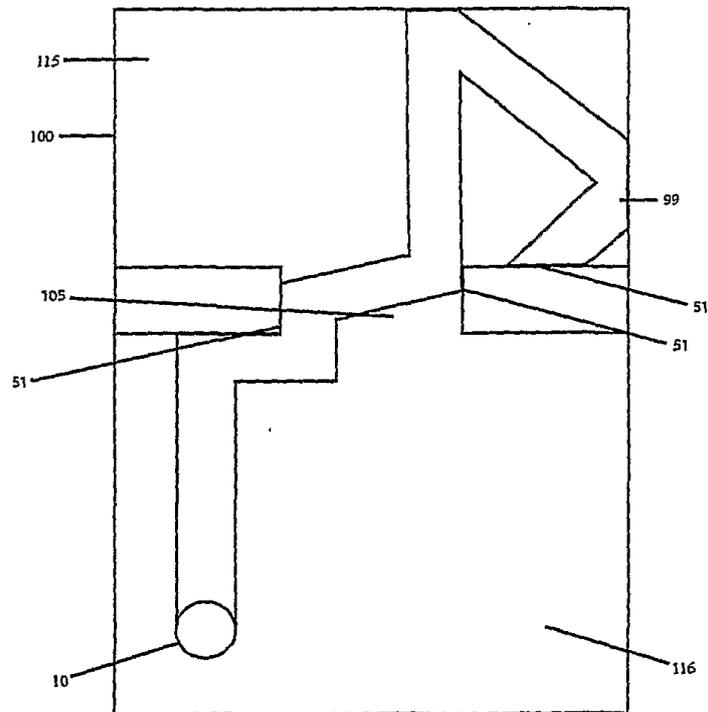


FIG. 13B

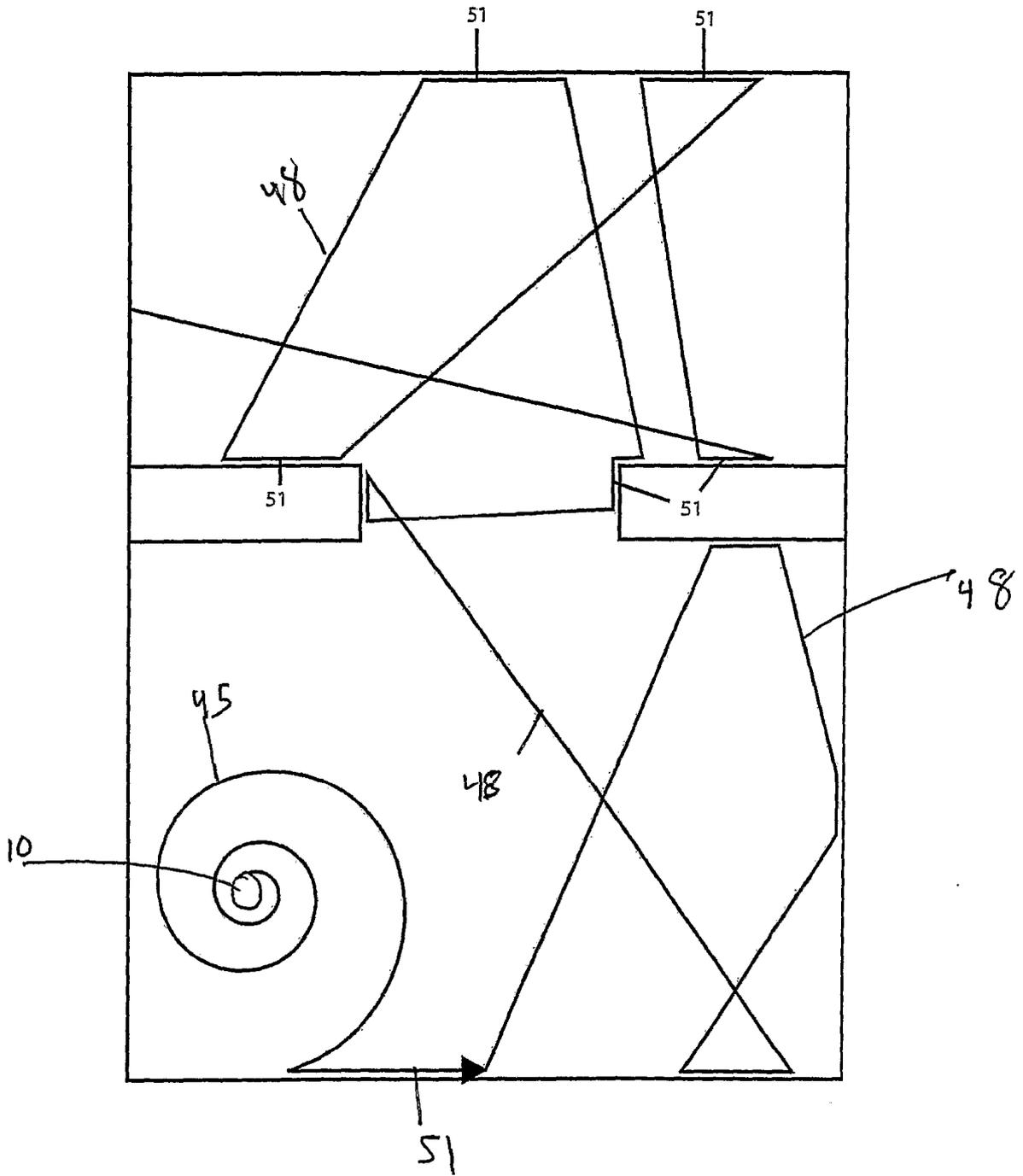


FIG. 14