

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 520 391**

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 10183299 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.08.2014 EP 2287695**

54 Título: **Cobertura multimodo para un robot autónomo**

30 Prioridad:

**12.06.2001 US 297718 P**

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

**11.11.2014**

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:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 520 391 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

Cobertura multimodo para un robot autónomo

**Campo de la invención**

5 Esta invención se refiere en general a vehículos o robots autónomos y, más específicamente, a procedimientos y a dispositivos robóticos móviles para cubrir un área específica que puedan requerirse por, o usarse como, limpiadores robóticos o cortadoras de césped.

**Antecedentes**

10 Para los fines de esta descripción, los ejemplos se centrarán en los problemas a los que se ha enfrentado la técnica anterior en lo que respecta a una limpieza robótica (por ejemplo, quitar el polvo, dar brillo, barrer, fregar el suelo, limpiar en seco o pasar la aspiradora). Sin embargo, la invención reivindicada sólo está limitada por las reivindicaciones, y un experto en la técnica reconocerá los múltiples usos de la presente invención más allá de una limpieza doméstica en entornos cerrados.

15 Los ingenieros robóticos han trabajado durante mucho tiempo en el desarrollo de un procedimiento eficaz de limpieza autónoma. A modo de introducción, el rendimiento de los robots de limpieza debe centrarse en tres medidas prácticas: cobertura, tasa de limpieza y efectividad percibida. La cobertura es el porcentaje del espacio disponible recorrido por el robot durante un tiempo de limpieza establecido y, de manera ideal, un robot de limpieza proporciona una cobertura del 100 por cien dado un tiempo de funcionamiento infinito. Desafortunadamente, los diseños de la técnica anterior dejan sin cubrir frecuentemente algunas zonas, independientemente de la cantidad de tiempo que se deje al dispositivo para completar sus tareas. La imposibilidad de conseguir una cobertura completa puede deberse a limitaciones mecánicas, por ejemplo el tamaño y la forma del robot pueden impedir que llegue a determinadas zonas, o el robot puede quedar atrapado sin poder modificar su control para liberarse. La imposibilidad de conseguir una cobertura completa también puede deberse a un algoritmo de cobertura inadecuado. El algoritmo de cobertura es el conjunto de instrucciones usado por el robot para controlar su movimiento. Para los fines de la presente invención, la cobertura se trata como un porcentaje del área disponible recorrida por el robot durante un tiempo de limpieza finito. 20 Debido a limitaciones mecánicas y/o algorítmicas, determinadas zonas del espacio disponible pueden omitirse sistemáticamente. Tal omisión sistemática es una limitación importante de la técnica anterior.

Una segunda medida del rendimiento de un robot de limpieza es la tasa de limpieza dada en unidades de área limpiada por unidad de tiempo. La tasa de limpieza se refiere a la tasa en que aumenta el área de suelo que se ha limpiado; la tasa de cobertura se refiere a la tasa en que el robot cubre el suelo independientemente de si el suelo estaba previamente limpio o sucio. Si la velocidad del robot es  $v$  y el ancho del mecanismo de limpieza del robot (también denominado ancho de trabajo) es  $w$ , entonces la tasa de cobertura del robot es simplemente  $wv$ , pero su tasa de limpieza puede ser drásticamente inferior. 30

Un robot que se mueve de una manera puramente aleatoria en un entorno cerrado tiene una tasa de limpieza que disminuye con respecto a la tasa de cobertura del robot como una función de tiempo. Esto se debe a que cuanto más tiempo funcione el robot, mayor será la probabilidad de vuelva a pasar por zonas ya limpiadas. El diseño óptimo tiene una tasa de limpieza equivalente a la tasa de cobertura, minimizando de este modo limpiezas repetidas innecesarias en el mismo punto. Dicho de otro modo, la relación de la tasa de limpieza con respecto a la tasa de cobertura es una medida de eficacia y una tasa de limpieza óptima indicará la cobertura del mayor porcentaje del área designada con el mínimo número de pasadas acumulativas o redundantes sobre un área ya limpiada. 35

40 Una tercera medida del rendimiento del robot de limpieza es la efectividad percibida del robot. Esta medida se ha ignorado en la técnica anterior. Un movimiento deliberado y un determinado movimiento que se ajusta a un patrón es favorable ya que los usuarios percibirán un robot con un movimiento deliberado más eficaz.

Aunque la tasa de cobertura, la tasa de limpieza y la efectividad percibida son los criterios de rendimiento analizados en este documento, una realización preferida de la presente invención también tiene en cuenta la facilidad de utilización en habitaciones de diferentes formas y tamaños (que contengan una serie de obstáculos no conocidos) y el coste de los componentes robóticos. Otros criterios de diseño también pueden influir en el diseño, por ejemplo la necesidad de evitar colisiones y una respuesta apropiada a otros peligros. 45

Tal y como se describe en detalle en el documento "Mobile Robots: Inspiration to Implementation", de Jones, Flynn y Seiger, segunda edición, 1999, A K Peters, Ltd., y en otros documentos, se han llevado a cabo numerosos intentos para fabricar robots de aspirado y limpieza y. Cada uno de estos robots ha afrontado un reto similar: cómo cubrir de manera eficaz el área designada dadas unas reservas de energía limitadas. 50

En este documento, se hace referencia a una limpieza totalmente eficaz, donde la tasa de limpieza es igual a la tasa de cobertura, como. Tal y como se muestra en la fig. 1A, un robot 1 que sigue una trayectoria determinista se

desplaza de tal manera que cubre completamente el área 2 evitando al mismo tiempo toda limpieza redundante. Una limpieza determinista requiere que el robot sepa dónde está y dónde ha estado; esto requiere a su vez un sistema de posicionamiento. Tal sistema de posicionamiento, un sistema de posicionamiento adecuadamente preciso como para permitir que la limpieza determinista se base en sistemas de exploración láser, transductores ultrasónicos, GPS  
 5 diferencial de fase de portadora, u otros procedimientos, puede ser extremadamente caro y requerir una configuración por parte del usuario específica con respecto a la geometría particular de la habitación. Además, los procedimientos que se basan en el posicionamiento global se ven afectados normalmente por los fallos en cualquier parte del sistema de posicionamiento.

Un ejemplo de utilización de tecnologías de detección altamente sofisticadas (y caras) para producir una limpieza  
 10 determinista es el dispositivo RoboScrub fabricado por Denning Mobile Robotics y Windsor Industries que usa sensores con s3nar, sensores infrarrojos, sensores de choque y navegaci3n l3ser de alta precisi3n. El sistema de navegaci3n del dispositivo RoboScrub requería colocar grandes blancos con c3digos de barras en diferentes ubicaciones de la habitaci3n. El requisito de que el dispositivo RoboScrub tenga que descubrir al menos cuatro blancos simultáneamente fue un problema de funcionamiento importante. Por lo tanto, el dispositivo RoboScrub está  
 15 limitado a limpiar grandes espacios abiertos.

Otro ejemplo, RoboKent, un robot fabricado por la Kent Corporation, sigue una estrategia de posicionamiento global similar al RobotScrub. RoboKent prescinde del sistema de posicionamiento láser más caro de RobotScrub, pero con  
 20 ello RoboKent debe limitarse solamente a áreas con una geometría rectangular simple, por ejemplo, largos pasillos. En estas regiones más constreñidas, basta la correcci3n de posici3n por mediciones de exploraci3n del s3nar. Otros sistemas de limpieza determinista se describen, por ejemplo, en las patentes de Estados Unidos números 4.119.900 (Kremnitz), 4.700.427 (Knepper), 5.353.224 (Lee et ál.), 5.537.017 (Feiten et ál.), 5.548.511 (Bancroft) y 5.650.702 (Azumi). El documento DE19849978 es otro ejemplo de un robot de limpieza.

Debido a las limitaciones y dificultades de la limpieza determinista, algunos robots se han basado en esquemas  
 25 seudodeterministas. Un procedimiento que proporciona una limpieza seudodeterminista es un procedimiento de navegaci3n autónoma conocido como situaci3n por estima. La situaci3n por estima consiste en medir la rotaci3n precisa de cada rueda propulsora del robot (utilizando por ejemplo codificadores de eje ópticos). De este modo, el robot puede calcular su posici3n esperada en el entorno dado un punto de partida conocido y la orientaci3n. Un problema de esta técnica es el resbalamiento de las ruedas. Si se produce un resbalamiento, el codificador de esa  
 30 rueda registra una rotaci3n de rueda incluso aunque la rueda no esté impulsando al robot con respecto al suelo. Tal y como se muestra en la fig. 1B, a medida que el robot 1 se traslada por la habitaci3n, los errores de resbalamiento de las ruedas propulsoras se acumulan, lo que hace que este tipo de sistema no sea fiable para recorridos de cualquier duraci3n sustancial. (La trayectoria ya no consiste en filas muy próximas entre sí, en comparaci3n con la cobertura determinista mostrada en la fig. 1A). El resultado de confiar en la situaci3n por estima es una omisi3n sistemática que no puede controlarse; dicho de otro modo, zonas del suelo quedan sin limpiar.

Un ejemplo de un sistema seudodeterminista es el robot Cye de Probotics, Inc. Cye depende exclusivamente de la  
 35 situaci3n por estima y, por lo tanto, toma medidas heroicas para maximizar el rendimiento de su sistema de situaci3n por estima. Cye debe comenzar en un punto de registro físico instalado por el usuario en una ubicaci3n conocida en la que el robot establece su posici3n y orientaci3n. Después, Cye realiza un seguimiento de la posici3n a medida que aleja de ese punto. A medida que Cye se desplaza, aumenta la incertidumbre en lo que se refiere a su posici3n y  
 40 orientaci3n. Cye debe asegurarse de volver a un punto de calibraci3n antes de que este error se vuelva tan grande que sea casi imposible localizar un punto de calibraci3n. Si se quita o se bloquea un punto de calibraci3n o si se produce un resbalamiento excesivo de las ruedas, entonces Cye se puede perder (posiblemente sin darse cuenta de que se ha perdido). Por lo tanto, Cye es adecuado para usarse solamente en entornos inocuos relativamente  
 45 pequeños. Otros ejemplos de este enfoque se dan a conocer en las patentes de Estados Unidos números 5.109.566 (Kobayashi et ál.) y 6.255.793 (Peless et ál.).

Otro enfoque de limpieza rob3tica es un movimiento puramente aleatorio. Tal y como se muestra en la fig. 1C, en  
 50 una habitaci3n típica sin obstáculos, un algoritmo de movimiento aleatorio proporcionará una cobertura aceptable dado un tiempo de limpieza significativo. En comparaci3n con un robot con un algoritmo determinista, un robot de limpieza aleatoria debe funcionar durante más tiempo para conseguir una cobertura aceptable. Para tener la certeza de que el robot de movimiento aleatorio ha limpiado el 98 % de una habitaci3n sin obstáculos, el robot de movimiento aleatorio debe funcionar durante un periodo de tiempo cinco veces mayor al de un robot determinista con el mismo mecanismo de limpieza moviéndose a la misma velocidad.

Las limitaciones de cobertura de un algoritmo aleatorio pueden observarse en la fig. 1D. Un obstáculo 5 en la  
 55 habitaci3n puede crear el efecto de dividir la habitaci3n en una pluralidad de estancias. La cobertura a lo largo del tiempo de un robot de algoritmo aleatorio en tal habitaci3n es análoga a la densidad de gas liberado en el tiempo en una estancia de un volumen confinado. Inicialmente, la densidad de gas es mayor en la estancia en la que se libera y menor en las estancias más distantes. De manera similar, es más probable que el robot limpie minuciosamente la

estancia desde la que parte, en lugar de las estancias más distantes, en una fase temprana del proceso. Transcurrido el tiempo suficiente, el gas alcanza un equilibrio con igual densidad en todas las estancias. Asimismo, transcurrido el tiempo, el robot limpiará todas las zonas minuciosamente. Sin embargo, las limitaciones prácticas en el suministro de energía provocan generalmente que el robot no tenga suficiente tiempo para limpiar todas las zonas de un espacio lleno de obstáculos. En este documento, se hace referencia a este fenómeno como el problema de difusión del robot.

El documento DE19849978C2 es otro ejemplo de un robot de limpieza, que se usa como referencia para el modelo en dos partes de la reivindicación 1.

Tal y como se ha mencionado, la técnica anterior disponible en el mercado no ha podido generar un algoritmo de cobertura eficaz para un área con una geometría no conocida. Tal y como se ha indicado anteriormente, la técnica anterior se ha basado en sistemas sofisticados de marcadores o balizas o ha limitado la utilización del robot a habitaciones con geometrías rectangulares simples. Los intentos de usar algoritmos de control seudodeterministas pueden dejar sistemáticamente omitidas zonas del espacio.

### Sumario de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar un sistema y un procedimiento para permitir que un robot móvil funcione en una pluralidad de modos con el fin de cubrir un área de manera eficaz.

Un objeto de la presente invención es proporcionar un robot móvil, con al menos un sensor, que funcione en una serie de modos que incluyen cobertura localizada, seguimiento de obstáculo y rebote.

Un objeto adicional de la invención es proporcionar un robot móvil que alterne entre el modo de seguimiento de obstáculo y el modo de rebote para garantizar la cobertura.

Un objeto de la invención es volver a la cobertura localizada después de que el robot se haya desplazado una distancia predeterminada.

Un objeto de la invención es proporcionar un robot móvil que pueda localizar la distancia media entre obstáculos y usar la distancia media como una entrada para alternar entre modos de funcionamiento.

Otro objeto adicional de la invención es optimizar la distancia que el robot se desplaza en el modo de seguimiento de obstáculo en función de la frecuencia de seguimiento de obstáculo y el ancho de trabajo del robot, y proporcionar una distancia mínima y máxima para funcionar en el modo de seguimiento de obstáculo.

Un objeto de una realización preferida de la invención es usar un sistema de control para un robot móvil con un programa de sistema de funcionamiento que pueda llevar a cabo una pluralidad de comportamientos y usar un árbitro para seleccionar qué comportamiento controla al robot.

Otro objeto adicional de la invención es incorporar varios programas o comportamientos de escape para evitar que el robot quede atrapado.

Finalmente, un objeto de la invención es proporcionar uno o más procedimientos para controlar que un robot móvil se beneficie de los diversos objetos y ventajas dados a conocer en este documento.

### Breve descripción de los dibujos

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

las figs. 1A-D ilustran patrones de cobertura de varios robots de la técnica anterior;

la fig. 2 es una representación esquemática en una vista desde arriba de los componentes básicos de un robot móvil usado en una realización preferida de la invención;

la fig. 3 demuestra un diagrama de bloques de hardware del robot mostrado en la fig. 2;

la fig. 4A es un diagrama que muestra un procedimiento para determinar el ángulo en el que el robot se encuentra un obstáculo; la fig. 4B es un diagrama que muestra la orientación de una realización preferida del sistema de control de robot;

la fig. 5 es una representación esquemática de los modos de funcionamiento de la presente invención;

la fig. 6A es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de comportamiento en ESPIRAL; la fig. 6B es una representación esquemática del patrón de cobertura para una

realización alternativa de comportamiento en ESPIRAL; la fig. 6C es una representación esquemática del patrón de cobertura para otra realización alternativa adicional de comportamiento en ESPIRAL;

la fig. 7 es una ilustración de un diagrama de flujo del algoritmo de cobertura localizada de una realización preferida de la invención;

- 5 las figs. 8A y 8B son representaciones esquemáticas del patrón de cobertura para una realización preferida de funcionamiento en el modo de seguimiento de obstáculo;

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

- 10 la fig. 10 es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de comportamiento de REBOTE;

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

las figs. 12A y 12B son ilustraciones de diagramas de flujo de un comportamiento de escape a modo de ejemplo;

- 15 la fig. 13A es una representación esquemática del patrón de cobertura de un robot móvil con un solo modo de funcionamiento; la fig. 13B es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de la presente invención que usa el modo de seguimiento de obstáculo y el modo de cobertura de habitación; y

- 20 la fig. 14 es una representación esquemática del patrón de cobertura para una realización preferida de la presente invención que usa el modo de cobertura localizada, el modo de seguimiento de obstáculo y el modo de cobertura de habitación.

#### **Descripción detallada de la realización preferida**

- 25 En la presente invención, un robot móvil está diseñado para proporcionar la máxima cobertura en una tasa de cobertura eficaz en una habitación de geometría no conocida. Además, la efectividad percibida del robot se mejora mediante la inclusión de movimiento que se ajusta a un patrón o deliberado. Además, en una realización preferida, la cobertura eficaz requiere un sistema de control que pueda impedir que el robot quede inmovilizado en un entorno no conocido.

- 30 Aunque las estructuras físicas de los robots móviles se conocen en la técnica, en este documento se describen los componentes de una realización preferida a modo de ejemplo de la presente invención. Una realización preferida de la presente invención es una barredora robótica sustancialmente circular que contiene determinadas características. Como se muestra en la fig. 2, por ejemplo, el robot móvil 10 de una realización preferida incluye un bastidor 11 que soporta componentes mecánicos y eléctricos. Estos componentes incluyen varios sensores, que incluyen dos sensores de choque 12 y 13 situados en la parte delantera del robot, cuatro sensores de desnivel 14 situados en la carcasa de robot 15 y un sensor de seguimiento de pared 16 montado en la carcasa de robot 15. En otras realizaciones, en el robot se puede usar tan solo un sensor. Un experto en la técnica reconocerá que el (los) sensor(es) pueden ser de varios tipos incluyendo sensores con s3nar, táctiles, electromagnéticos, capacitivos, etc. Debido a restricciones en los costes, una realización preferida de la presente invención usa sensores de choque (táctiles) 12 y 13 y sensores de proximidad IR reflexivos para los sensores de desnivel 14 y el sensor de seguimiento de pared 16. Los detalles de los sensores IR se describen en la solicitud de patente de Estados Unidos U.S.S.N. 09/768.773, cuya descripción se incorpora en este documento por referencia.

- 40 Una realización preferida del robot también contiene dos ruedas 20, motores 21 para propulsar las ruedas de manera independiente, un microcontrolador económico de gama baja 22 y una batería recargable 23 u otra fuente de alimentación conocida en la técnica. Estos componentes son ampliamente conocidos en la técnica y no se describen en detalle en este documento. El dispositivo de limpieza rob3tico 10 incluye adem3s uno o m3s cabezales de limpieza 30. El cabezal de limpieza puede contener un aspirador, varios cepillos, esponjas, fregonas, bayetas electrost3ticas o una combinaci3n de varios elementos de limpieza. La realizaci3n mostrada en la fig. 2 tambi3n incluye un cepillo lateral 32.

- 50 Como se ha mencionado anteriormente, una realizaci3n preferida del dispositivo de limpieza rob3tico 10 comprende una carcasa exterior 15 que define un lado dominante, un lado no dominante y una parte delantera del robot 10. El lado dominante del robot es el lado que se mantiene cerca o en contacto con un objeto (u obst3culo) cuando el robot limpia el 3rea adyacente a ese objeto (u obst3culo). En una realizaci3n preferida, como la mostrada en la fig. 1, el lado dominante del robot 10 es el lado derecho con respecto a la direcci3n principal de desplazamiento, aunque en otras realizaciones el lado dominante puede ser el lado izquierdo. En otras realizaciones adicionales, el robot puede

ser simétrico y, por lo tanto, no necesita un lado dominante; sin embargo, en una realización preferida, un lado dominante se elige por motivos de coste. La dirección principal de desplazamiento es como la mostrada en la fig. 2 mediante la flecha 40.

5 En una realización preferida, dos sensores de choque 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 choque 13 está situado en el lado dominante del robot 10 y el otro sensor de choque 12 está situado en el lado no dominante del robot 10. Cuando ambos sensores de choque 12 y 13 se activan simultáneamente, el robot 10 reconoce un obstáculo en la posición delantera. En otras realizaciones pueden usarse un número mayor o menor de sensores de choque individuales. 10 Asimismo, puede usarse cualquier número de sensores de choque para dividir el dispositivo en cualquier número de segmentos radiales. Aunque en una realización preferida los sensores de choque 12 y 13 son sensores de interrupción de haz IR activados por el contacto entre el robot 10 y un obstáculo, pueden usarse otros tipos de sensores, incluyendo conmutadores mecánicos y sensores capacitivos que detectan la capacitancia de objetos que tocan el robot o entre dos placas metálicas del parachoques que se comprimen con el contacto. También pueden usarse sensores de no contacto, que permiten al robot detectar la proximidad con respecto a los objetos sin tocar físicamente el objeto, tales como sensores capacitivos o una cortina de luz IR. 15

Es útil disponer de un sensor o sensores que puedan indicar no solamente si se ha hecho contacto con una superficie (o si está cerca), sino además el ángulo con respecto al robot en que se ha producido el contacto. En el caso de una realización preferida, el robot puede calcular el tiempo entre la activación de los conmutadores de choque izquierdo y derecho 12 y 13, si ambos están activados. Por tanto, el robot puede estimar el ángulo en que se produjo el contacto. En una realización preferida mostrada en la fig. 4A, el sensor de choque comprende un único parachoques mecánico 44 en la parte delantera del robot con sensores 42 y 43 sustancialmente en los dos extremos del parachoques que detectan el movimiento del parachoques. Cuando el parachoques se comprime, el tiempo transcurrido entre los eventos de sensor se usa para calcular el ángulo aproximado en que el robot hizo contacto con el obstáculo. Cuando el parachoques se comprime desde el lado derecho, el sensor de choque derecho detecta el choque en primer lugar, seguido del sensor de choque izquierdo, debido a la elasticidad del parachoques y la geometría del sensor de choque. De esta manera, el ángulo de choque puede aproximarse solamente con dos sensores de choque. 20 25

Por ejemplo, en la fig. 4A, los sensores de choque 42 y 43 pueden dividir la parte frontal del robot en seis regiones (I - VI). Cuando un sensor de choque se activa, el robot calcula el tiempo antes de que se active el otro sensor (si se activa). Por ejemplo, cuando se activa el sensor de choque derecho 43, el robot mide el tiempo ( $t$ ) antes de que se active el sensor de choque izquierdo 42. Si  $t$  es menor que  $t_1$ , entonces el robot supone que el contacto se ha producido en la región IV. Si  $t$  es mayor que o igual a  $t_1$  y menor que  $t_2$ , entonces el robot supone que el contacto se ha producido en la región V. Si  $t$  es mayor que o igual a  $t_2$  (incluyendo el caso en que el sensor de choque izquierdo 42 no se activa en el tiempo previsto), entonces el robot supone que el contacto se ha producido en la región VI. Si los sensores de choque se activan simultáneamente, el robot supone que el contacto se ha producido por delante. Este procedimiento puede usarse para dividir el parachoques en un número arbitrariamente grande de regiones (para una mayor precisión) dependiendo del tiempo usado y de la geometría del parachoques. Como una ampliación, pueden usarse tres sensores para calcular el ángulo de choque en tres dimensiones en lugar de solamente en dos dimensiones como en el ejemplo anterior. 30 35

40 Una realización preferida también contiene un sensor de seguimiento de pared o de detección de pared 16 montado en el lado dominante del robot 10. En una realización preferida, el sensor de seguimiento de pared es un sensor IR compuesto por un par emisor y detector colimado, de manera que se produce un volumen finito de intersección en la posición esperada de la pared. Este sitio de enfoque está aproximadamente a una distancia de 7,62 cm (3 pulgadas) por delante de la rueda propulsora en la dirección de moción de avance del robot. El alcance radial de la detección de pared es aproximadamente de 1,9 cm (0,75 pulgadas). 45

Una realización preferida también contiene cualquier número de sensores de desnivel IR 14 que impiden que el dispositivo se caiga por unas escaleras u otras caídas verticales. Estos sensores de desnivel tienen una construcción similar a la del sensor de seguimiento de pared pero orientada a observar el suelo en lugar de una pared. Como una medida de seguridad y de detección adicional, el robot 10 incluye un sensor de descenso de rueda que puede detectar si una o más ruedas no están apoyadas en la superficie. Por lo tanto, este sensor de descenso de rueda puede detectar no solamente desniveles, sino también varios obstáculos sobre los cuales puede pasar el robot, tales como bases de lámparas, transiciones a un suelo más elevado, un grupo de cables, etc. 50

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

55 La fig. 3 muestra un diagrama de bloques de hardware del controlador y robot de una realización preferida de la invención. En una realización preferida, se usa un procesador de la serie W78XXX de Winbond. Es un microcontrolador compatible con la familia MCS-51 con 36 puertos de E/S de propósito general, 256 bytes de RAM y 16K de ROM. Está sincronizado a 40 MHz, valor que se reduce para una velocidad de procesador de 3,3 MHz. Tiene

dos temporizadores que se usan para lanzar interrupciones usadas para procesar los sensores y generar señales de salida, así como un temporizador de vigilancia. Los bits menos significativos del temporizador rápido también se usan como números aleatorios aproximados cuando se necesitan en los comportamientos. También hay dos interrupciones externas que se usan para capturar las entradas de codificador de las dos ruedas propulsoras. El procesador también tiene un UART que se usa para probar 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 lo conectan al estado interno del robot y a su entorno. Por ejemplo, los sensores de descenso de rueda están conectados a un puerto de entrada y la señal PWM de motor de cepillo se genera en un puerto de salida. La ROM del microprocesador se usa para almacenar el programa de control y de cobertura del robot. Esto incluye los comportamientos (descritos posteriormente), algoritmos de procesamiento de sensor y generación de señales. La RAM se usa para almacenar el estado activo del robot, tal como la distancia de choque media, el tiempo y distancia de recorrido y el ID del comportamiento en control y sus comandos de motor actuales.

Para un mejor entendimiento del movimiento del dispositivo robótico, la fig. 4B muestra la orientación del robot centrado alrededor de los ejes  $x$  e  $y$  en un plano de coordenadas; este sistema de coordenadas está asociado al robot. El movimiento direccional del robot 10 puede entenderse como el radio en el que se moverá el robot 10. Para girar rápidamente alejándose de la pared 100, el robot 10 debe establecer un pequeño valor positivo de  $r$  ( $r_3$  en la fig. 4B); para girar rápidamente hacia la pared, el robot debe establecer un pequeño valor negativo de  $r$  ( $r_1$  en la fig. 4B). Por otro lado, para realizar pequeños giros, el robot debe establecer valores absolutos más grandes para  $r$ , valores positivos para moverse a la izquierda (es decir, alejándose de la pared,  $r_4$  en la fig. 4B) y valores negativos para moverse a la derecha (es decir, hacia la pared,  $r_2$  en la fig. 4B). Este esquema de coordenadas se usa en los ejemplos de control descritos posteriormente. El microcontrolador 22 que controla la velocidad diferencial a la que se ejecutan los motores de rueda individuales 21 determina el radio de giro.

Además, en determinadas realizaciones, el robot puede incluir una o más entradas de usuario. Por ejemplo, tal y como se muestra en la fig. 2, una realización preferida incluye tres botones simples 33 que permiten al usuario introducir el tamaño aproximado de la superficie que va cubrirse. En una realización preferida, estos botones etiquetados como "pequeño", "mediano" y "grande" corresponden respectivamente a habitaciones de 11,1, 20,8 y 27,9 m<sup>2</sup>.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el robot a modo de ejemplo es una realización preferida para llevar a la práctica la presente invención, y un experto en la técnica puede escoger 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 de Estados Unidos n.<sup>os</sup> 4.306.329 (Yokoi), 5.109.566 (Kobayashi et ál.), 5.293.955 (Lee), 5.369.347 (Yoo), 5.440.216 (Kim), 5.534.762 (Kim), 5.613.261 (Kawakami et ál.), 5.634.237 (Paranjpe), 5.781.960 (Kilstrom et ál.), 5.787.545 (Colens), 5.815.880 (Nakanishi), 5.839.156 (Park et ál.), 5.926.909 (McGee), 6.038.501 (Kawakami), 6.076.226 (Reed), las cuales se incorporan en este documento por referencia.

La fig. 5 muestra una representación de bloques simple 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 una limpieza localizada (donde el usuario o robot designa una región específica para la limpieza), una limpieza de borde y una limpieza de habitación. Cada modo de funcionamiento comprende combinaciones complejas de instrucciones y/o comportamientos internos, descritos posteriormente. Sin embargo, estas complejidades generalmente se ocultan al usuario. En una realización, el usuario puede seleccionar el modo de funcionamiento particular usando un elemento de entrada, por ejemplo, un conmutador selector o un botón pulsador. En otras realizaciones preferidas, como se describe posteriormente, el robot puede circular de manera autónoma en los modos de funcionamiento.

El robot de cobertura de la presente invención usa estos diversos modos de funcionamiento para cubrir el área de manera eficaz. Aunque un experto en la técnica puede implementar estos diversos modos de funcionamiento en una pluralidad de arquitecturas conocidas, una realización preferida se basa en el control de comportamiento. Aquí, los comportamientos son simplemente capas de sistemas de control que se ejecutan en paralelo. Por tanto, el microcontrolador 22 ejecuta un esquema de arbitraje priorizado para determinar el comportamiento dominante para un escenario dado. Una descripción de control de comportamiento puede encontrarse en el documento Mobile Robots, supra.

Dicho de otro modo, en una realización preferida, el microprocesador y el software de control del robot ejecutan simultáneamente una serie de comportamientos. Dependiendo de la situación, el control del robot se asignará a uno o más comportamientos varios. Para un mejor detalle del 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 diseñados principalmente para permitir que el robot lleve a cabo su operación de cobertura de una manera eficaz. Los comportamientos de escape son comportamientos especiales a los que se da prioridad cuando una o más entradas de sensor sugieren que el

robot puede no estar funcionando libremente. A modo de convención para esta memoria descriptiva, los comportamientos descritos a continuación están escritos en letras mayúsculas.

### 1. Comportamientos de cobertura

Las figs. 6 a 14 muestran los detalles de cada uno de los modos de funcionamiento preferidos: cobertura localizada, seguimiento de pared (o seguimiento de obstáculo) y cobertura de habitación.

Modo de funcionamiento: cobertura localizada

La cobertura localizada o, por ejemplo, la limpieza localizada, permite al usuario limpiar una zona aislada sucia. El usuario coloca el robot 10 en el suelo cerca del centro del área que necesita limpiarse y selecciona el modo de funcionamiento de limpieza localizada. Después, el robot se mueve de tal manera que el área inmediata dentro de por ejemplo, un radio definido, entra en contacto con el cabezal de limpieza 30 o con el cepillo lateral 32 del robot.

En una realización preferida, el procedimiento para conseguir la limpieza localizada es un algoritmo de control que proporciona un movimiento en espiral hacia fuera, o comportamiento en ESPIRAL, tal y como se muestra en la fig. 6A. En general, el movimiento en espiral se genera incrementando el radio de giro en función del tiempo. En una realización preferida, el robot 10 comienza su espiral en el sentido opuesto a las agujas del reloj, lo cual se indica en la fig. 6A mediante la línea de movimiento 45, con el fin de mantener el lado dominante en el borde de guiado hacia fuera de la espiral. En otra realización, mostrada en la fig. 6B, el movimiento en espiral del robot 10 se genera hacia dentro, de manera que el radio de los giros decrece. La espiral dirigida hacia dentro se muestra mediante la línea de movimiento 45 de la fig. 6B. Sin embargo, no es necesario mantener el lado dominante del robot en lado externo durante el movimiento en espiral.

El procedimiento de limpieza localizada usado en una realización preferida, movimiento en espiral hacia fuera, se explica en la fig. 7. Una vez que se inicia el movimiento en espiral (etapa 201) y el valor de  $r$  se establece en su valor mínimo positivo (que generará el giro más compacto posible en el sentido opuesto a las agujas del reloj), el comportamiento de movimiento en espiral vuelve a calcular el valor de  $r$  en función de  $\theta$ , donde  $\theta$  representa el giro angular desde el inicio del comportamiento de movimiento en espiral (etapa 210). Utilizando la ecuación  $r = a\theta$ , donde  $a$  es un coeficiente constante, la compacidad o solapamiento deseado de la espiral puede controlarse. (Debe observarse que  $\theta$  no está normalizado a  $2\pi$ ). El valor de  $a$  puede elegirse mediante la ecuación  $a = d/2\pi$ , donde  $d$  es la distancia entre dos pasadas consecutivas de la espiral. Para una limpieza eficaz, el valor de  $d$  debe elegirse de modo que sea menor que el ancho del mecanismo de limpieza 30. En una realización preferida, el valor de  $d$  se selecciona entre la mitad y dos tercios del ancho del cabezal de limpieza 30.

En otras realizaciones, el robot realiza un seguimiento de la distancia total que se ha desplazado en el modo en espiral. Puesto que la espiral se deteriora después de recorrer una distancia determinada, es decir, el punto central del movimiento en espiral tenderá a desplazarse en el transcurso del tiempo debido al resbalamiento de las ruedas dependiente de la superficie y/o a imprecisiones en el cálculo y en el algoritmo de aproximación de espiral. En determinadas realizaciones, el robot puede salir del modo en espiral después de que el robot se haya desplazado una distancia específica ("distancia de espiral máxima"), tal como 6,3 o 18,5 metros (etapa 240). En una realización preferida, el robot usa múltiples distancias de espiral máximas dependiendo de si el robot está realizando una espiral inicial o una espiral posterior. Si se alcanza la distancia de espiral máxima sin ningún choque, el robot activa un comportamiento diferente, y el robot, por ejemplo, continúa su movimiento en una línea predominantemente recta. (En una realización preferida, el comportamiento en LÍNEA RECTA es un comportamiento por defecto de baja prioridad que impulsa al robot en una línea aproximadamente recta a una velocidad preestablecida de 0,306 m/s aproximadamente cuando ningún otro comportamiento está activo).

En el modo en espiral pueden llevarse a cabo varias acciones cuando se encuentra un obstáculo. Por ejemplo, el robot puede (a) procurar evitar el obstáculo y seguir la espiral en el sentido opuesto a las agujas del reloj, (b) procurar evitar el obstáculo y seguir la espiral en el sentido opuesto (por ejemplo, pasando del sentido opuesto a las agujas del reloj al sentido de las agujas del reloj), o (c) cambiar los modos de funcionamiento. Seguir la espiral en el sentido opuesto se conoce como movimiento en espiral reflexivo y está representado en la fig. 6C, donde el robot 10 invierte su trayectoria de desplazamiento 45 cuando hace contacto con el obstáculo 101. En una realización preferida, tal y como se detalla en la etapa 220, el robot 10 sale del modo de limpieza localizada cuando un sensor de choque 12 o 13 encuentra el primer obstáculo.

Aunque una realización preferida describe un movimiento en espiral para una cobertura localizada, puede usarse cualquier área autodelimitada, incluyendo pero sin limitarse a formas de polígonos regulares tales como cuadrados, hexágonos, elipses, etc.

Modo de funcionamiento: seguimiento de pared/obstáculo

5 El seguimiento de pared o, en el caso de un robot de limpieza, la limpieza de borde, permite al usuario limpiar solamente los bordes de una habitación o los bordes de los objetos de una habitación. El usuario coloca el robot 10 en el suelo cerca de un borde que va a limpiarse y selecciona el modo de funcionamiento de limpieza de borde. Después, el robot 10 se desplaza de tal manera que sigue el borde y limpia todas las áreas que hagan contacto con el cabezal de limpieza 30 del robot.

10 El movimiento del robot 10 en una habitación 110 se muestra en la fig. 8. En la fig. 8A, el robot 10 está colocado al lado de una pared 100, estando dispuesto el lado dominante del robot junto a la pared. Después, el robot se traslada a lo largo de la pared de manera indefinida siguiendo la trayectoria de movimiento 46. De manera similar, en la fig. 8B, el robot 10 está colocado cerca de un obstáculo 101. Después, el robot sigue el borde del obstáculo 101 de manera indefinida siguiendo la trayectoria de movimiento 47.

En una realización preferida, en el modo de seguimiento de pared, el robot usa el sensor de seguimiento de pared 16 para situarse a una distancia establecida con respecto a la pared. Después, el robot comienza a desplazarse a lo largo del perímetro de la pared. Tal y como se muestra en las figs. 8A y 8B, en una realización preferida, el robot 10 no puede distinguir entre una pared 100 y otro obstáculo macizo 101.

15 El procedimiento usado en una realización preferida para el seguimiento de una pared se detalla en la fig. 9A y proporciona un funcionamiento de seguimiento de pared suave incluso con un sensor de un bit. (Aquí, el sensor de un bit detecta solamente la presencia o la ausencia de la pared dentro de un volumen particular en lugar de la distancia entre la pared y el sensor). Pueden usarse otros procedimientos para detectar una pared o un objeto, tales como sensores de choque o sensores con sónar.

20 Una vez que se inicia el modo de funcionamiento de seguimiento de pared, o comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED de una realización preferida, (etapa 301), el robot establece en primer lugar su valor inicial para el guiado a  $r_0$ . Después, el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED inicia una rutina de emisión-detección en el sensor de seguimiento de pared 16 (etapa 310). La existencia de una reflexión para la parte de transmisión IR del sensor 16 se traduce en la existencia de un objeto a una distancia predeterminada desde el sensor 16. Después, el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED determina si se ha producido una transición desde una reflexión (objeto dentro del alcance) a una no reflexión (objeto fuera del alcance) (etapa 320). Si se ha producido una transición (dicho de otro modo, la pared está ahora fuera del alcance), el valor de  $r$  se establece en su valor más negativo y el robot rotará ligeramente hacia la derecha (etapa 325). Después, el robot inicia de nuevo la secuencia de emisión-detección (etapa 310). Si no se ha producido una transición desde una reflexión a una no reflexión, entonces el comportamiento de seguimiento de pared determina si se ha producido una transición desde una no reflexión a una reflexión (etapa 330). Si se ha producido tal transición, el valor de  $r$  se establece en su valor más positivo y el robot rotará ligeramente hacia la izquierda (etapa 335).

35 En ausencia de cualquier tipo de evento de transición, el comportamiento de seguimiento de pared reduce el valor absoluto de  $r$  (etapa 340) e inicia de nuevo la secuencia de emisión-detección (etapa 310). Reduciendo el valor absoluto de  $r$ , el robot 10 comienza a girar de manera más brusca en la dirección a la que se dirija actualmente. En una realización preferida, la tasa de reducción del valor absoluto de  $r$  es una tasa constante que depende de la distancia que se ha desplazado.

40 El modo de seguimiento de pared puede continuar durante un tiempo predeterminado o aleatorio, una distancia predeterminada o aleatoria o hasta que se cumplan algunos criterios adicionales (por ejemplo, que el sensor de choque se active, etc.). En una realización, el robot continúa siguiendo la pared de manera indefinida. En una realización preferida, tal y como se muestra en las figs. 8C y 8D, se determinan una distancia de movimiento mínima y una distancia de movimiento máxima, por lo que el robot permanecerá en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED hasta que el robot se haya desplazado la distancia máxima (fig. 8D) o se haya desplazado al menos la distancia mínima y haya encontrado un obstáculo (fig. 8C). Esta implementación del comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED garantiza que el robot permanezca en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED durante una cantidad de tiempo apropiada en comparación con sus otros modos de funcionamiento, reduciendo de ese modo omisiones sistemáticas y distribuyendo la cobertura a todas las áreas. Incrementando el seguimiento de pared, el robot puede moverse en más espacios, pero el robot es menos eficaz a la hora de limpiar los mismos. Además, la tendencia de salir del comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED después de detectar un obstáculo hace que el robot aumente su efectividad percibida.

55 La fig. 9B es una ilustración de un diagrama de flujo que muestra esta realización de determinar cuándo salir del comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED. El robot determina en primer lugar la distancia mínima de seguimiento de pared ( $d_{min}$ ) y la distancia máxima de seguimiento de pared ( $d_{max}$ ). Durante el modo de seguimiento de pared (u obstáculo), el sistema de control localiza la distancia que el robot se ha desplazado en ese modo ( $d_{SP}$ ). Si  $d_{SP}$  es mayor que  $d_{max}$  (etapa 350), entonces el robot sale del modo de seguimiento de pared (etapa 380). Sin embargo, si  $d_{SP}$  es menor que  $d_{min}$  (etapa 350) y  $d_{SP}$  es menor que  $d_{max}$  (etapa 360), el robot permanece en el modo

de seguimiento de pared (etapa 385). Si  $d_{SP}$  es mayor que  $d_{min}$  (etapa 360) y se encuentra un obstáculo (etapa 370), el robot sale del modo de seguimiento de pared (etapa 380).

En teoría, la distancia óptima en la que se desplaza el robot en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED se determina en función del tamaño y la configuración de la habitación y del tamaño del robot. En una realización preferida, las distancias mínima y máxima para permanecer en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED se establecen en función del tamaño aproximado de la habitación, del ancho del robot y de un componente aleatorio, por lo que la distancia de desplazamiento promedio mínima es  $2w/p$ , donde  $w$  es el ancho del elemento de trabajo del robot y  $p$  es la probabilidad de que el robot entre en el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED en una interacción dada con un obstáculo. A modo de ejemplo, en una realización preferida, el valor de  $w$  está comprendido entre 15 cm y 25 cm aproximadamente, y  $p$  es 0,095 (donde el robot se encuentra número de obstáculos que varía entre 6 y 15, o con una media de 10,5 obstáculos, antes de entrar en el modo de seguimiento de obstáculo). Por tanto, la distancia mínima se establece de manera aleatoria como una distancia comprendida aproximadamente entre 115 cm y 350 cm; por tanto, la distancia máxima se establece de manera aleatoria como una distancia entre aproximadamente 170 cm y 520 cm. En determinadas realizaciones, la relación entre la distancia mínima con respecto a la distancia máxima es de 2:3. Para una mayor efectividad percibida, el funcionamiento inicial del robot en el modo de seguimiento de obstáculo puede establecerse para que tenga una duración mayor que los funcionamientos posteriores del modo de seguimiento de obstáculo. Además, los usuarios pueden colocar el robot junto a la pared más larga al encender el robot, lo que mejora la cobertura real como la percibida.

La distancia que el robot se desplaza en el modo de seguimiento de pared también puede establecerse por el robot dependiendo del número y la frecuencia de los objetos encontrados (determinado por otros sensores), lo que es una medida del "desorden" de una habitación. Si se encuentran más objetos, el robot seguirá la pared en una mayor distancia con el fin de pasar por todas las zonas del suelo. Por el contrario, si se encuentran pocos obstáculos, el robot seguirá la pared menos con el fin de no cubrir excesivamente los bordes del espacio y, en su lugar, pasará por el centro del espacio. También puede incluirse una distancia inicial de seguimiento de pared para permitir que el robot siga la pared en una distancia más larga o más corta durante su periodo inicial cuando el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED está activo.

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

En determinadas realizaciones, cuando el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED está activo y se produce un choque, se activa el comportamiento de ALINEACIÓN. El comportamiento de ALINEACIÓN hace girar el robot en el sentido opuesto a las agujas del reloj para alinear el robot con la pared. El robot siempre gira en un ángulo mínimo para evitar que el robot entre en ciclos de muchos giros pequeños. Después de que haya girado en un ángulo mínimo, el robot supervisa el sensor de pared y si detecta una pared y después la detección de la pared desaparece, el robot deja de girar. Esto se debe a que en el extremo del alcance de seguimiento de pared, el robot está bien alineado para iniciar el comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED. Si el robot no ha observado que el sensor de pared se ha activado y después se ha desactivado en el instante en que alcanza su ángulo máximo, se para de todos modos. Esto impide que el robot gire en círculos cuando la pared está fuera del alcance de su sensor de pared. Cuando el choque más reciente se produce en un grado no superior a  $60^\circ$  del parachoques en el lado dominante, el ángulo mínimo se establece en 14 grados y el ángulo máximo es de 19 grados. En caso contrario, si el choque se produce en un grado no superior a  $30^\circ$  delante del parachoques 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 ALINEACIÓN ha finalizado el giro, cede el control al comportamiento de SEGUIMIENTO DE PARED.

Modo de funcionamiento: cobertura de habitación

El tercer modo de funcionamiento se denomina en este documento como modo de cobertura de habitación o modo de limpieza de habitación, el cual permite al usuario limpiar cualquier zona delimitada por paredes, escaleras, obstáculos u otras barreras. Para llevar a cabo esta opción, el usuario coloca el robot en el suelo y selecciona el modo de limpieza de habitación. Después, el robot se mueve por la habitación limpiando todas las zonas a las que puede llegar.

En una realización preferida, el procedimiento para llevar a cabo el comportamiento de limpieza de habitación es un comportamiento de REBOTE en combinación con el comportamiento de LÍNEA RECTA. Como se muestra en la fig. 10, el robot 10 se desplaza hasta que se activa un sensor de choque 12 y/o 13 mediante el contacto con un obstáculo 101 o una pared 100. Después, el robot 10 gira y continúa su desplazamiento. En la fig. 11 se muestra una trayectoria de movimiento de muestra mediante la línea 48.

El algoritmo para el comportamiento de rebote aleatorio se expone en la fig. 10. El robot 10 sigue su movimiento de avance (etapa 401) hasta que se activa un sensor de choque 12 y/o 13 (etapa 410). Después, el robot 10 calcula un

alcanse aceptable de nuevas direcciones en función de una determinación de qué sensor o sensores de choque se han activado (etapa 420). Después se toma una determinación con algún cálculo aleatorio para elegir la nueva dirección dentro del alcance aceptable, tal como entre 90 y 270 grados con respecto al objeto que el robot ha encontrado. El ángulo del objeto con el que ha chocado el robot se determina tal y como se ha descrito anteriormente usando el tiempo transcurrido entre el sensor de choque izquierdo y el derecho. Después, el robot gira hacia su nueva dirección. En una realización preferida, el giro se realiza en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario a las agujas del reloj dependiendo de qué sentido requiere el mínimo movimiento para llegar a la nueva dirección. En otras realizaciones, el giro va acompañado de un movimiento de avance con el fin de aumentar la eficacia de cobertura del robot.

10 Las estadísticas de la elección de dirección tomada por el robot pueden distribuirse de manera uniforme a través de las direcciones permitidas, es decir, hay una posibilidad equivalente para cualquier dirección dentro del alcance aceptable. Como alternativa, pueden elegirse estadísticas basadas en una función de una distribución gaussiana u otra distribución diseñada para alejar preferentemente el robot con respecto a una pared de manera perpendicular.

15 En otras realizaciones, el robot puede cambiar las direcciones en momentos aleatorios o predeterminados y sin basarse en la actividad de sensores externos. Como alternativa, el robot puede realizar de manera continua pequeñas correcciones de ángulo basándose en sensores de gran alcance para evitar entrar en contacto con un objeto y, por lo tanto, cubrir el área de superficie con trayectorias curvas.

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

## 20 2. Comportamientos de escape

El robot puede encontrarse con varias situaciones cuando intenta cubrir un área que le impiden o imposibilitan cubrir toda el área de manera eficaz. Una clase general de sensores y comportamientos denominados comportamientos de escape están diseñados para hacer que el robot salga de estas situaciones, o en casos extremos para que el robot se apague si se determina que no puede escapar. Con el fin de decidir si dar prioridad a un comportamiento de escape entre los diversos comportamientos del robot, el robot determina lo siguiente: (1) se necesita un comportamiento de escape; (2) si es así, ¿qué comportamiento de escape se debe autorizar?

A modo de ejemplo, las siguientes situaciones ilustran situaciones en las que se necesita un comportamiento de escape para un robot de limpieza en espacios cerrados y el comportamiento apropiado que se ha de ejecutar:

- 30 (i) Situación 1. El robot detecta una situación en la que puede quedar atrapado (por ejemplo, un punto elevado de 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 pequeños giros de "pánico" para salir de esta situación;
- 35 (ii) Situación 2. El robot está físicamente atrapado (por ejemplo, el robot está encajado debajo de un sofá o contra una pared, enganchado en cables o en borlas de una alfombra, o atrapado en una pila de cables eléctricos con sus ruedas dando vueltas). El robot lleva a cabo comportamientos de grandes giros de pánico y apaga los motores pertinentes para escapar de la obstrucción;
- (iii) Situación 3. El robot está dentro de un área pequeña confinada, por ejemplo, el robot está entre las patas de una silla o en una zona abierta debajo de una cómoda, o en un área pequeña creada al colocar una lámpara cerca de la esquina de una habitación. El borde del robot sigue usando el parachoques y/o lleva a cabo comportamientos de giros de pánico para salir del área; y
- 40 (iv) Situación 4. El robot ha quedado atrapado y no puede liberarse por sí mismo; por ejemplo, el robot está en uno de los casos de la categoría (ii) anterior, y no ha podido liberarse por sí mismo con alguno de sus comportamientos de pánico. En este caso, el robot detiene el funcionamiento y solicita ayuda al usuario mediante señales. Esto conserva la vida útil de la batería e impide que se dañe el suelo o los muebles.

Con el fin de detectar la necesidad para cada situación de escape, se usan varios sensores. Por ejemplo:

- 45 (i) Situación 1. (a) Cuando la corriente del cepillo o del cepillo lateral supera un umbral, la tensión aplicada al motor pertinente se reduce. Cuando esto sucede, se incrementa una variable de tasa de calado. Cuando la corriente está por debajo del umbral, la tasa de calado se reduce. Si el nivel de calado supera un umbral bajo y la pendiente de la tasa es positiva, el robot lleva a cabo comportamientos de pequeños giros de pánico. Solo repite estos comportamientos de pequeños giros de pánico cuando el nivel ha vuelto a cero y aumenta de nuevo hacia el umbral. (b) Asimismo, hay una variable de nivel de descenso de rueda que se incrementa cuando se detecta un evento de descenso de rueda y que se reduce de manera constante en el tiempo. Cuando se detecta un evento de descenso de rueda y el nivel de descenso de rueda está por encima de un umbral (lo que significa que se han producido recientemente varios
- 50

descensos de rueda), el robot lleva a cabo comportamientos de pequeños o grandes giros de pánico dependiendo del nivel de descenso de rueda.

- 5 (ii) Situación 2. (a) Cuando la tasa de calado del cepillo supera un umbral elevado y la pendiente es positiva, el robot apaga el cepillo durante 13 segundos y lleva a cabo comportamientos de grandes giros de pánico en los segundos 1, 3 y 7. Al final de los 13 segundos, el cepillo vuelve a activarse. (b) Cuando la tasa de calado de accionamiento supera un umbral medio y la pendiente es positiva, el robot lleva a cabo de manera continua comportamientos de grandes giros de pánico. (c) Cuando la tasa de calado del accionamiento supera un umbral elevado, el robot apaga todos los motores durante 15 segundos. Al final de los 15 segundos, los motores vuelven a encenderse. (d) Cuando el parachoques del robot se presiona de manera constante durante 5 segundos (como en una situación de encajonamiento lateral), el robot lleva a cabo un comportamiento de grandes giros de pánico. Repite el comportamiento de giros de pánico cada 5 segundos hasta que el parachoques queda liberado. (e) Cuando el robot no ha sufrido ningún choque durante una distancia de 6,10 metros (20 pies), supone que puede estar atrapado con las ruedas dando vueltas. Para liberarse a sí mismo, realiza una espiral. Si aun así no ha sufrido ningún choque en una distancia de 3,05 metros (10 pies) después del final de la espiral, lleva a cabo un comportamiento de grandes giros de pánico. Continúa con esto cada 3,05 metros (10 pies) hasta que sufra un choque.
- 10
- 15
- 20 (iii) Situación 3. (a) Cuando la distancia media entre los choques cae por debajo de un umbral bajo, el robot lleva a cabo un seguimiento de borde usando su parachoques para intentar escapar del área confinada. (b) Cuando la distancia media entre los choques cae por debajo de un umbral muy bajo, el robot lleva a cabo comportamientos de grandes giros de pánico para orientarse y poder escapar mejor del área confinada.
- 25 (iv) Situación 4. (a) Cuando el cepillo se ha calado y se ha apagado varias veces recientemente y la tasa de calado del cepillo es alta y la pendiente es positiva, el robot se apaga. (b) Cuando el accionamiento se ha calado y los motores se han apagado varias veces recientemente y la tasa de calado de accionamiento es alta y la pendiente es positiva, el robot se apaga. (c) Cuando cualquiera de las ruedas desciende de manera continua durante más de 2 segundos, el robot se apaga. (d) Cuando se producen muchos eventos de descenso de rueda en un corto espacio de tiempo, el robot se apaga. (e) Cuando cualquiera de los sensores de desnivel detecta un desnivel de manera continua durante 10 segundos, el robot se apaga. (f) Cuando el sensor de choque se presiona de manera constante durante una determinada cantidad de tiempo, por ejemplo 10 segundos, es probable que el robot esté encajado, y el robot se apaga.
- 30

Como un ejemplo descriptivo, las fig. 12A y 12B ilustran el análisis usado en una realización preferida para identificar la necesidad de un comportamiento de escape con respecto a un motor de cepillo calado, como se ha descrito anteriormente en las situaciones 1, 2 y 4. Cada vez que la corriente del cepillo supera un límite dado para el motor del cepillo (etapa 402), un registro de tasa se incrementa en 1 (etapa 404); si no se detecta el límite, el registro de tasa disminuye en 1 (etapa 406). Un registro de pendiente independiente almacena los valores recientes de un periodo de tiempo reciente, tal como 120 ciclos. Si la tasa es superior a 600 (donde 600 corresponde a un segundo de calado 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 habilitado (etapa 418). Los comportamientos de escape se inhabilitan después de ejecutarse (etapa 428) hasta que la tasa haya vuelto a cero (etapa 422), se habilite de nuevo (etapa 424) y ascienda nuevamente a 600. Esto se realiza para evitar que el comportamiento de escape se desencadene constantemente a tasas superiores a 600.

35

40

Sin embargo, si la tasa es mayor que 2400 (etapa 410) y la pendiente es positiva (etapa 412), el robot llevará a cabo un conjunto especial de comportamientos de escape, mostrado en la fig. 12B. En una realización preferida, el motor del cepillo se apagará (etapa 430), el "nivel" se incrementa en una cantidad predeterminada (entre 50 y 90) (etapa 430), se establece el tiempo de calado (etapa 430) y se lleva a cabo un comportamiento de pánico (452) en el segundo 1 (etapa 445), a los 4 segundos (etapa 450) y a los 7 segundos (etapa 455) desde que se apagó el cepillo. Después el sistema de control reinicia el cepillo a los 13 segundos (etapas 440 y 442). El nivel se reduce en 1 cada segundo (etapa 444). Si el nivel alcanza un umbral máximo (etapa 435), el robot suspende toda operación (etapa 437). Además, el robot puede realizar acciones adicionales cuando se detectan determinados calados, tal como limitar la tensión aplicada al motor para impedir que se dañe el motor.

45

50

Una realización preferida del robot tiene cuatro comportamientos de escape: GIRO, BORDE, DESCENSO DE RUEDA y LENTO.

GIRO. El robot gira sobre sí mismo en un sentido aleatorio, comenzando a una velocidad más alta (aproximadamente el doble de la velocidad de giro normal) y disminuyendo hasta una velocidad inferior (aproximadamente la mitad de la velocidad de giro normal). Variar la velocidad puede ayudar al robot a escapar de varias situaciones. El ángulo en que el robot debe girar puede ser aleatorio o determinarse en función del grado de

55

escape necesario, o ambos. En una realización preferida, en situaciones de bajo nivel de pánico, el robot puede girar entre 45 90 grados, y en situaciones de gran nivel de pánico el robot puede girar entre 90 y 270 grados.

5 BORDE. El robot sigue el borde usando el sensor de choque hasta que (a) el robot gire 60 grados sin sufrir ningún choque o (b) el robot haya girado de manera acumulativa más de 170 grados desde que se inició el comportamiento de BORDE. El comportamiento de BORDE puede ser útil si la distancia media de choque es baja (pero no tan baja como para provocar un comportamiento de pánico). El comportamiento de BORDE le permite al robot adaptarse a las aberturas más pequeñas físicamente posibles para el robot y, por lo tanto, también permite que el robot escape de áreas confinadas.

10 DESCENSO DE RUEDA. El robot da marcha atrás a las ruedas brevemente y después las detiene. La marcha atrás de las ruedas ayuda a minimizar falsos descensos de rueda positivos dando a las ruedas un pequeño impulso en el sentido opuesto. Si el descenso de rueda ha desaparecido en menos de 2 segundos, el robot continúa con su funcionamiento normal.

LENTO. Si un sensor de descenso de rueda o de desnivel se dispara, el robot reduce su velocidad hasta 0,235 m/s (o el 77 % de su velocidad normal) durante una distancia de 0,5 m y después recupera su velocidad normal.

15 Además de los comportamientos de cobertura y de los comportamientos de escape, el robot también puede contener comportamientos adicionales relacionados con la seguridad o el uso. Por ejemplo, si se detecta un desnivel durante más de una cantidad de tiempo predeterminada, el robot puede apagarse. Cuando se detecta un desnivel por primera vez, el comportamiento de respuesta de evitación de desnivel toma una preferencia inmediata sobre todos los demás comportamientos, haciendo que el robot rote alejándose del desnivel hasta que el robot ya no detecte el desnivel. En una realización preferida, la detección de desnivel no provoca un cambio en los modos de funcionamiento. En otras realizaciones, el robot puede usar un algoritmo similar al comportamiento de seguimiento de pared para permitir el seguimiento del desnivel.

20

Anteriormente se ha descrito el funcionamiento individual de los tres modos de funcionamiento; a continuación se hace referencia al modo de conmutación preferido entre los diversos modos.

25 Con el fin de conseguir una eficacia de limpieza y de cobertura óptima, una realización preferida usa un programa de control que da prioridad a varios comportamientos de cobertura. (Los comportamientos de escape, si fueran necesarios, siempre tienen mayor prioridad). Por ejemplo, el robot 10 puede usar el modo de seguimiento de pared durante un periodo de tiempo especificado o aleatorio y después conmutar a modos de funcionamiento relacionados con la limpieza de una habitación. Al conmutar entre los modos de funcionamiento, el dispositivo robótico de la presente invención puede aumentar la eficacia de cobertura y de limpieza y la efectividad percibida.

30

A modo de ejemplo, las figs. 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 prácticamente idénticas están conectadas por un corredor estrecho 105. (Este ejemplo ilustra el problema de difusión de robot mencionado más arriba). Esta disposición es una versión simplificada de entornos domésticos típicos, donde el "hueso de perro" puede generarse mediante la disposición de obstáculos de la habitación. En la fig. 13A, la trayectoria del robot 10 se localiza como la línea 54 cuando el robot 10 funciona en el modo de rebote aleatorio. El robot 10 no puede ir de la habitación 116 a la 115 durante una ejecución limitada ya que el comportamiento aleatorio del robot no hizo que el robot atravesara el corredor 105. Este procedimiento hace que la cobertura sea mucho menos que óptima y que la tasa de limpieza se reduzca debido al número de veces que el robot 10 atraviesa su propia trayectoria.

35

40 La fig. 13B muestra el movimiento en una realización preferida del robot 10, mediante la cual el robot circula entre los comportamientos de REBOTE y de SEGUIMIENTO DE PARED. Cuando el robot sigue la trayectoria 99, cada vez que el robot 10 se encuentra una pared 100, el robot sigue la pared en una distancia igual al doble del diámetro del robot. Las partes de la trayectoria 99 en las que el robot 10 funciona en el modo de seguimiento de pared están etiquetadas 51. Este procedimiento proporciona una cobertura considerablemente mayor, junto con incrementos intrínsecos en la tasa de limpieza y en la efectividad percibida.

45

Finalmente, una realización preferida de la presente invención se detalla en la fig. 14, en la que se usan los tres modos de funcionamiento. En una realización preferida, el dispositivo 10 comienza en el modo en espiral (línea de movimiento 45). Si se usa un patrón en espiral reflexivo, el dispositivo continúa en el modo en espiral hasta que se haya producido un número aleatorio o predeterminado de eventos reflexivos. Si se usa una espiral estándar (como se muestra en la fig. 14), el dispositivo debe continuar hasta cualquier evento de sensor de choque. En una realización preferida, el dispositivo entra inmediatamente en el modo de seguimiento de pared después del evento de desencadenamiento.

50

En una realización preferida, el dispositivo conmuta después entre el modo de seguimiento de pared (líneas de movimiento 51) y modos de rebote aleatorio (líneas de movimiento 48) en función de eventos de sensor de choque o

tras la finalización del algoritmo de seguimiento de pared. En una realización, el dispositivo no vuelve al modo en espiral; sin embargo, en otras realizaciones el dispositivo puede entrar en el modo en espiral basándose en un evento predeterminado o aleatorio.

- En una realización preferida, el robot mantiene un registro de la distancia media desplazada entre choques.
- 5 Después, el robot calcula una distancia de choque media (ABD) usando la siguiente fórmula:  $(3/4 \times ABD) + (1/4 \times \text{distancia más reciente entre choques})$ . Si la ABD está por encima de un umbral predeterminado, el robot dará de nuevo prioridad al comportamiento en ESPIRAL. En otras realizaciones adicionales, el robot puede tener un número mínimo de eventos de choque antes de dar prioridad de nuevo al comportamiento en ESPIRAL. En otras realizaciones, el robot puede entrar en el comportamiento en ESPIRAL si se desplaza una distancia máxima, por ejemplo 6,10 metros (20 pies), sin producirse un evento de choque.
- 10

Además, el robot también puede tener condiciones para detener todos los funcionamientos. Por ejemplo, para un tamaño de habitación dado, que puede seleccionarse manualmente, se establece un tiempo de ejecución mínimo y máximo y se selecciona una distancia total mínima. Cuando el tiempo mínimo y la distancia mínima se han alcanzado, el robot se apaga. Asimismo, si se ha alcanzado el tiempo máximo, el robot se apaga.

- 15 Por supuesto, también puede usarse un control manual para seleccionar entre modos de funcionamiento. Por ejemplo, un control remoto puede usarse para cambiar o influir en los modos o comportamientos de funcionamiento. Asimismo, un conmutador montado en la carcasa puede usarse para establecer el modo de funcionamiento o conmutar entre los modos. Por ejemplo, un conmutador puede usarse para establecer el nivel de desorden de una habitación para conceder al robot un algoritmo de cobertura más apropiado con una capacidad de detección limitada.
- 20 Un experto en la técnica reconocerá que partes de la presente invención pueden usarse en vehículos autónomos para una serie de fines, aparte de limpieza. El alcance de la invención debe determinarse por las reivindicaciones adjuntas y sus equivalentes legales, en lugar de por los ejemplos dados.

**REIVINDICACIONES**

- 1.- Un robot móvil (10), que comprende:
- (a) medios para mover el robot (10) sobre una superficie;
- (b) un sensor de detección de obstáculos (12, 13);
- 5 (c) y un sistema de control conectado de manera operativa a dicho sensor de detección de obstáculos (12, 13) y a dichos medios de movimiento;
- (d) estando configurado dicho sistema de control para hacer funcionar el robot (10) en una pluralidad de modos, comprendiendo dicha pluralidad de modos: un modo de seguimiento de obstáculo mediante el cual dicho robot (10) se desplaza de manera adyacente a un obstáculo, y un modo de rebote mediante el cual el robot (10) se desplaza
- 10 sustancialmente en una dirección alejándose de un obstáculo después de encontrarse un obstáculo, caracterizado por que el robot móvil (10) comprende además sensores de desnivel (14) que impiden que el robot móvil (10) se caiga por unas escaleras u otras caídas verticales, un sensor de descenso de rueda que puede detectar si una o más ruedas no están apoyadas en la superficie.
- 15 2.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 1, mediante el cual dicho sistema de control está configurado para alternar en dicho modo de seguimiento de obstáculo después de un número predeterminado de interacciones de sensor.
- 3.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 2, en el que dicho número predeterminado de interacciones de sensor se determina de forma aleatoria.
- 20 4.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 2, en el que dicho número predeterminado de interacciones de sensor está entre aproximadamente 5 y aproximadamente 15.
- 5.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho sistema de control está configurado para alternar en dicho modo de rebote después de que el robot (10) se desplace una distancia predeterminada en dicho modo de seguimiento de obstáculo.
- 25 6.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho sistema de control está configurado para alternar en dicho modo de rebote cuando bien el robot (10) se ha desplazado una distancia máxima o el robot (10) se ha desplazado una distancia mínima y se haya encontrado un obstáculo.
- 7.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 6, en el que dicha distancia mínima es al menos 115 cm.
- 8.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 7, en el que dicha distancia máxima es menor que 520 cm.
- 30 9.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el sistema de control alterna modos de funcionamiento basados en la distancia que se ha desplazado dicho robot (10).
- 10.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende además un medio para determinar el nivel de desorden.
- 35 11.- Un robot móvil (10) según la reivindicación 10, en el que dicho medio para determinar el nivel de desorden comprende localizar el número de interacciones con obstáculos a lo largo del tiempo.
- 12.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el sistema de control alterna entre modos de funcionamiento en función de una ausencia de entrada de sensor.
- 40 13.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que el robot móvil (10) usa un sensor de seguimiento de obstáculo en el modo de seguimiento de obstáculo para posicionarse en una distancia establecida con respecto a un obstáculo.
- 14.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, mediante el cual dicho sistema de control está configurado para reducir la velocidad del robot cuando se detecta un desnivel.
- 15.- Un robot móvil (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, mediante el cual dicho robot (10) usa la tasa de eventos de sensor de descenso de rueda como entrada para dicho sistema de control.

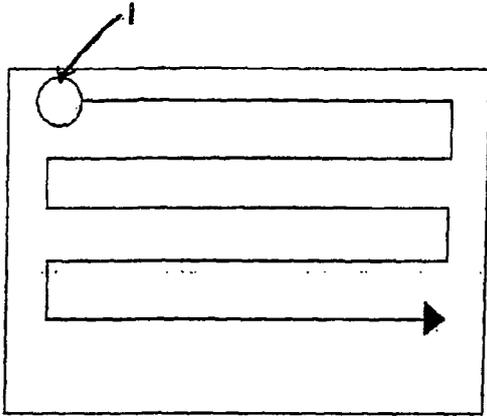


FIG. 1A

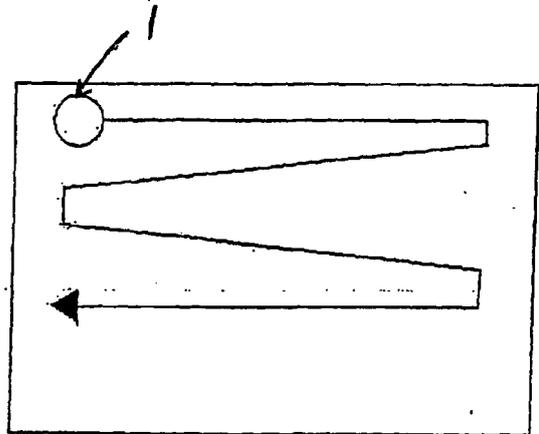


FIG. 1B

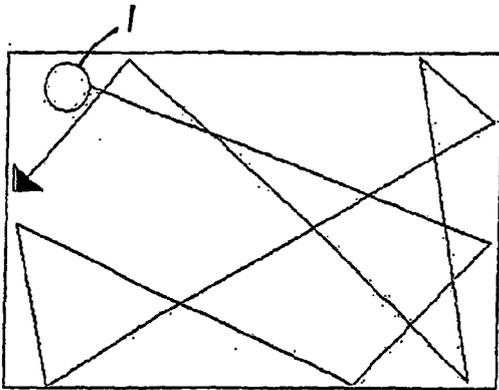


FIG. 1C

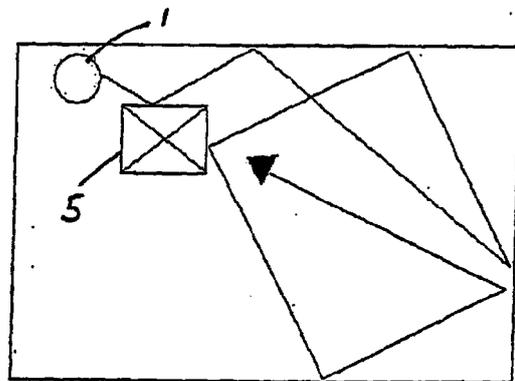


FIG. 1D

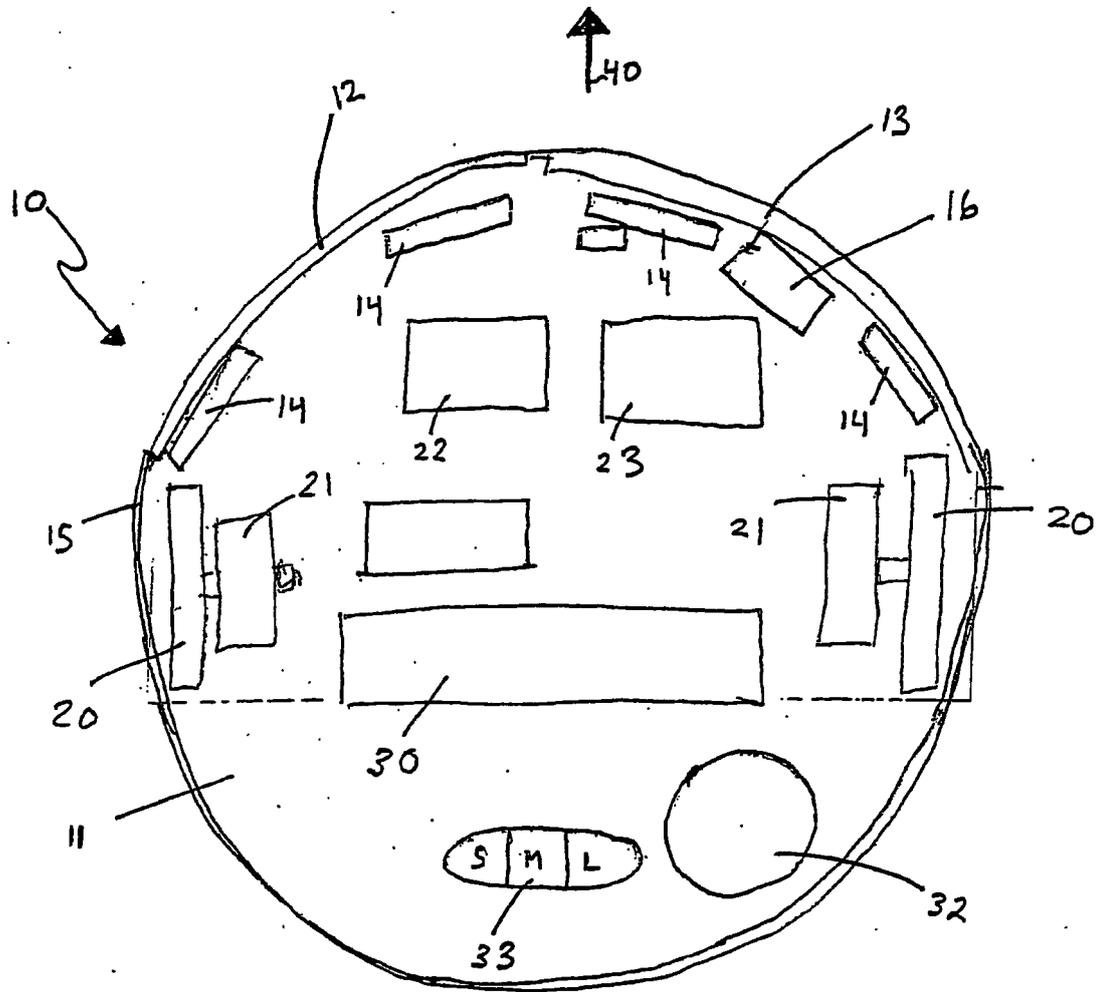
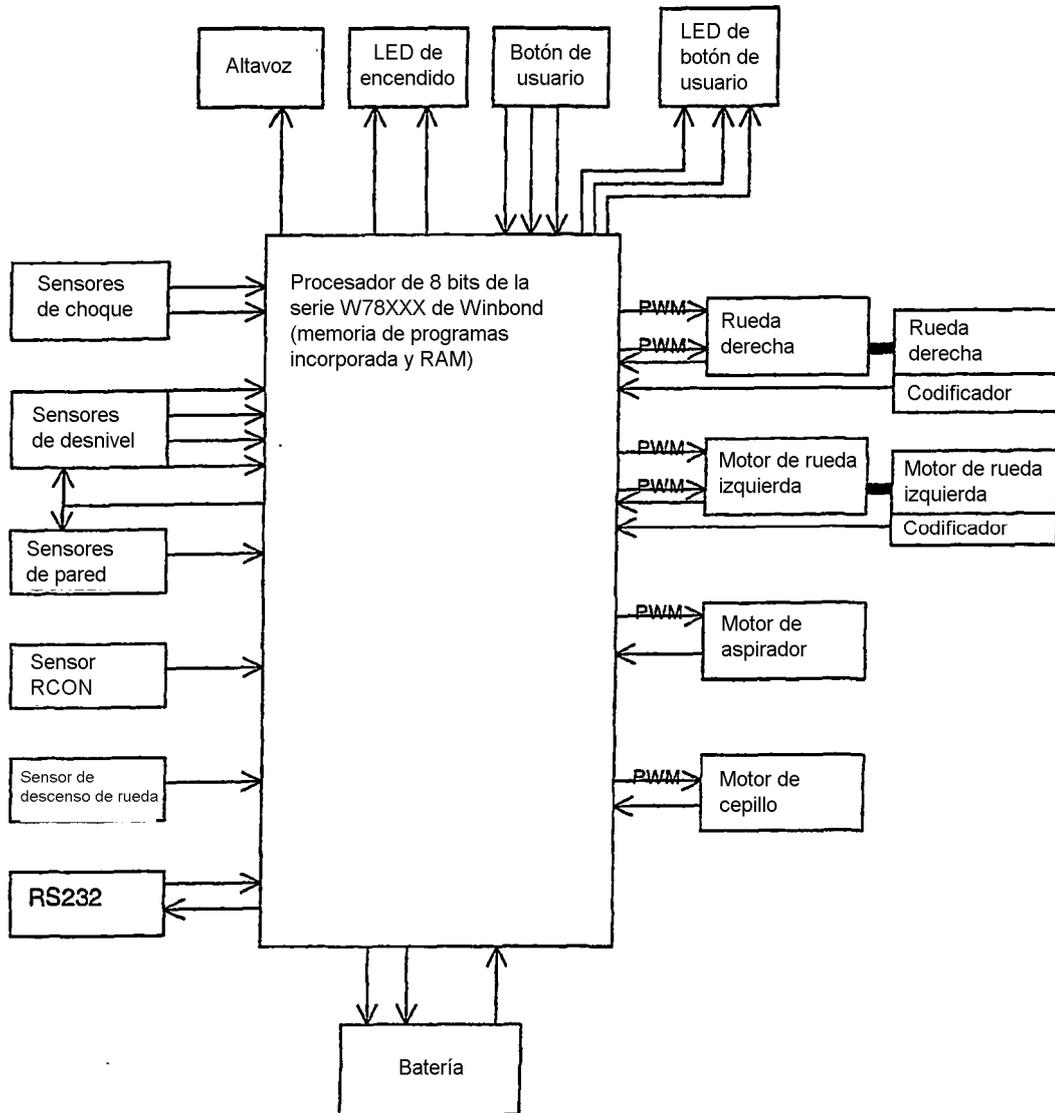
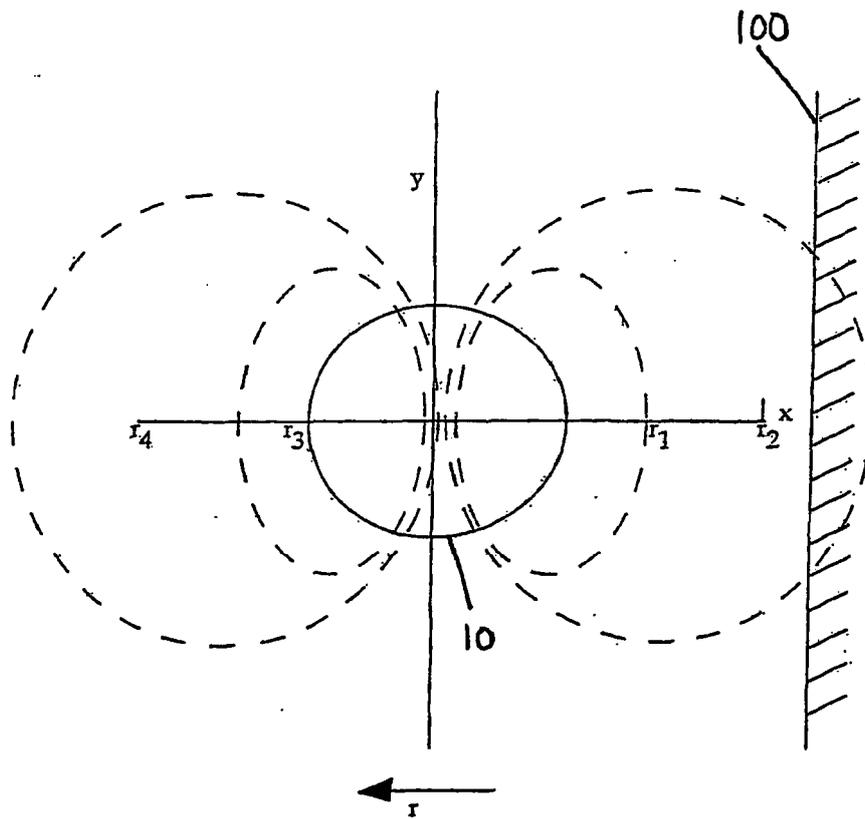
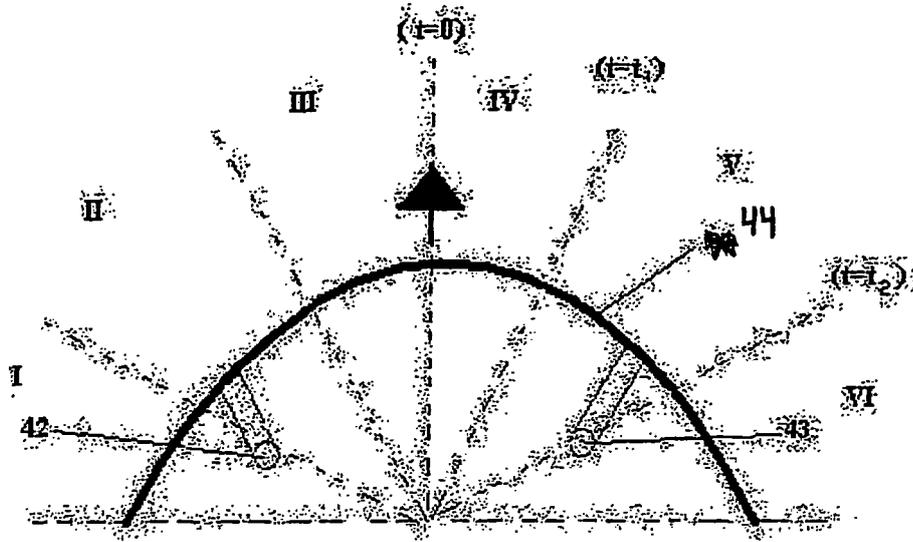


FIG. 2

FIG. 3





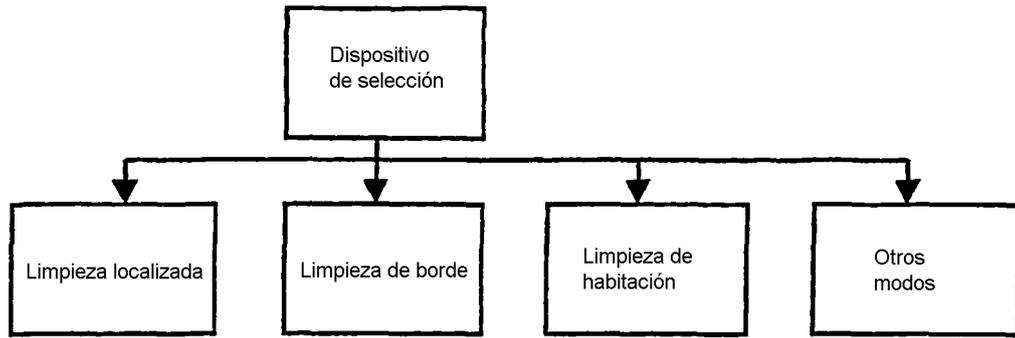


FIG. 5

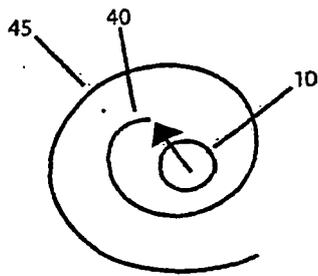


FIG. 6A

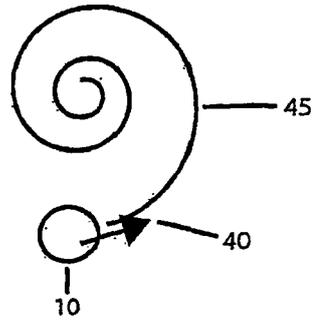


FIG. 6B

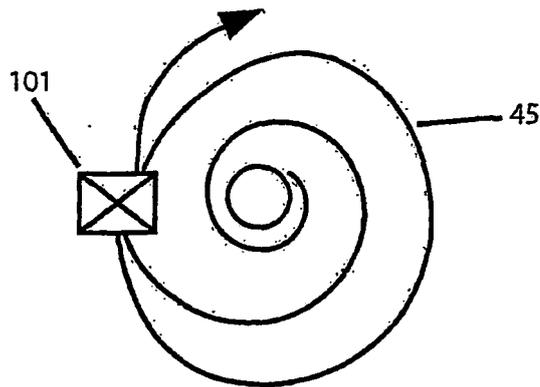


FIG. 6C

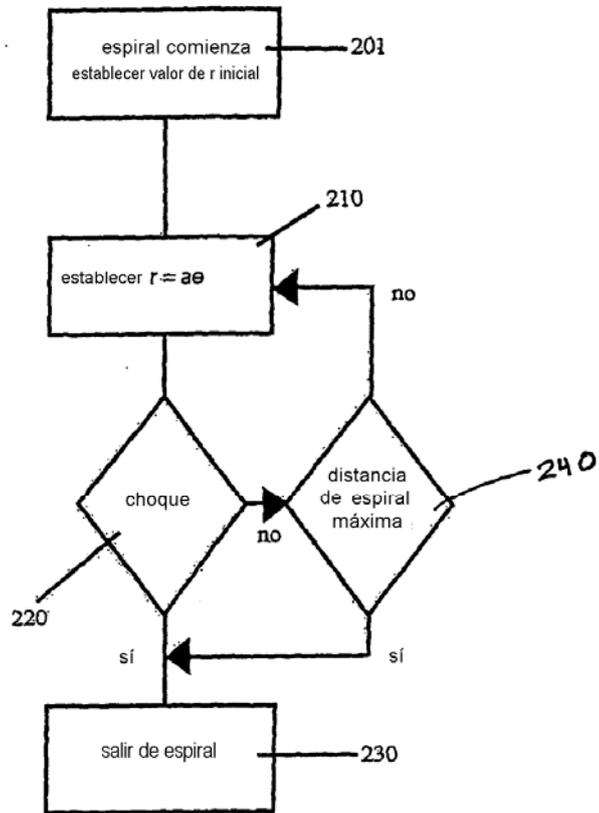


FIG. 7

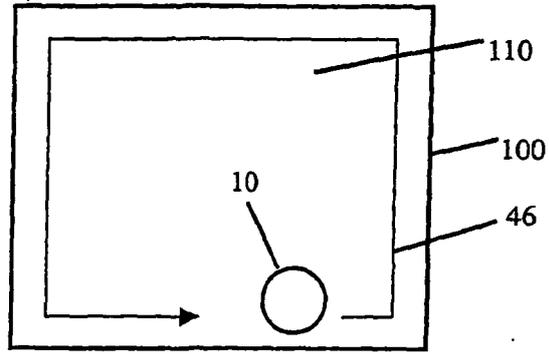


FIG. 8A

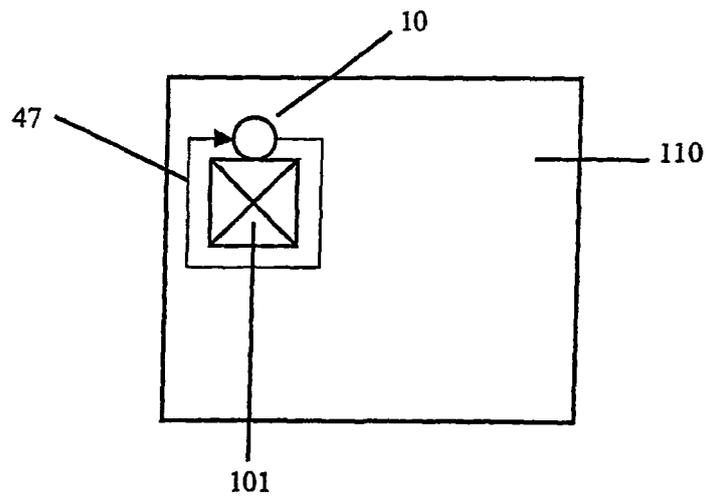
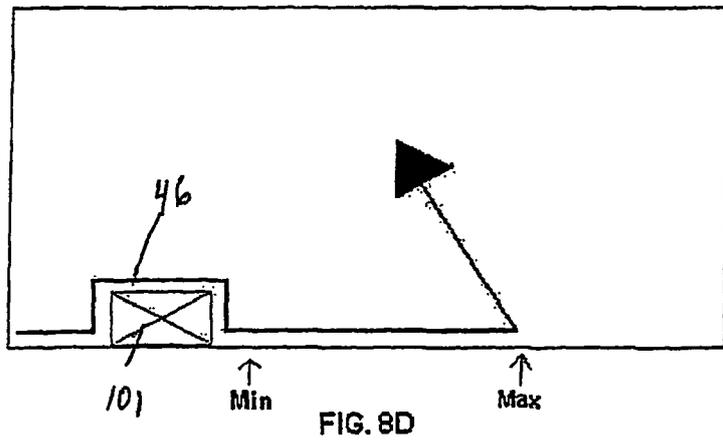
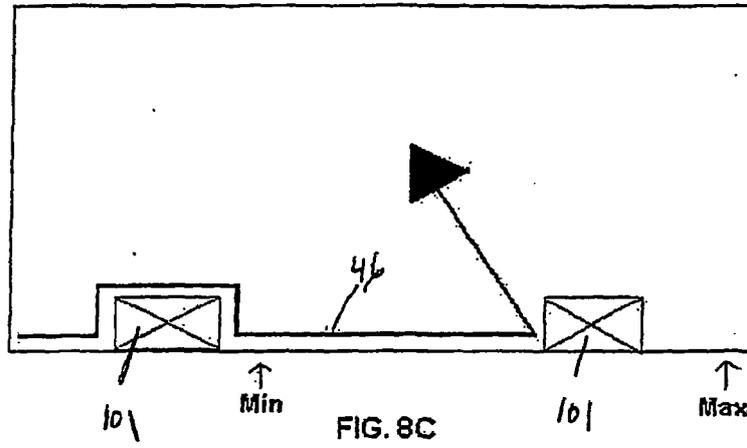


FIG. 8B



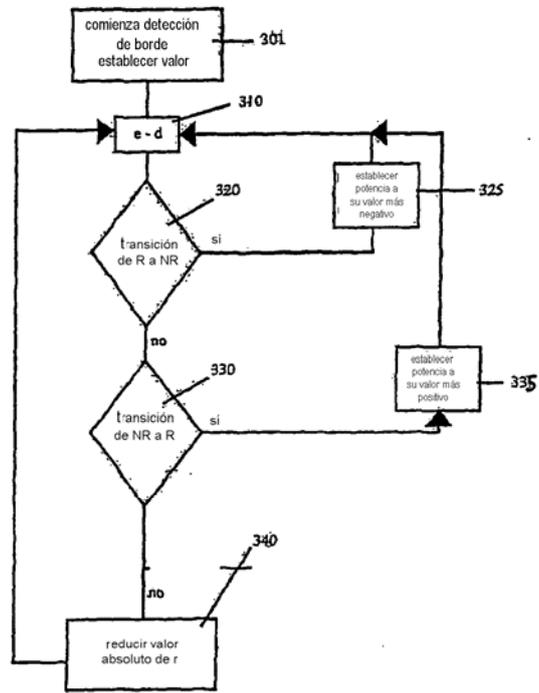


FIG. 9A

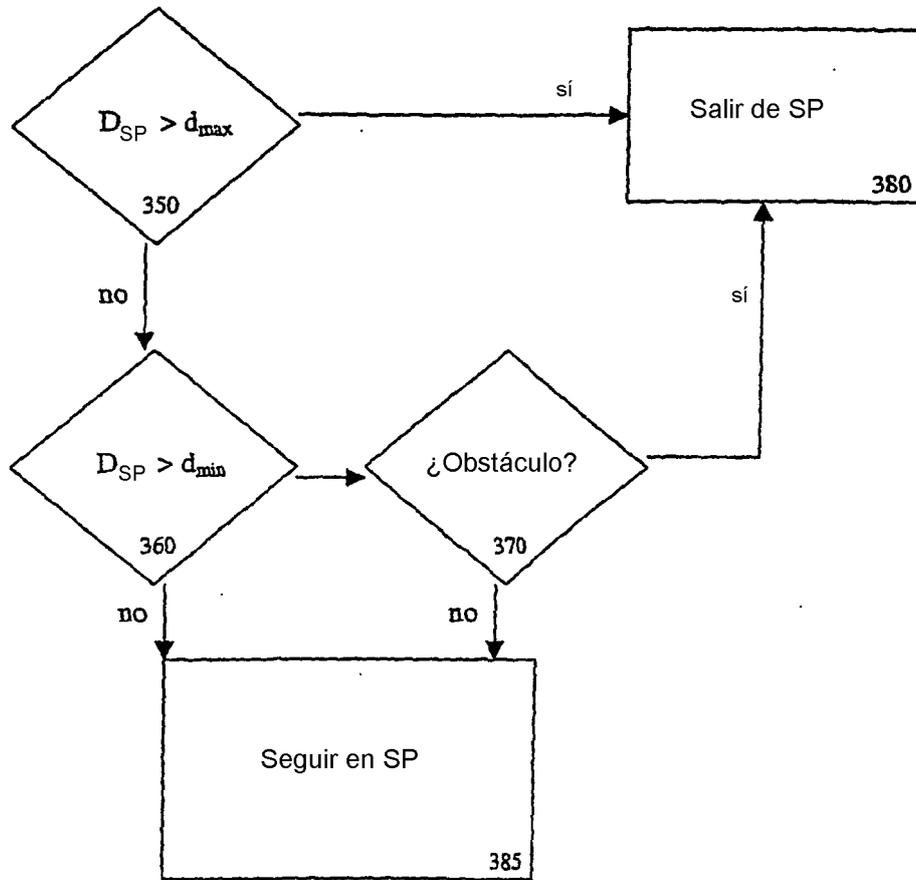


FIG. 9B

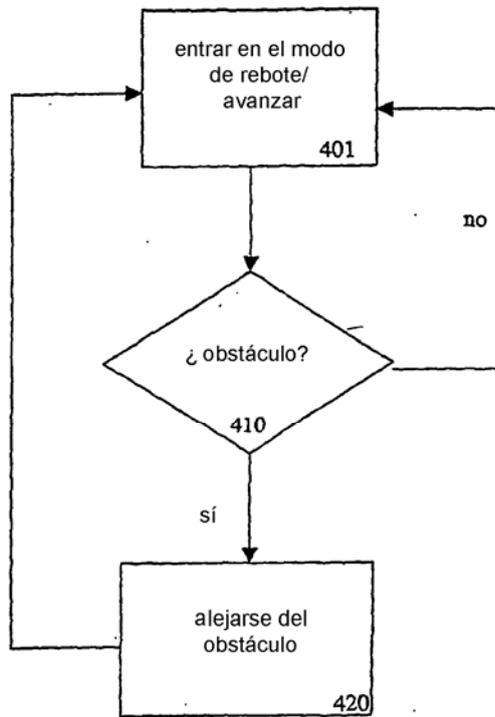


FIG. 10

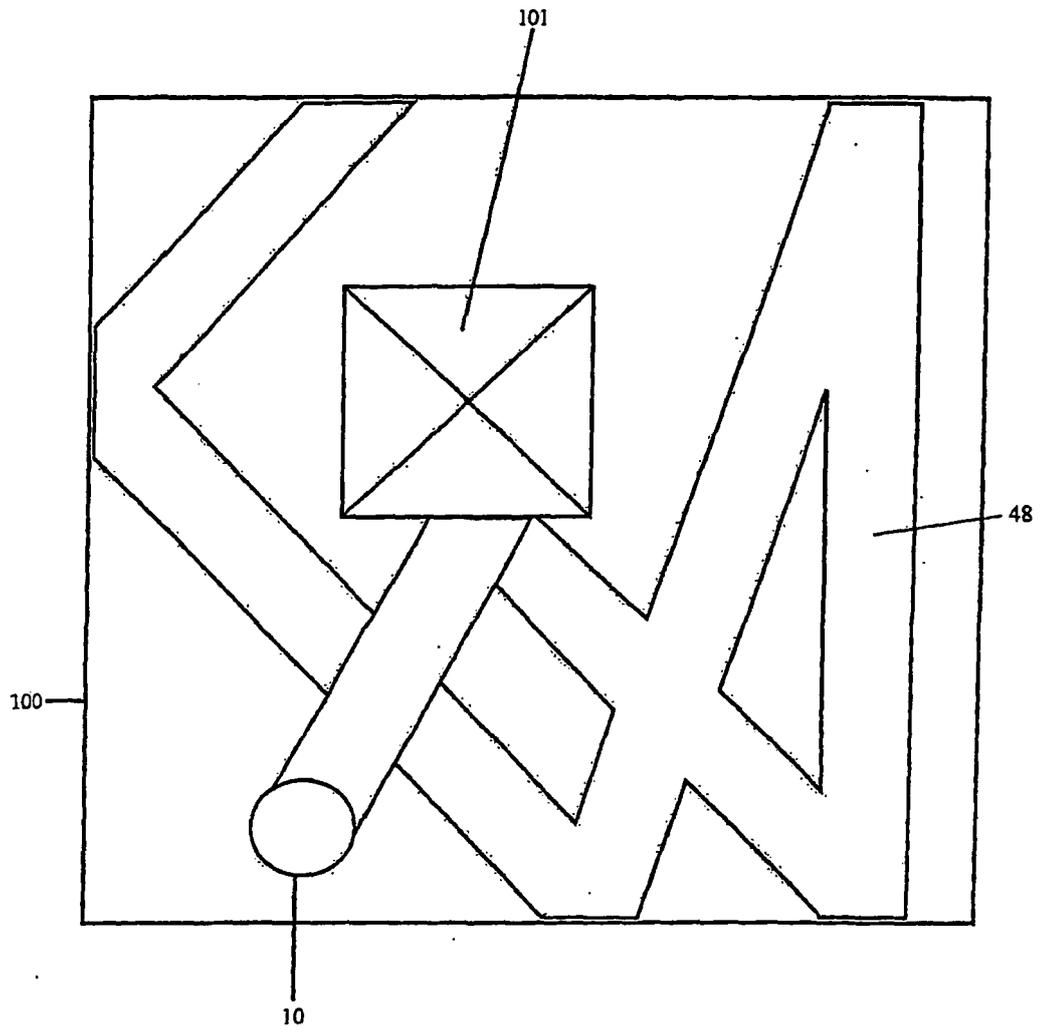


FIG. 11

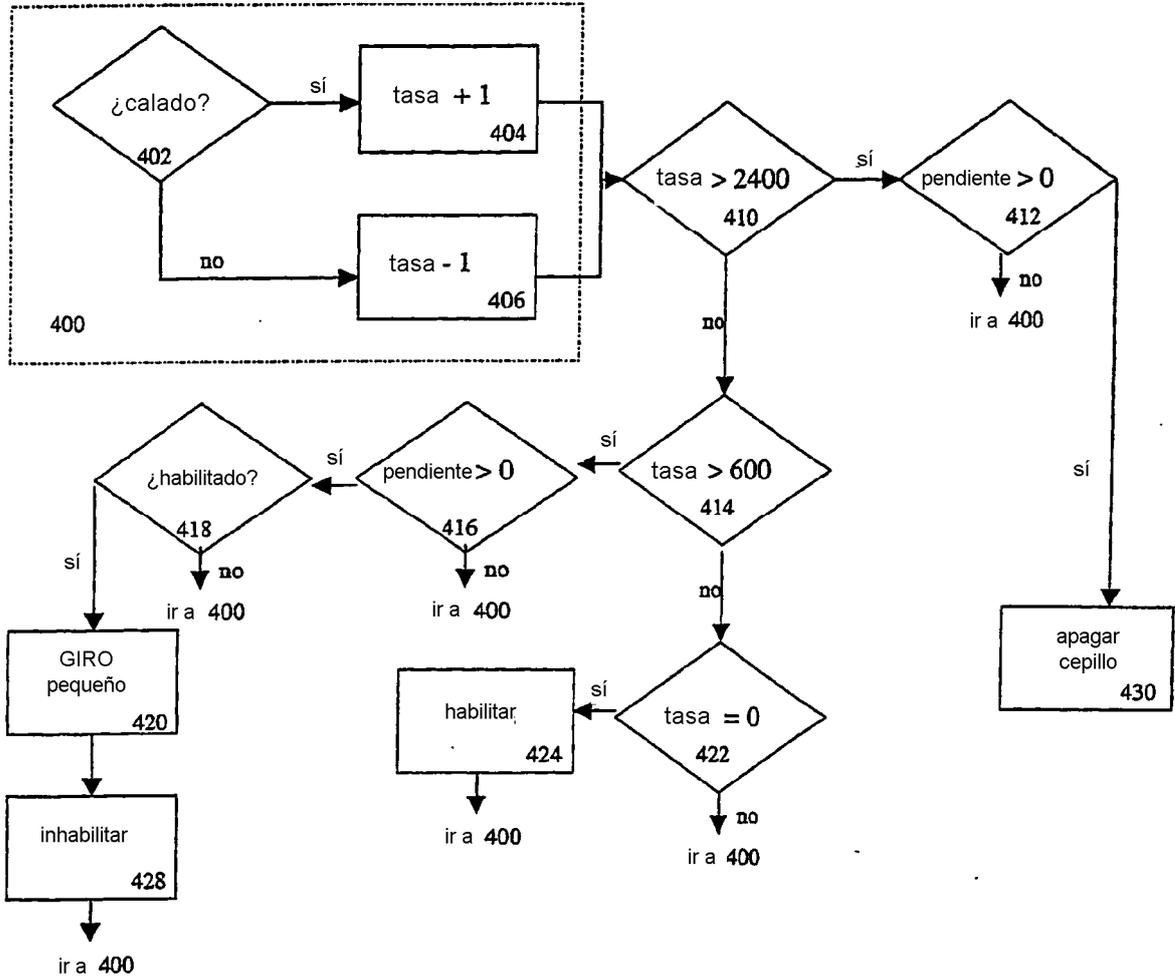


FIG. 12A

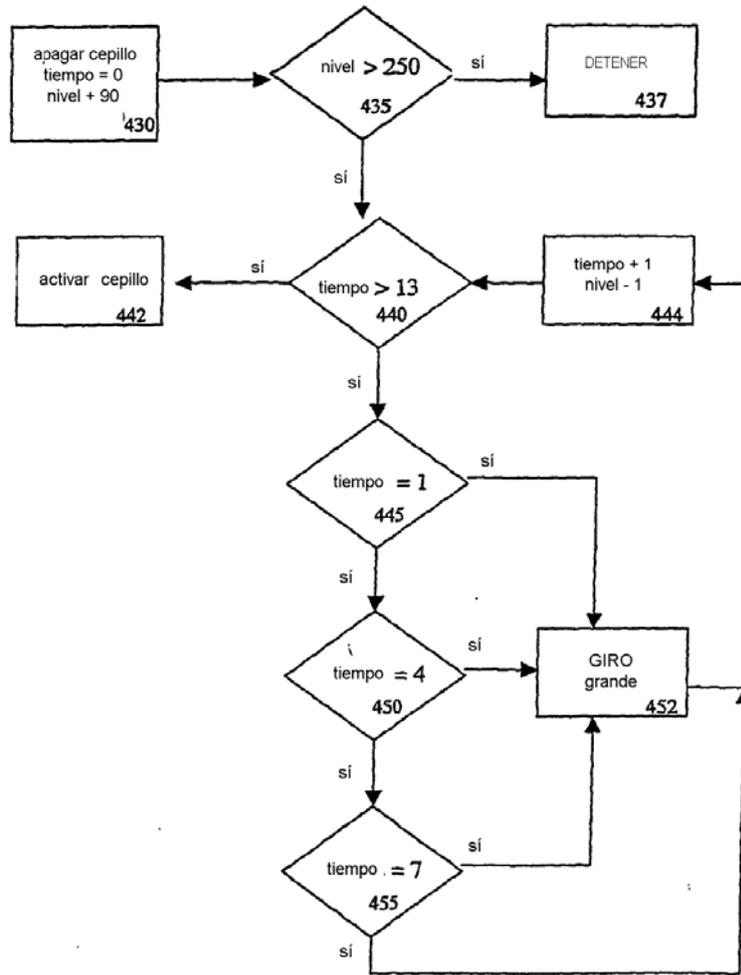


FIG. 12B

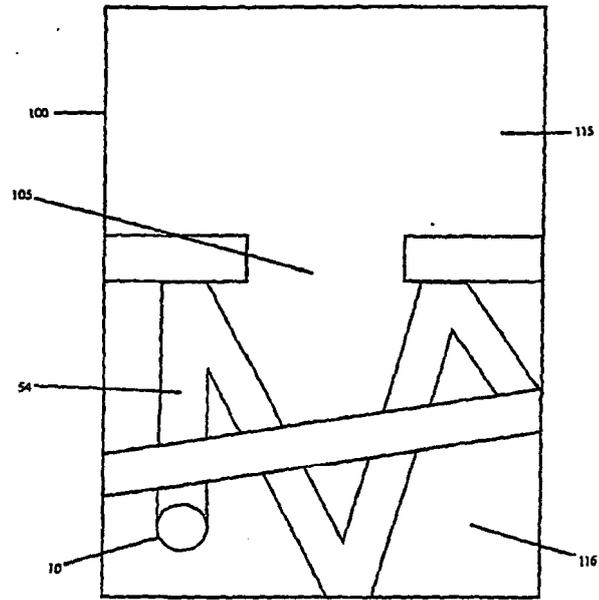


FIG. 13A

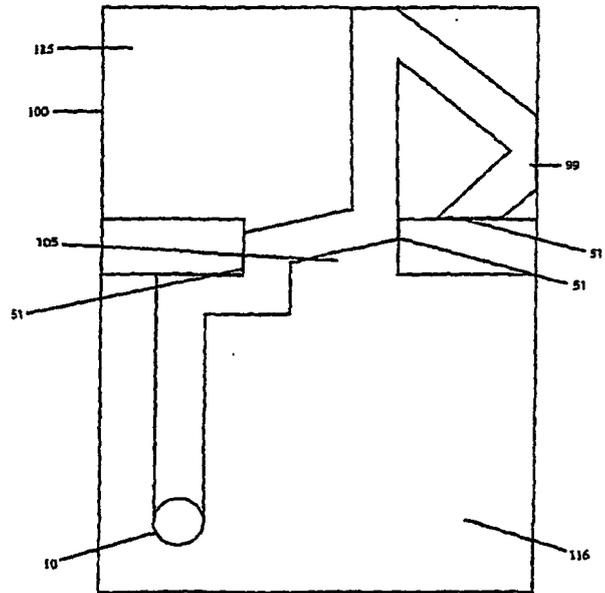


FIG. 13B

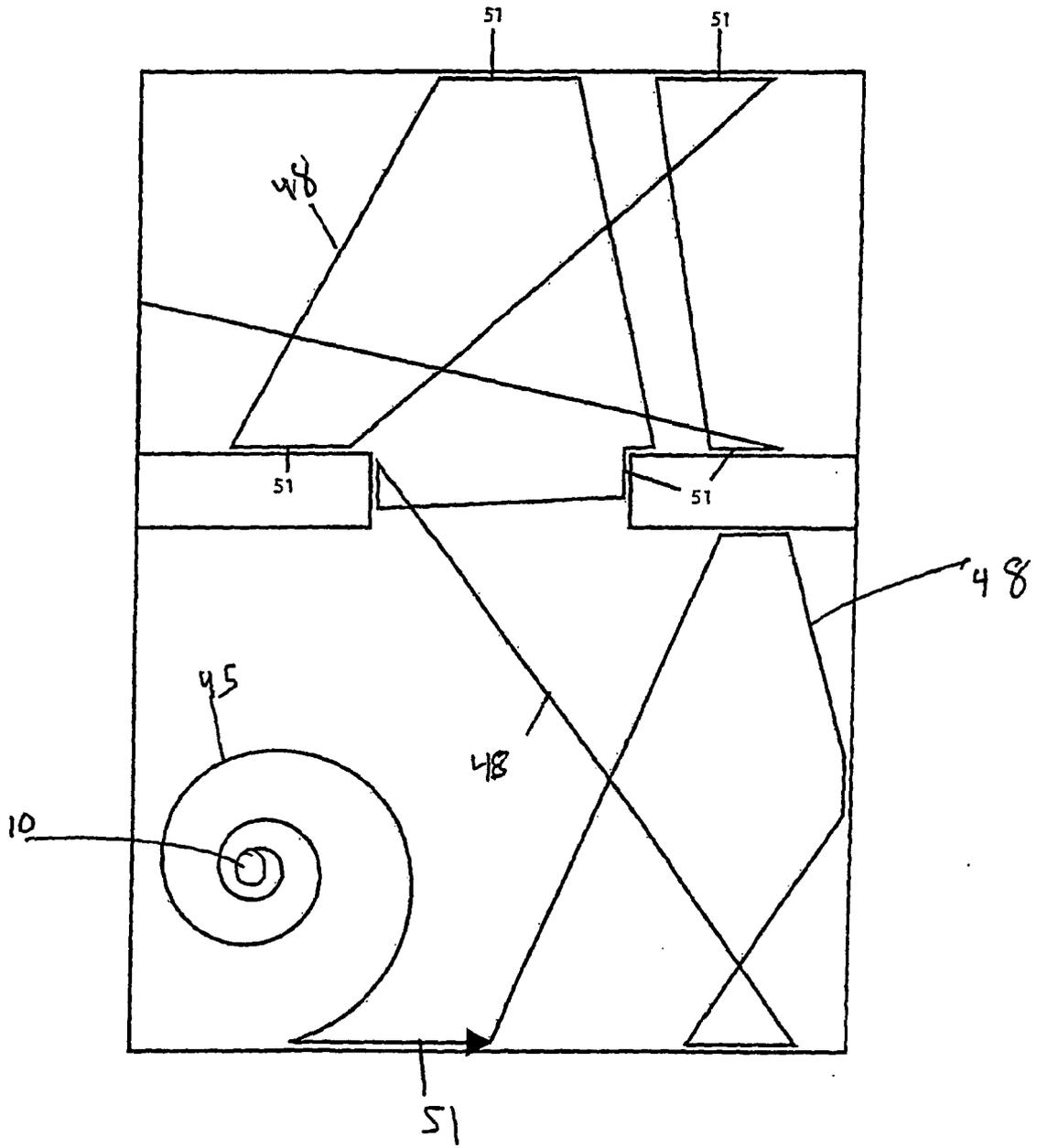


FIG. 14