

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 420 655**

51 Int. Cl.:

G05D 1/02 (2006.01)

E02F 9/20 (2006.01)

E02F 3/84 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.07.2005 E 05016225 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.04.2013 EP 1630636**

54 Título: **Estabilización dinámica y control de una máquina de movimiento de tierra**

30 Prioridad:

23.08.2004 US 924018

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

26.08.2013

73 Titular/es:

**TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC. (100.0%)
7400 NATIONAL DRIVE
LIVERMORE CA 94551, US**

72 Inventor/es:

MATROSOV, IVAN

74 Agente/Representante:

ZUAZO ARALUZE, Alexander

ES 2 420 655 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

Estabilización dinámica y control de una máquina de movimiento de tierra.

5 **Antecedentes de la invención**

La presente invención se refiere en general al control de máquinas, y más particularmente a la estabilización dinámica y control de una máquina.

10 Se han desarrollado diversos tipos de máquinas, denominadas en general en el presente documento máquinas de movimiento de tierra, que alteran la topología o geografía del terreno. Por ejemplo, un *bulldozer* con una pala cortante unida y móvil puede usarse en diversas aplicaciones de movimiento de tierra. Durante la preparación del sitio de construcción, puede usarse un *bulldozer* para nivelar (o aplicar alguna pendiente predeterminada) el suelo antes de la construcción de un edificio en el suelo. Los *bulldozers* también son útiles en carretera y otras
15 aplicaciones de construcción. Naturalmente, hay diversos usos para *bulldozers* y otras máquinas de movimiento de tierra.

Inicialmente, la operación de los *bulldozers* se realizaba por operarios especializados junto con personal de mantenimiento terrestre, por ejemplo personal de corrección de pendiente equipados con instrumentos de topografía para garantizar una nivelación correcta. Este modo de operación sigue usándose ampliamente en la actualidad. Una desventaja de este modo de operación es que consume tiempo y requiere mano de obra intensa.
20

Se han realizado diversos intentos para automatizar la operación de las máquinas de movimiento de tierra. Por ejemplo, se han empleado herramientas de navegación (tales como sistemas láser y sistemas basados en satélite) para ayudar a automatizar diversas tareas de movimiento de tierra. Por ejemplo, la publicación de solicitud de patente estadounidense 2003/0137658 A1 publicada el 24 de julio de 2003 da a conocer el uso de un láser rotativo junto con un sistema de navegación basado en satélite para su uso en el control de un *bulldozer*.
25

La publicación de patente estadounidense 5.987.371 A publicada el 16 de noviembre de 1999 da a conocer el uso de un sistema de GPS junto con un sensor de detección de alabeo para controlar una máquina de movimiento de tierra.
30

La publicación de patente estadounidense 5.925.085 A publicada el 20 de julio de 1999 da a conocer una máquina de trabajo de suelo en la que la posición de la máquina se determina por GPS y un sensor láser, y también la posición de la herramienta (por ejemplo una pala de movimiento de suelo) se determina por GPS y un sensor láser, que permite un control preciso de la herramienta.
35

La publicación de patente europea EP 0 763 749 A1 publicada el 19 de marzo de 1997 da a conocer el uso de dos antenas de GPS separadas espacialmente combinadas con un sistema de navegación por inercia para controlar la posición de una plataforma móvil y mejorar las estimaciones de rumbo.
40

Una de las limitaciones de los sistemas existentes es que el uso de láseres para el control de la máquina requiere una línea visual entre el láser rotativo y la máquina de construcción. Además, para una operación apropiada, hay una distancia operativa máxima entre el transmisor de láser rotativo y la máquina de construcción. Aunque los sistemas de navegación por satélite carecen de una limitación de la distancia máxima, los sistemas de navegación por satélite disponibles actualmente introducen otras limitaciones. Por ejemplo, estos sistemas tienen generalmente una precisión limitada, especialmente cuando se calculan mediciones verticales. Otro problema con los sistemas de control de máquinas de navegación por satélite es el retardo introducido en el bucle de control.
45

Otro problema con los sistemas de control de máquinas existentes es la inestabilidad dinámica a velocidades operativas relativamente rápidas. Más particularmente, a velocidades de *bulldozer* rápidas (pero no máximas), el *bulldozer* y la pala unida tienden a oscilar, dando como resultado por tanto una nivelación imprecisa.
50

55 **Breve resumen de la invención**

La presente invención proporciona un método y un aparato de control de máquinas mejorados que garantizan la estabilidad dinámica de una máquina (por ejemplo, *bulldozer*) durante una operación a velocidades relativamente rápidas.

60 En una realización, una máquina comprende antenas de satélite primera y segunda montadas en la máquina y conectadas a receptores de satélite. Los receptores de satélite se usan para recibir señales desde un sistema de satélite de navegación global. Una tercera antena de satélite está unida a al menos un elemento operativo de la máquina. En una realización particular, el elemento operativo puede ser la pala de un *bulldozer*. Un sensor de referencia de gravedad y una pluralidad de giroscopios están montados en la máquina para proporcionar datos de sensor a un procesador. El procesador genera señales de control de máquina basándose en datos de sensor recibidos desde los receptores de satélite, sensor de referencia de gravedad y giroscopios.
65

Según una realización, el procesador determina un estado actual de la máquina usando los datos de los sensores montados en la máquina. Se predice un estado futuro de la máquina usando el estado actual e información de posición filtrada de un periodo anterior. En una realización ventajosa, la predicción se realiza usando un filtrado de Kalman. Se calcula un estado de error reducido usando el estado determinado y el estado predicho. Se calcula un estado con compensación de retardo usando el estado de error reducido. Entonces se calculan las señales de control para un elemento operativo (por ejemplo, la pala de un *bulldozer*) usando el estado con compensación de retardo y las señales de control se aplican al elemento operativo para controlar el elemento operativo. En una realización en la que la máquina es un *bulldozer*, las señales de control pueden controlar la elevación y pendiente de la pala del *bulldozer*.

Éstas y otras ventajas de la invención resultarán evidentes para los expertos habituales en la técnica mediante referencia a la siguiente descripción detallada y los dibujos adjuntos.

15 Breve descripción de los dibujos

Las figuras 1A y 1B muestran una máquina de construcción según una realización de la invención;

la figura 2 es un diagrama de bloques de alto nivel de los componentes de un sistema de control para controlar un *bulldozer* según una realización de la invención;

la figura 3 representa parámetros de estado de máquina que se usan para describir el estado instantáneo de una máquina;

la figura 4 representa el vector de velocidad de máquina generalizado;

la figura 5 representa datos de sensor;

la figura 6 representa datos de sincronismo;

la figura 7 es un diagrama de flujo que muestra las etapas de alto nivel realizadas por el módulo de control durante un periodo de tiempo;

la figura 8 es un diagrama de flujo que muestra detalles adicionales de la etapa de predicción de la figura 7;

la figura 9 es un diagrama de flujo que muestra detalles adicionales de la etapa de filtrado de Kalman de la figura 7;

la figura 10 es un diagrama de flujo que muestra detalles adicionales de la etapa de compensación de retardo de la figura 7; y

la figura 11 es un diagrama de flujo que muestra detalles adicionales del cálculo de la etapa de señales de control de la figura 7.

45 Descripción detallada

Las figuras 1A y 1B muestran una máquina 102 de construcción según una realización de la presente invención. La figura 1A muestra una vista lateral de la máquina 102 de construcción y la figura 1B muestra una vista angular en alzado de la máquina 102 de construcción. En la realización particular que se describe, la máquina 102 de construcción es un *bulldozer*. Sin embargo, tal como resultaría inmediatamente evidente para un experto en la técnica, los principios de la presente invención también pueden aplicarse a otros tipos de máquinas de construcción. La máquina 102 de construcción tiene tres antenas 104, 106, 108 de satélite que se usan para recibir señales desde sistemas de satélite de navegación globales (GNSS). Los GNSS son bastante conocidos y se usan para resolver una amplia variedad de tareas relacionadas con el posicionamiento/tiempo. Dos sistemas bastante conocidos de este tipo son el sistema de posicionamiento global (GPS) de los Estados Unidos y el sistema de satélite de navegación global (GLONASS) de Rusia. Para facilitar la referencia, esta descripción se referirá generalmente al sistema de GPS, pero debe entenderse que la presente descripción puede aplicarse igualmente a GLONASS, GPS + GLONASS combinados u otros sistemas de GNSS.

Las antenas 104 y 106 de GPS está montadas en la dirección longitudinal en el techo de la máquina 102 de construcción (o bien directamente o bien en un chasis montado especialmente). La antena 108 de GPS está montada en el poste 110 conectado a la pala 112 del *bulldozer* 102. La pala 112 del *bulldozer* 102 se controla por al menos un cilindro 114 hidráulico. El/los cilindro(s) se controla(n) por al menos una válvula controlada electrónicamente que utiliza un carrete controlado eléctricamente. En una realización particular, el *bulldozer* 102 comprende un cilindro 114 hidráulico para levantar la pala 112 y un cilindro hidráulico (no mostrado) para bascular (es decir, hacer rotar alrededor del eje longitudinal del *bulldozer*) la pala 112. La válvula que controla el cilindro de levantamiento se denomina válvula de levantamiento, y la válvula que controla el cilindro de basculación se

denomina válvula de basculación. La configuración de una pala de *bulldozer* y sus cilindros de control se conoce bien en la técnica y no se describirá en mayor detalle en el presente documento.

La figura 2 es un diagrama de bloques de alto nivel de los componentes de un sistema 200 de control para controlar el *bulldozer* 102 según una realización de la invención. El sistema 200 contiene un sensor 210 de pendiente de referencia de gravedad de líquido para determinar el ángulo de pendiente (alabeo) del *bulldozer* 102. También pueden usarse otros tipos de sensores de pendiente. El sistema 200 también contiene una unidad 212 de medición inercial (IMU). La IMU 212 contiene tres giroscopios 214 de anillo vibratorio (u otro tipo) para medición inercial. En realizaciones alternativas, la IMU 212 también puede contener tres acelerómetros para medición inercial. Estos sensores se orientan ventajosamente a lo largo de tres ejes cartesianos del sistema de coordenadas asociado con el chasis principal del *bulldozer* (concretamente longitudinal, transversal y vertical). La IMU 212 también contiene un convertidor 215 de analógico a digital que lee los datos de giroscopio a una frecuencia relativamente alta (por ejemplo, 200 Hz) y proporciona los datos a un procesador 216. El procesador 216 calcula el promedio de los datos de giroscopio y proporciona los datos promediados a los otros componentes según sea necesario a una frecuencia menor (por ejemplo, 20-40 Hz). Ventajosamente, la IMU 212 se monta de manera rígida en el chasis principal del *bulldozer*.

El sistema 200 también incluye un módulo 220 de control que está montado ventajosamente en el chasis principal del *bulldozer* de una manera que protege la unidad frente a la vibración. El módulo 220 de control contiene un procesador 222 para controlar la operación global del módulo 220 de control. El procesador 222 está conectado a una memoria 224 que contiene datos y un código de programa que definen la operación del procesador 222. Las etapas realizadas por el módulo 220 de control cuando se ejecuta el código de programa en la memoria 224 se describirán en mayor detalle a continuación junto con las figuras 3-11. Debe entenderse que el diagrama de bloques del módulo 220 de control pretende ser un diagrama funcional de alto nivel, y no una descripción específica de los componentes necesarios para construir un módulo de control según los principios de la presente invención. Por ejemplo, la memoria 224 puede implementarse usando diversos componentes, incluyendo una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de sólo lectura (ROM), una ROM programable (PROM), una PROM eléctricamente borrable (EEPROM), medios ópticos, medios magnéticos o cualquier otro medio para almacenar datos y un código de programa. Además, el código de programa puede almacenarse en una o más unidades de memoria, y el código de programa puede implementarse en software, hardware, *firmware* o cualquier combinación de los mencionados anteriormente.

El módulo 220 de control contiene un módulo 202 de GPS para procesar las señales de satélite recibidas. Tal como se muestra, el módulo 202 de GPS contiene receptores 204, 206, 208 de GPS conectados respectivamente a antenas 104, 106, 108 de GPS. Los receptores 204, 206, 208 de GPS operan de una manera bien conocida en la técnica para determinar la posición de cada una de las antenas. En una realización alternativa, en lugar de contener tres receptores de GPS separados, el módulo 202 de GPS puede contener un único receptor de GPS de 3 antenas como también se conoce bien en la técnica.

El módulo 220 de control también incluye un módem 230 de radio para su uso junto con un procesamiento de GPS diferencial. Como se conoce bien, se realiza una determinación de ubicación de un receptor móvil utilizando un procesamiento de GPS diferencial en relación con una estación base (base). Se conocen las coordenadas precisas de la estación base y la estación base es generalmente estacionaria durante las mediciones. La estación base tiene un receptor de navegación que recibe y procesa las señales de los satélites para generar mediciones. Estas mediciones de señal se transmiten al receptor móvil a través de un canal de comunicación (por ejemplo, de manera inalámbrica). El receptor móvil usa estas mediciones recibidas desde la base, junto con sus propias mediciones tomadas con su propio receptor de navegación, con el fin de determinar su ubicación de manera precisa. La determinación de ubicación se mejora en el modo de navegación diferencial porque el receptor móvil puede usar las mediciones de estación base con el fin de compensar la mayor parte de los errores fuertemente correlacionados en las mediciones del receptor móvil. En el sistema 200 mostrado en la figura 2, se usa el módem 230 de radio para recibir los datos de estación base para los tres receptores 204, 206, 208 de GPS.

En general, el módulo 220 de control realiza las siguientes funciones. El módulo 220 de control recopila información de los otros componentes (por ejemplo, sensor 210 de pendiente, GUI 232 e IMU 212). El módulo 220 de control también evalúa la información de superficie de diseño que se almacena en la memoria 224 del módulo 220 de control. La información de superficie de diseño contiene información sobre cómo el *bulldozer* debe configurar el terreno. Esta información puede presentarse visualmente al operario de la máquina a través de una interfaz 232 de usuario gráfica (GUI) que se conoce bien en la técnica y permite una interacción en tiempo real con el operario de la máquina. El módulo 220 de control realiza algoritmos de generación de control y filtración con el fin de generar las señales de control para la pala de *bulldozer*. Estos algoritmos se describirán en mayor detalle a continuación. El procesador 222 se conecta a una unidad 226 de accionamiento de válvula que convierte las señales de control digitales del procesador 222 en señales de control analógicas para controlar una o más válvulas hidráulicas de *bulldozer*. El sistema hidráulico del *bulldozer* contiene válvulas controladas eléctricamente que permiten un control automatizado de los cilindros hidráulicos para mover la pala.

La configuración del *bulldozer* descrita anteriormente permite la medición de la posición cartesiana y angular del armazón del *bulldozer* así como sus velocidades lineales y angulares. Más particularmente, las antenas 104 y 106

junto con el sensor 210 de pendiente permiten el cálculo de las coordenadas cartesianas de WGS (Sistema Geodésico Mundial) 84 de cualquier punto en el armazón del *bulldozer* así como su orientación (inclinación, alabeo y rumbo). La posición respectiva de la antena 108 permite el cálculo de la posición del borde de pala 112 así como la posición de cada uno de uno o más cilindros hidráulicos. Los giroscopios 214 de la IMU 212 permiten una medición de una velocidad angular que se usa para una generación de control y filtrado tal como se describirá en mayor detalle a continuación.

La configuración del sensor descrita en la realización particular de las figuras 1-2 permite las mediciones tal como se describieron. Sin embargo, un experto en la técnica reconocería que pueden realizarse diversas sustituciones con el fin de calcular las mediciones requeridas. Sin embargo, la eliminación de uno o más de los sensores descritos anteriormente requeriría la introducción de (un) sensor(es) de sustitución con el fin de conseguir la estabilidad del *bulldozer* según los principios de la presente invención. Por ejemplo, la antena 108 de GPS conectada a la pala 112 puede sustituirse por dos sensores de carrera de cilindro lineal en cada uno de dos cilindros hidráulicos que controlan la pala 112 de *bulldozer*. Un sensor de carrera de cilindro lineal consiste en un potenciómetro montado en un cilindro, con un extremo de un cable conectado al potenciómetro. El otro extremo del cable se conecta a la barra de cilindro, de modo que cualquier movimiento de la barra dé como resultado un cambio en la resistencia del potenciómetro, que luego puede medirse por un controlador. De manera similar, el sensor 210 de pendiente puede sustituirse por una antena de GPS adicional montada en el techo del *bulldozer* 102, o por un acelerómetro añadido a la IMU. Un experto en la técnica reconocería que son posibles diversas configuraciones y sustituciones de sensores adicionales.

Los componentes descritos anteriormente junto con las figuras 1-2, junto con el procesamiento de datos que se describirá en mayor detalle a continuación, proporcionan un sistema de control de *bulldozer* que garantiza la estabilidad dinámica del *bulldozer* durante su operación, permitiendo por tanto que el *bulldozer* opere a velocidades más rápidas que los sistemas anteriores, y aumentando por tanto la productividad. Estos componentes y el procesamiento de datos descrito a continuación también proporcionan una reducción en los errores de medición de GPS y retardo. Antes de proporcionar una descripción detallada de los algoritmos de procesamiento de datos, se proporcionará una descripción de alto nivel del procesamiento.

El módulo de control, bajo el control del procesador 222 y el código de programa informático almacenado en la memoria 224, realiza las siguientes tareas de alto nivel aproximadamente cada 50 milisegundos. La primera tarea es una predicción de la posición del *bulldozer* para un momento de tiempo de una medición de GPS futura. Esta predicción se realiza usando una posición y un velocidad de máquina estimadas previamente, se procesaron nuevas lecturas de la IMU y los sensores de pendiente e información acerca del tiempo transcurrido desde los últimos datos de GPS. La predicción se basa en la integración de un sistema de ecuaciones diferenciales que representan el movimiento de la máquina.

La siguiente tarea es el filtrado de error de GPS que se realiza basándose en una comparación de la posición predicha del armazón de máquina y dispositivos hidráulicos con las mediciones de GPS sin procesar y limitaciones geométricas usando un criterio de mínimos cuadrados tal como un filtro de Kalman que se usa para crear un procedimiento recursivo.

La siguiente tarea es una compensación de retardo de GPS que se realiza usando marcas de tiempo de las señales de GPS y las lecturas de temporizador reales a partir de un reloj interno sincronizado con GPS con el fin de aplicar el algoritmo de predicción basado en ecuaciones diferenciales. Esta tarea genera una estimación de la posición de máquina para el momento de la generación de control de las señales de control. Este momento puede ser de hasta 200 ms antes del último conjunto de mediciones de GPS.

La siguiente tarea es la generación de las señales de control para las válvulas del *bulldozer*. Las señales de control se generan basándose en un modelo matemático (es decir, sistema de ecuaciones diferenciales) de la dinámica del *bulldozer* y estimaciones de posición y velocidad (cuyo retardo se compensa y que han filtrado errores de ruido blanco de GPS). El algoritmo de control puede estar diseñado de manera que la máquina pueda seguir la superficie de diseño de una manera estable.

Habiendo descrito el procesamiento de una manera general, se describirán detalles adicionales de la operación de un sistema según una realización de la invención junto con las figuras 3-11.

La figura 3 representa los parámetros de estado 300 de máquina que se usan para describir el estado instantáneo de la máquina. Estos parámetros incluyen la posición cartesiana tridimensional de algún punto predeterminado en el chasis principal del *bulldozer* 302, el cuaternión de orientación del chasis 304 principal del *bulldozer*, la posición del carrito dentro de la válvula 306 de levantamiento de pala, la posición del carrito dentro de la válvula 308 de basculación de pala, la posición del cilindro 310 de levantamiento de pala y la posición del cilindro 312 de basculación de pala. A continuación en el presente documento la referencia al estado 300 de máquina indica el conjunto (vector) descrito de 11 variables. Hay 11 variables porque la posición 302 cartesiana consiste en 3 variables (x, y, z), el cuaternión 304 de orientación consiste en 4 variables, y cada uno de los parámetros 306, 308, 310 y 312 consiste en 1 variable. Se observa que la orientación se determina habitualmente por tres ángulos:

inclinación, alabeo y rumbo. Sin embargo, esto conduce a ecuaciones diferenciales no lineales singulares de movimiento (concretamente las ecuaciones de Euler). Con el fin de simplificar las ecuaciones diferenciales no lineales, se usan cuatro parámetros (a, b, c, d), conocidos como cuaternión, que satisfacen la condición $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1$, según una realización de la presente invención.

5 La figura 4 representa el vector 400 de velocidad de máquina generalizado. Este vector representa la velocidad de cambio para todas las variables incluidas en el estado 300 de máquina. Más particularmente, el vector 400 de velocidad de máquina contiene el vector de velocidad cartesiano del chasis 402 principal de la máquina, el vector de las rotaciones 404 angulares de la máquina (es decir, velocidad angular), la velocidad de movimiento del cilindro 406 hidráulico de levantamiento de pala, la velocidad de movimiento del cilindro 408 hidráulico de basculación de pala, la velocidad de movimiento del carrito 410 de válvula de levantamiento, la velocidad de movimiento del carrito 412 de válvula de basculación.

15 Se observa que diversas modificaciones del estado de máquina y la velocidad de máquina correspondiente resultarán fácilmente evidentes para un experto en la técnica dada la descripción en el presente documento. Por ejemplo, tales modificaciones pueden incluir la adición de un ángulo de inclinación de pala en cualquier dirección, cilindro hidráulico correspondiente y posiciones de válvula, posiciones de válvulas de control de movimiento horizontal y presiones o flujos dentro de los circuitos hidráulicos.

20 La figura 5 representa los datos 500 de sensor, el conjunto de mediciones disponibles de los diversos sensores. El receptor 208 de GPS proporciona la velocidad 502 y posición cartesianas de la antena 108. El receptor 204 de GPS proporciona la velocidad 504 y posición cartesianas de la antena 104. El receptor 206 de GPS proporciona la velocidad 506 de la antena 106. Los tres giroscopios 214 proporcionan tres proyecciones del vector 508 de velocidad angular del chasis principal de *bulldozer* al sistema de coordenadas conectados de manera rígida al chasis principal, que se mueve junto con la máquina (WGS-84 no global). El sensor 210 de pendiente proporciona los datos 510 de sensor de pendiente que es el ángulo de pendiente (alabeo) del chasis principal de la máquina. Por tanto, hay 22 parámetros en el vector 500 de datos de sensor. La velocidad 502 y posición cartesianas de la antena 108 contiene tres parámetros de posición (x, y, z) y tres parámetros de velocidad (una medición para cada una de las coordenadas x, y, z). La velocidad 504 y posición cartesianas de la antena 104 contiene tres parámetros de posición (x, y, z) y tres parámetros de velocidad (un parámetro para cada una de las coordenadas x, y, z). La velocidad 506 y posición cartesianas de la antena 106 contiene tres parámetros de posición (x, y, z) y tres parámetros de velocidad (un parámetro para cada una de las coordenadas x, y, z). El vector de velocidad 508 angular contiene tres parámetros de los tres giroscopios. Los datos 510 de sensor de pendiente contienen un parámetro.

35 Se observa que los datos de sensor pueden corromperse por diversos tipos de errores, tales como errores de GPS y errores de giroscopio, errores que se provocan por fuentes físicas objetivas tales como ruido de RF, vibración, multirayectoria, etc. Según una realización de la invención, y tal como se describe en mayor detalle a continuación, tales errores se reducen por el uso de filtros digitales.

40 Los receptores 204, 206, 208 de GPS y la IMU 212 tienen cada uno un reloj interno (no mostrado en la figura 2). Los relojes de receptor de GPS se sincronizan con el tiempo del GPS global, y el reloj de IMU se sincroniza con los relojes de GPS. La figura 6 muestra los datos 600 de sincronismo que se leen de los relojes de GPS e IMU. Se usan tres marcas de tiempo: tiempo 602 de medición de GPS de posición de pala, tiempo 604 de medición de GPS de posición de cuerpo de máquina y tiempo 606 de medición de giroscopio de IMU.

45 Las figuras 7-11 son diagramas de flujo que representan las etapas realizadas por el módulo 220 de control para estimar el estado de la máquina y generar las señales de control para una operación de la máquina. Se observa que estas figuras muestran tanto un flujo de control (es decir, la secuencia de ejecución de etapas funcionales) como un flujo de datos (es decir el paso de datos entre etapas funcionales). Generalmente, el flujo de control se muestra mediante líneas continuas y el flujo de datos se muestra mediante líneas discontinuas.

50 La figura 7 es un diagrama de flujo que muestra las etapas de alto nivel realizadas por el módulo 220 de control durante un periodo de tiempo. Para cada periodo de tiempo, por ejemplo cada 1/10 de segundo, el funcionamiento comienza con la recepción (y/o recopilación) de los datos 500 de sensor y datos 600 de sincronismo. Estos datos se usan por el procesador 222 para realizar las siguientes tareas. En la etapa 702, se estima el estado 300 de máquina usando datos 500 de sensor. En esta etapa, se recalcula el estado 300 de máquina usando datos de sensor de pendiente y GPS sin procesar y tamaños lineales necesarios. La estimación resultante, denominada estimación directa, es un primer cálculo para mejoras futuras en las siguientes etapas. Los tamaños geométricos de la máquina usados dentro de esta etapa son altura del poste de montaje de GPS, posición de las antenas 104, 106 con respecto al sistema de coordenadas, las posiciones de las articulaciones de chasis de pala, las posiciones de las articulaciones de basculación de pala, etc. Durante esta etapa, los errores de GPS se transformarán en errores dentro del resultado de estimación directa. Si el algoritmo procesa un periodo distinto al primer periodo, y por tanto está disponible la estimación anterior del estado de máquina, entonces se realiza la etapa 704 en la que se predice el estado de máquina basándose en estimaciones y datos de periodo previo. Detalles adicionales de la etapa 704 se describirán en mayor detalle a continuación junto con la figura 8.

En la etapa 706, usando tanto el estado de máquina estimado de la etapa 702 como el estado de máquina predicho de la etapa 704, se realiza un filtrado de Kalman con el fin de usar todos los datos de GPS ponderados apropiadamente disponibles. La etapa 706 se describe en mayor detalle a continuación junto con la figura 9. Esta estimación más precisa (por ejemplo, filtrada) del estado de máquina que se genera en la etapa 706 se guarda en la etapa 710 para su uso futuro en la siguiente ejecución de la etapa 704. Esta estimación más precisa también se envía a la pantalla 708 del usuario (GUI). Después, en la etapa 714, se determina si la máquina está operando en modo automático (es decir bajo control automatizado) o modo manual (es decir bajo el control de un operario). Si está en modo manual, entonces la determinación de la etapa 714 será NO y el algoritmo se detiene y espera al siguiente periodo de mediciones (etapa 716). En el siguiente periodo, el procesamiento comenzará de nuevo con las etapas 702 y 704.

Si la máquina está en modo automático, entonces el procesamiento continúa con la etapa 718 que compensa retardos de medición. Generalmente, la etapa 718 realiza una compensación de retardo basada en un extrapolador para recudir retardos de medición (para hardware habitual, el retardo ordinario se encuentra dentro del intervalo ~50-200 milisegundos). Detalles adicionales de la etapa 718 se describirán a continuación junto con la figura 10. Después de la compensación de retardo, se generan las señales de control de máquina en la etapa 720. La etapa 720 también usa los datos 712 de superficie de diseño durante su cálculo de las señales de control. Detalles adicionales de la etapa 720 se describirán a continuación junto con la figura 11. Después del cálculo de las señales de control, las señales de control se envían a las válvulas hidráulicas controladas electrónicamente de la máquina en la etapa 722. En este punto, el algoritmo se detiene y espera al siguiente periodo de mediciones (etapa 716). En el siguiente periodo, el procesamiento comenzará de nuevo con las etapas 702 y 704.

Ahora se describirán detalles adicionales de la etapa de predicción (704) junto con la figura 8. El objetivo de este algoritmo es preparar los datos necesarios para el filtrado de Kalman (etapa 706). Tal como se describió anteriormente, la etapa 704 se ejecutará en el segundo periodo y después, de modo que es posible usar el estado 802 de máquina del periodo previo y la velocidad 804 generalizada así como los datos 500 de sensor y los datos 600 de sincronismo del periodo actual. En primer lugar, en la etapa 806, se calcula la estimación del periodo actual de la velocidad generalizada de máquina a partir de los datos 500 de sensor usando la geometría de la máquina y álgebra de cuaterniones. En la etapa 808, se guardan los datos calculados en la etapa 806 para su uso futuro en el siguiente periodo (y para su uso durante la compensación de retardo descrita junto con la figura 10).

En la etapa 810, se estima el intervalo de tiempo desde el periodo previo usando datos 600 de sincronismo. A continuación se usa esta estimación de intervalo de tiempo en la etapa 812 para interpolar linealmente la velocidad generalizada para el intervalo de tiempo actual. En la etapa 814, se calcula el estado de máquina predicho mediante la adición de la velocidad generalizada integrada para el intervalo de tiempo desde el periodo previo, y la estimación de estado de máquina previa.

Ahora se describirán detalles adicionales de la etapa de filtrado de Kalman (706) junto con la figura 9. Aunque se conocen algoritmos de filtrado de Kalman para fines generales, se hace posible la técnica particular descrita en el presente documento para una reducción de errores de GPS en un sistema de control de *bulldozer* mediante el conjunto de la invención de sensores descrito en el presente documento, y no es posible dentro de los sistemas de la técnica anterior. El algoritmo se basa en una linealización de dos funciones, estado de máquina a función de velocidad generalizada (etapa 904), y datos de sensor a función de estado de máquina (etapa 906) usando la estimación 902 de estado de máquina directa determinada en la etapa 702. Como es habitual para los filtros de Kalman, es necesario tener una matriz de covarianza para todos los errores dentro del sistema. El sistema de control de *bulldozer* entero se ve afectado por las siguientes fuentes de ruido: ruido de GPS (error), ruido de IMU y ruido de sensor de pendiente. Estas fuentes de ruido pueden estimarse por adelantado (por ejemplo, durante pruebas de laboratorio y de campo). Entonces los resultados de tal estimación se transforman en una matriz de covarianza *a priori*, indicada en 908 en la figura 9. Luego, usando esta información *a priori* acerca del ruido, se calcula la estimación actual de la matriz de covarianza en la etapa 910. Luego, en la etapa 912 se calcula la ganancia de filtro. Después, en la etapa 914, se calcula la estimación óptima final del estado de máquina usando la predicción del estado de máquina a partir del periodo 916 previo.

Ahora se describirán detalles adicionales de la etapa de compensación de retardo (718) junto con la figura 10. Esta etapa es algo similar a la predicción de la etapa 704, pero también hay algunas diferencias. En primer lugar, en la etapa 704, las componentes de velocidad están disponibles usando los datos de sensor, de modo que para estimar la velocidad es razonable usar una interpolación. Sin embargo, en esta etapa de compensación de retardo (718), los datos de sensor ya no están disponibles, y las mediciones de velocidad se extrapolan hacia delante para el intervalo de retardo, comenzando desde el periodo actual, en la etapa 1008. El algoritmo de mínimos cuadrados con ponderación de intervalo de tiempo finito con aproximación parabólica se usa para la extrapolación. Esto usa no sólo los datos del periodo 1006 previo, sino también el registro de 20 de tales periodos 1004 anteriores. Se realiza una aproximación a estos datos registrados mediante una función parabólica para conseguir la desviación de mínimos cuadrados promedios entre los dos. Entonces se usa el resultado de extrapolación (concretamente el valor de la función parabólica en momentos de tiempo futuros) no sólo dentro del algoritmo actual, sino que también se exporta para su uso durante el cálculo de señal de control de la etapa 720. En la etapa 1010, las ecuaciones diferenciales del movimiento se integran hacia delante para que el intervalo de retardo dé como resultado la estimación de estado

de máquina final sin retardo, pero esta estimación se ve afectada por un error de extrapolación. Para velocidades comparablemente rápidas de movimiento de la máquina (más de 1 m/s) este error de extrapolación parece ser de aproximadamente 20 veces menor que el error provocado por un retardo de mediciones no compensado. El sistema de ecuaciones diferenciales de movimiento (es decir modelo dinámico, o en otros términos el predictor, de la máquina) que se integrará hacia delante requiere tres elementos de información: los datos iniciales, las estimaciones de la velocidad generalizada y el intervalo de tiempo. La mejor estimación de datos iniciales disponibles para el sistema en la etapa actual es el resultado del filtrado de Kalman en la etapa 706, que se usa en este caso. La velocidad generalizada procede de una extrapolación parabólica en la etapa 1008. El intervalo de tiempo es igual a alguna estimación *a priori* fija.

Ahora se describirán detalles adicionales del cálculo de señales de control (etapa 720) junto con la figura 11. En este punto, el sistema tiene una estimación precisa del estado 1102 de máquina y la velocidad generalizada de máquina obtenida de la etapa 718. Debido al conjunto exhaustivo propuesto de mediciones y estimación libre de retardo filtrada del estado de máquina según las técnicas de la presente invención, es posible aplicar diversas teorías conocidas de estabilidad y control a todo el sistema de control de *bulldozer*. Tales teorías se describen, por ejemplo, en H.K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 3ª edición (18 de diciembre de 2001) y A.F. Filippov, *Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides*, editado por F.M. Arscott, Kluwer Academic Publishers (diciembre de 1988). El algoritmo mostrado en la figura 11 es un cálculo bastante intenso, pero garantiza la estabilidad de la máquina de movimiento de tierra. Por tanto, el uso de las técnicas de la invención permite una nivelación sin oscilación a una velocidad horizontal relativamente rápida.

El algoritmo comienza en la etapa 1108 con el cálculo de una variedad objetivo octodimensional dentro de un espacio de estado 11-dimensional. Esta etapa 1108 usa los datos 1104 de superficie de diseño. Indicando el espacio 11-dimensional abstracto al que pertenece el estado 300 de máquina como espacio de estado, la superficie de diseño (es decir, el modelo de terreno digital) puede representarse como una variedad homogénea octodimensional dentro del espacio de estado. Cualquier punto en el espacio de estado representa el estado de máquina particular que corresponde a un punto en el espacio de estado, y la velocidad generalizada es un vector, aplicado al punto particular. El vector de velocidad general depende de las señales de control. El conjunto entero de posibles vectores se denomina campo vectorial. Tras elegir las señales de control, la integración de este campo vectorial proporciona la posible trayectoria de la máquina. El campo vectorial depende de los controles, que todavía son desconocidos, de modo que al elegir los valores de señales de control, dentro del conjunto de los admisibles, puede cambiarse el campo vectorial (es decir, reorientarse). El campo vectorial se genera en la etapa 1110 usando el conocimiento de la velocidad generalizada extrapolada de la máquina 1106 (que se calculó en la etapa 718). El rendimiento de la máquina mejorará si los controles se eligen de manera que la integración del campo vectorial proporciona un estado de máquina que alcanza la proximidad de tolerancia de la variedad objetivo en un tiempo mínimo posible y permanece aquí en el futuro. Por tanto, el problema de controlar la máquina se reduce al problema de reorientación del campo vectorial, que es un tipo especial de problema de minimización limitada, y se resuelve por un método similar a Newton de tipo continuo en la etapa 1112 usando el estado 1102 de máquina estimado, la velocidad generalizada de máquina estimada (de la etapa 718) y la variedad objetivo octodimensional de la etapa 1108. Los controles de la máquina deben estar, naturalmente, dentro de las limitaciones del control admisible de la máquina. El método similar a Newton de tipo continuo, que tiene la información y criterio descritos anteriormente, construye las ecuaciones diferenciales especiales para las variables de control, que luego se añaden a las ecuaciones de la máquina que van a integrarse conjuntamente. Las señales de control calculadas se envían al circuito conductor de válvula de la máquina en la etapa 1114.

REIVINDICACIONES

1. Máquina que comprende:

- 5 una primera (104) y segunda (106) antena de satélite montadas en una dirección longitudinal en dicha máquina y conectadas a un receptor (204, 206) de satélite;
- una tercera antena (108) de satélite unida a un elemento (112) operativo de dicha máquina y conectada a un receptor (208) de satélite;
- 10 un sensor (210) de referencia de gravedad montado en dicha máquina;
- una pluralidad de giroscopios (214) montados en dicha máquina; y
- 15 un procesador (222) informático para generar señales de control basándose en datos de sensor recibidos desde dichos receptores de satélite, sensor de referencia de gravedad y dicha pluralidad de giroscopios, caracterizada porque dicho procesador informático está configurado para:
- determinar un estado actual de la máquina usando dichos datos de sensor;
- 20 predecir un estado futuro de la máquina usando dicho estado actual e información de posición de un periodo anterior;
- calcular un estado de error reducido utilizando dicho estado actual determinado y dicho estado futuro predicho;
- 25 calcular un estado con compensación de retardo de la máquina que incluye una estimación de posición de máquina en un tiempo de cálculo de señal de control;
- calcular señales de control para dicho elemento operativo usando dicho estado con compensación de retardo; y
- 30 aplicar dichas señales de control a dicho elemento operativo.

35 2. Máquina según la reivindicación 1, en la que el estado de la máquina comprende una o más de: la posición del chasis principal de la máquina, la orientación del chasis principal de la máquina, la posición de dicho elemento operativo, la posición de un mecanismo de control de dicho elemento operativo.

3. Método para operar una máquina que comprende las etapas de y caracterizado por:

- 40 determinar un estado actual de la máquina usando datos desde sensores montados en dicha máquina;
- predecir un estado futuro de la máquina usando dicho estado actual e información de posición filtrada de un momento anterior;
- 45 calcular un estado de error reducido usando dicho estado determinado y dicho estado predicho;
- calcular un estado con compensación de retardo de la máquina, que incluye una estimación de posición de máquina en un tiempo de cálculo de señal de control, usando dicho estado de error reducido;
- 50 calcular señales de control para al menos un elemento operativo de dicha máquina usando dicho estado con compensación de retardo; y
- aplicar dichas señales de control a dicho al menos un elemento operativo.

55 4. Método según la reivindicación 3, en el que además dicha etapa de predecir comprende además la etapa de filtrado de Kalman.

60 5. Método según la reivindicación 3, en el que dicha máquina es un *bulldozer* y dicho al menos un elemento operativo es una pala, y en el que dicha etapa de calcular señales de control comprende además la etapa de calcular señales de control para una elevación y pendiente de dicha pala.

6. Método según la reivindicación 3, en el que dicha etapa de predecir comprende además las etapas de:

- 65 calcular una velocidad generalizada de la máquina;

calcular un intervalo de tiempo desde un periodo previo;

interpolarse la velocidad generalizada entre los periodos actuales y previos; y

5 añadir la velocidad generalizada integrada para un intervalo de tiempo desde el periodo previo y la estimación de estado de máquina previa.

7. Método según la reivindicación 6, en el que dicha etapa de calcular un estado con compensación de retardo de la máquina comprende además la etapa de:

10

extrapolarse dicha velocidad generalizada hacia delante para un intervalo de dicho retardo.

8. Método según la reivindicación 3, en el que dicha etapa de calcular señales de control para al menos un elemento operativo de dicha máquina comprende además las etapas de:

15

calcular una variedad objetivo dentro de un espacio de estado de dicha máquina usando datos de superficie de diseño;

20

calcular un campo vectorial que depende de la señal de control en dicho espacio de estado; y

generar una señal de control que orienta el campo vectorial dentro del espacio de estado para minimizar el tiempo que se necesita para que el estado de máquina alcance una proximidad de tolerancia de la variedad objetivo.

25

9. Método según la reivindicación 3, en el que el estado de máquina comprende una o más de:

la posición del chasis principal de la máquina, la orientación del chasis principal de la máquina, la posición de una pala de dicha máquina, la posición de un mecanismo de control de dicha pala.

FIG. 1A

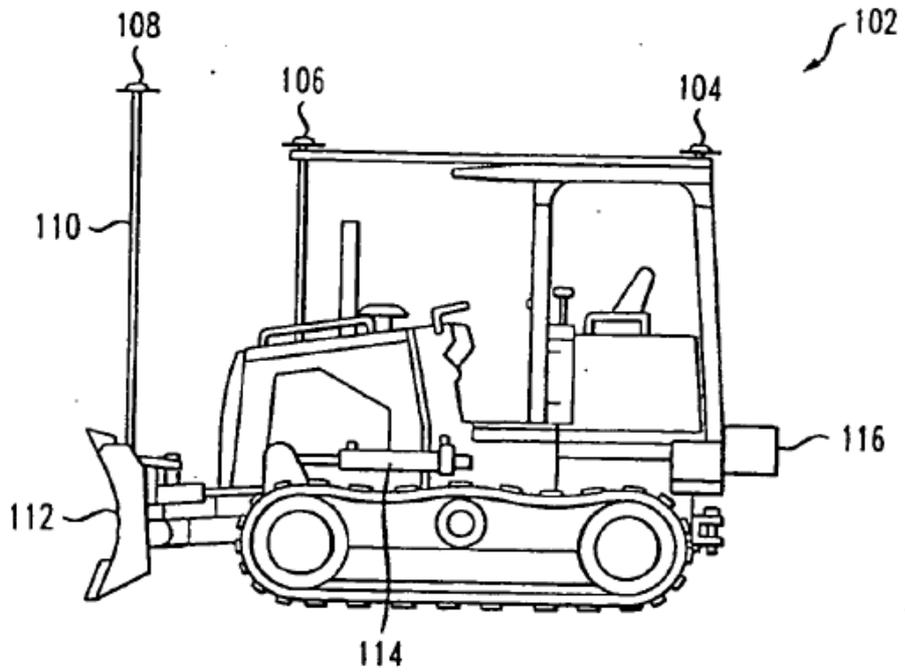
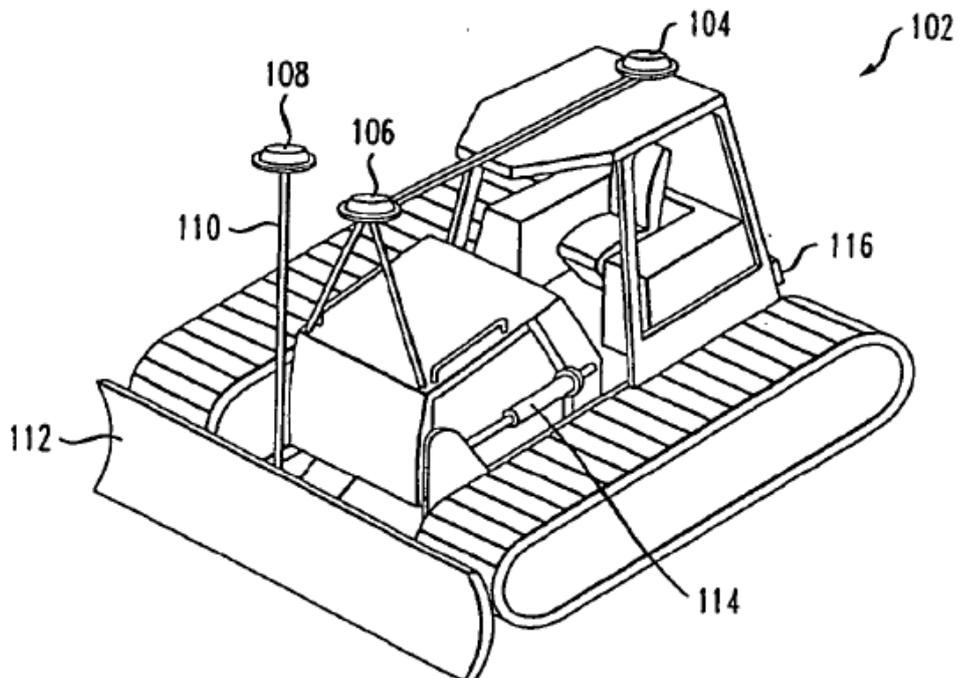


FIG. 1B



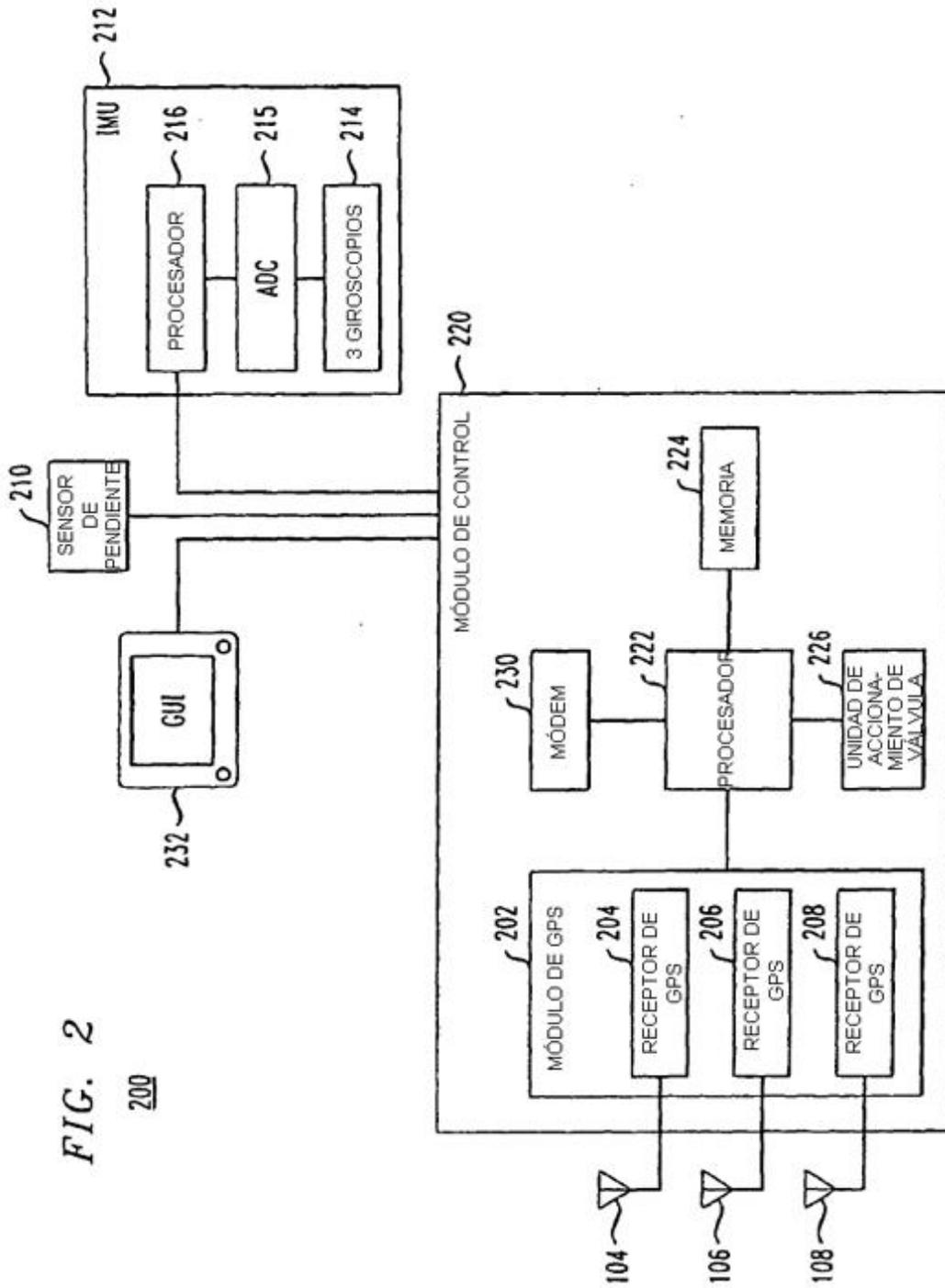


FIG. 2

200

FIG. 3

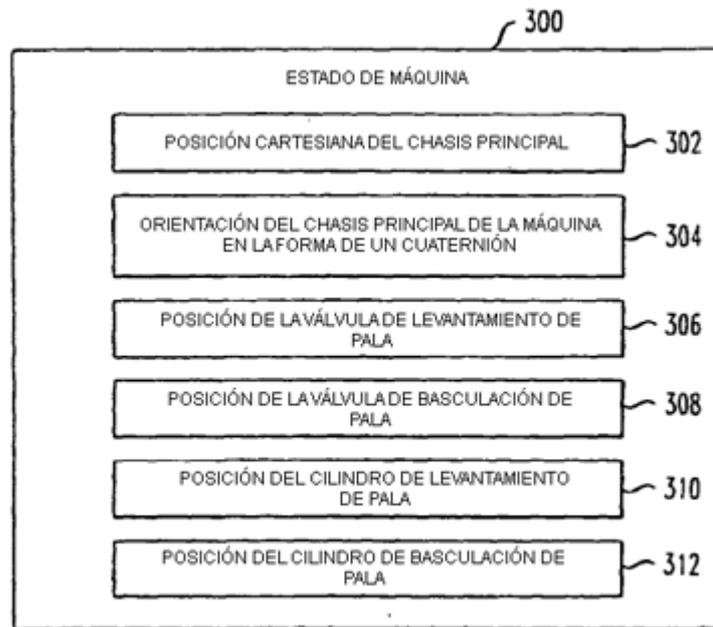


FIG. 4

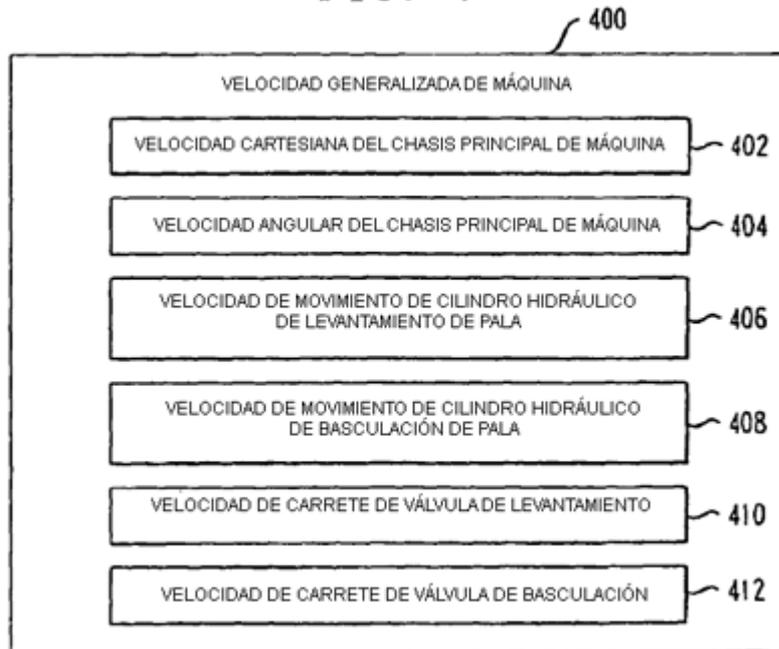


FIG. 5

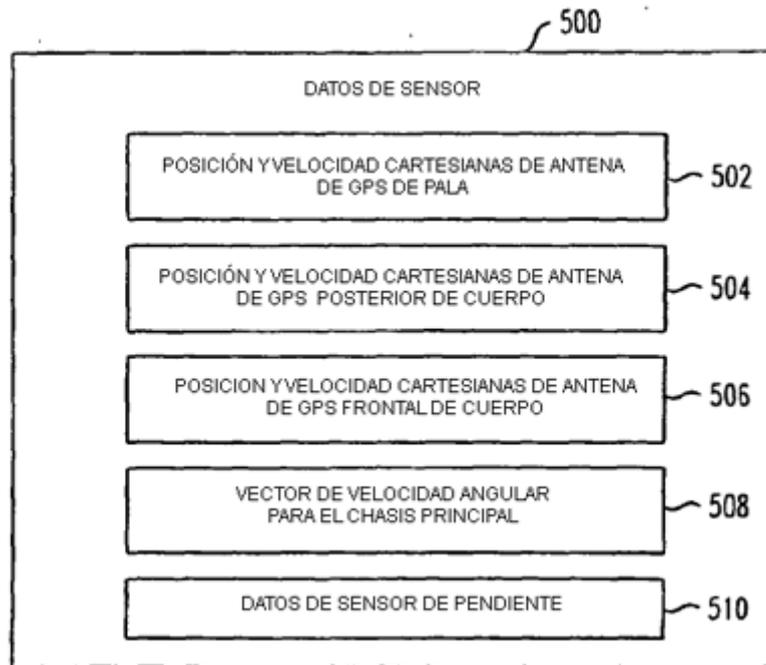


FIG. 6

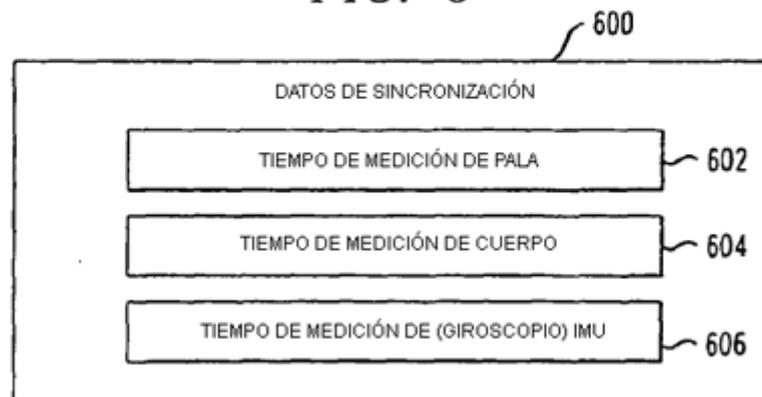


FIG. 7

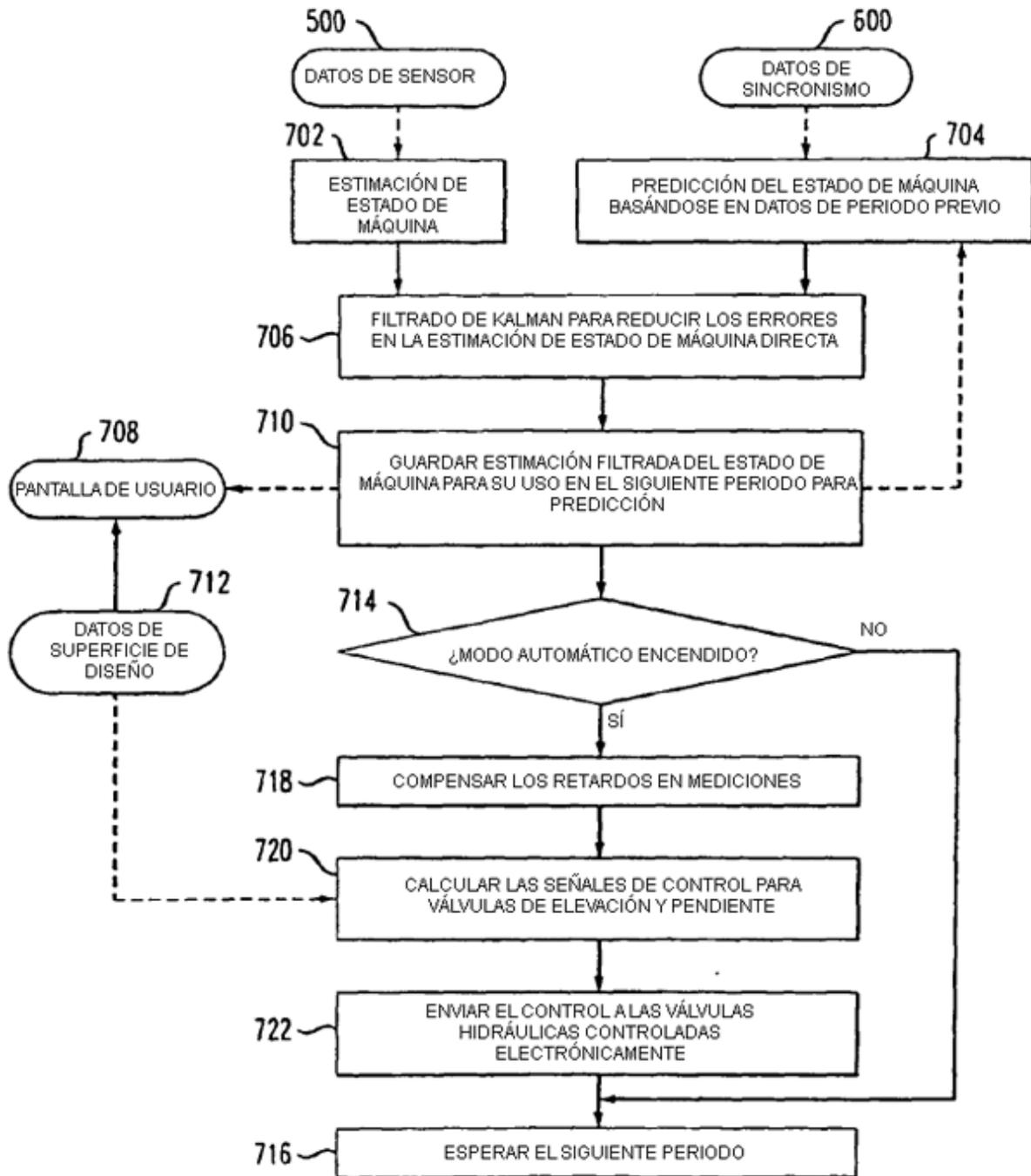


FIG. 8
704

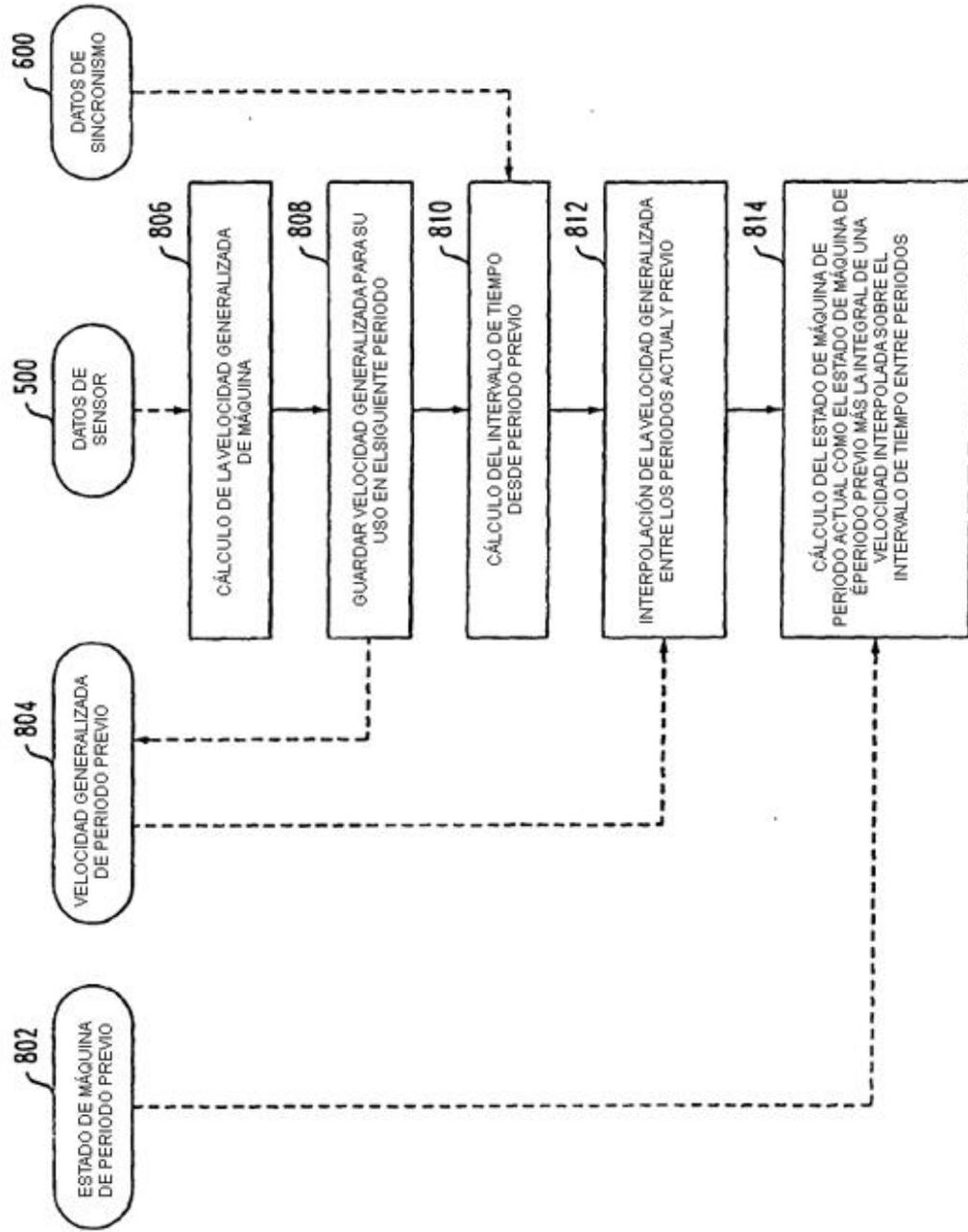


FIG. 9

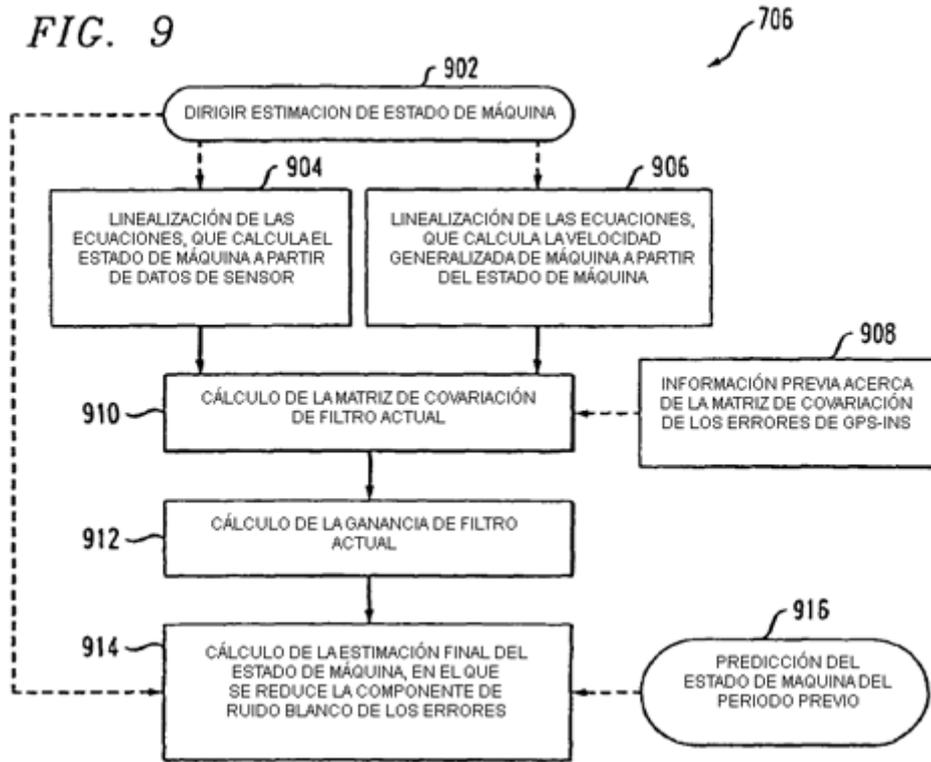


FIG. 10

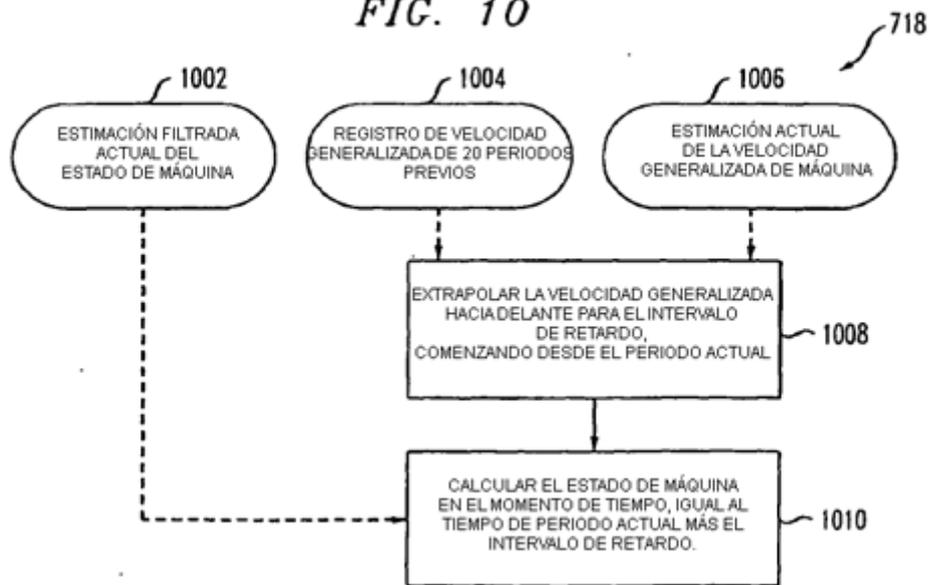


FIG. 11

