

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 744 473**

51 Int. Cl.:

G05D 1/08 (2006.01)

G01C 21/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.10.2012** **E 12186951 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.06.2019** **EP 2578995**

54 Título: **Filtro de Kalman modificado para la generación de correcciones de error de actitud**

30 Prioridad:

03.10.2011 US 201113251785

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

25.02.2020

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**LI, RONGSHENG;
TSAO, TUNG-CHING y
NAYAK, ARUNKUMAR P.**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 744 473 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

Filtro de Kalman modificado para la generación de correcciones de error de actitud

Antecedentes

- El rendimiento de un sistema de comunicación basado en satélite puede basarse en la capacidad para colocar y señalar de manera precisa los satélites de comunicación asociados. La actitud actual de un satélite de comunicación u otro vehículo espacial puede determinarse a partir de sensores inerciales integrados, tales como giroscopios, que miden las velocidades de rotación del vehículo espacial. Un ordenador de vuelo u otro sistema de control de guiado puede mantener la actitud actual del vehículo espacial integrando estas velocidades de rotación. Sin embargo, pequeños errores en las velocidades de rotación medidas pueden provocar que la actitud “cambie” es decir, se propague en errores de medición de actitud más y más grandes a lo largo del tiempo. Para corregir estos errores, el ordenador de vuelo puede utilizar mediciones de actitud procedentes de sensores de posicionamiento de actitud integrados (“APS”) adicionales, tales como rastreadores de campo estelar, balizas de RF terrestres, sensores de horizonte, y similares, que pueden proporcionar periódicamente una medición de la posición actual del vehículo espacial.
- Con el fin de combinar las mediciones de actitud procedentes de los sensores inerciales y las procedentes de los APS secundarios, el ordenador de vuelo puede utilizar un filtro de Kalman convencional, tal como un filtro de Kalman de 8 estados. Un filtro de Kalman usa un modelo dinámico del sistema (tal como las leyes físicas de movimiento de un satélite), entradas de control conocidas a ese sistema, y mediciones (tal como las procedentes de los sensores inerciales o APS) para formar una estimación de las cantidades de variación del sistema (su estado) que es mejor que la estimación obtenida usando cualquier medición por sí sola. Sin embargo, los cálculos que implican las matrices 8 x 8 en el filtro de Kalman de 8 estados pueden ser computacionalmente intensivos, lo que requiere más potencia de procesamiento de la que puede estar disponible en ordenadores de generación anterior, tales como los sometidos a prueba y calificados como listos para el vuelo para satélites y otros vehículos espaciales. Además, si las mediciones de actitud procedentes del APS secundario son irregulares y/o poco frecuentes, los cálculos de filtro de Kalman computacionalmente intensivo pueden ejecutarse múltiples veces sin obtener una nueva información a partir de la que corregir de mejor manera errores en las mediciones de sensor de inercia principal, desperdiciando, por tanto, el rendimiento del procesador en el ordenador de vuelo.

Es con respecto a estas consideraciones y otras que se presenta la divulgación realizada en el presente documento.

- El documento US 2008/0294342 A1, según su resumen, afirma “una unidad de estima que calcula la posición de vehículo a partir de un ángulo de cabeceo y un ángulo de guiñada de sensores de estima, un ángulo de cabeceo de instalación de sensor y un ángulo de guiñada de instalación de sensor, y una distancia de movimiento calculada mediante un sensor de velocidad, y calcula la velocidad del vehículo a partir de una señal de aceleración. En un primer ciclo, una primera unidad de corrección calcula la velocidad del vehículo a partir de la salida de señales procedentes del sensor de velocidad, y corrige el ángulo de cabeceo, el ángulo de cabeceo de instalación de sensor, y el ángulo de guiñada de instalación de sensor, basándose en la diferencia entre la velocidad del vehículo calculada de ese modo y la velocidad del vehículo calculada por la unidad de estima. En un segundo ciclo, una segunda unidad de corrección corrige el ángulo de cabeceo, el ángulo de cabeceo de instalación de sensor, el ángulo de guiñada, y el ángulo de guiñada de instalación de sensor, al usar una posición de vehículo y salida de velocidad a partir de un receptor de GPS y posición de vehículo y salida de velocidad a partir de la unidad de estima”.
- El documento US 6.691.033 B1, según su resumen, afirma que “se da a conocer un método y aparato para determinar desalineaciones de rastreador estelar. El método comprende las etapas de definir un marco de referencia para el conjunto de rastreador estelar según una línea de calibración del rastreador estelar principal y una línea de calibración de un segundo rastreador estelar en el que la línea de calibración del rastreador estelar principal y un plano abarcado por la línea de calibración del rastreador estelar principal y la línea de calibración del segundo rastreador estelar definen al menos parcialmente un punto de referencia para el marco de referencia para el conjunto de rastreador estelar; y determinar la desalineación del al menos un rastreador estelar como una rotación del marco de referencia definido”.

Sumario

- Según la presente divulgación, se proporciona un método y un medio de almacenamiento legible por ordenador tal como se expone en las reivindicaciones independientes adjuntas. Las realizaciones adicionales de la invención se dan a conocer en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

- La figura 1 es un diagrama de bloques que muestra aspectos de un entorno de funcionamiento ilustrativo y componentes de software proporcionados por las realizaciones presentadas en el presente documento;
- la figura 2 es un diagrama de flujo que ilustra un método para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud, tal como se proporciona en las realizaciones presentadas en el presente

documento; y

la figura 3 es una fórmula matemática que muestra una división ilustrativa de una matriz 8×8 , según realizaciones presentadas en el presente documento; y

5 la figura 4 es un diagrama de bloques que muestra un hardware informático y arquitectura de software ilustrativos para un sistema informático que puede implementar aspectos de las realizaciones presentadas en el presente documento.

Descripción detallada

10 La siguiente descripción detallada se refiere a métodos, sistemas, y medios legibles por ordenador para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud. Al utilizar los conceptos y tecnologías descritos en el presente documento, puede implementarse un filtro de Kalman modificado numéricamente eficaz que requiere un rendimiento de procesador mucho menor que un filtro de Kalman de 8 estados convencional. La solución se beneficia de la naturaleza dispersa de las matrices 8×8 en el filtro de Kalman de 8 estados convencional dividiendo las matrices en matrices por bloques de 3×3 , 3×2 , 2×3 , y 2×2 y eliminando una parte significativa de los cálculos innecesarios. Además, los cálculos de propagación de covarianza se realizan en una única etapa, en lugar de muchas repeticiones con un tiempo corto de etapa, usando ecuaciones derivadas analíticamente para gestionar mediciones asíncronas procedentes de sensores secundarios que tienen un gran tiempo de muestreo. Las ecuaciones de marco de referencia-cuerpo también se utilizan, que son más sencillas y más eficaces que las ecuaciones de marco inercial centrado en la tierra ("ECI"). Las correcciones de actitud a partir del filtro de Kalman modificado pueden entonces volver a transformarse en marco de ECI antes de proporcionarse al ordenador de vuelo.

Aunque el contenido descrito en el presente documento se presenta en el contexto general de módulos de programa que se ejecutan junto con otros módulos en un ordenador de vuelo de un vehículo espacial, los expertos en la técnica reconocerán que pueden realizarse otras implementaciones en combinación con otros tipos de módulos de programa. Generalmente, los módulos de programa incluyen rutinas, programas, componentes, estructuras de datos y otros tipos de estructuras que realizan tareas particulares o implementan tipos de datos abstractos particulares. Además, los expertos en la técnica apreciarán que el contenido descrito en el presente documento puede llevarse a la práctica con otras configuraciones de sistema informático, incluyendo ordenadores de vuelo con base en la tierra, arquitecturas de computación distribuidas, sistemas de multiprocesador, marcos principales, miniordenadores, ordenadores de escritorio basados en microprocesador, dispositivos portátiles, dispositivos de hardware con fines especiales, y similares.

En la siguiente descripción detallada, se hace referencia a los dibujos adjuntos que forman parte de la misma y que muestran, a modo de ilustración, realizaciones específicas o ejemplos. Haciendo referencia a los dibujos, números similares representan elementos similares en la totalidad de las diversas figuras.

35 La figura 1 muestra un entorno 100 de funcionamiento ilustrativo que incluye componentes de software para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud, según realizaciones proporcionadas en el presente documento. El entorno 100 incluye un módulo 102 de control de actitud que se ejecuta en un ordenador 104 de vuelo. El ordenador 104 de vuelo puede representar un ordenador u ordenadores integrados en un satélite de comunicación u otro vehículo espacial, un ordenador de vuelo con base en la tierra en comunicación con el vehículo espacial, un sistema de aviónica de una aeronave, un ordenador de simulación de vuelo, y similares. El módulo 102 de control de actitud puede ser el responsable de determinar la actitud del vehículo espacial, así como de señalar de manera precisa o "direccionar" el vehículo espacial con el fin de situar el vehículo espacial en una orientación particular con respecto a un marco de referencia-cuerpo o marco de ECI según se requiera para el correcto funcionamiento del vehículo espacial. El módulo 102 de control de actitud puede implementarse como software, hardware, o una combinación de los dos y puede ejecutarse en uno o más procesadores del ordenador 104 de vuelo.

El ordenador 104 de vuelo puede recibir mediciones 106A de actitud (denominadas en el presente documento generalmente como mediciones 106 de actitud) a partir de sensores 108 de actitud principales integrados en el vehículo espacial. Según realizaciones, los sensores 108 de actitud principales comprenden sensores inerciales, tales como giroscopios. Las mediciones 106A de actitud recibidas a partir de los sensores 108 de actitud principales pueden comprender velocidades de rotación. Un módulo 116 de integración puede integrar las velocidades de rotación recibidas a partir de los sensores 108 de actitud principales con el fin de determinar una actitud actual del vehículo espacial. El módulo 102 de control de actitud puede recibir las velocidades de rotación integradas. El módulo 116 de integración puede recibir las mediciones 106A de actitud a partir de los sensores 108 de actitud principales a un intervalo frecuente y regular, tal como a una velocidad entre 0,1KHz y 10 KHz. Tal como se comentó anteriormente, los pequeños errores en las velocidades de rotación que comprenden las mediciones 106A de actitud recibidas a partir de los sensores 108 de actitud principales pueden provocar que la actitud actual determinada por el módulo 102 de control de actitud cambie a lo largo del tiempo.

Con el fin de corregir el cambio en la determinación de actitud, el módulo 102 de control de actitud puede utilizar,

además, mediciones 106B de actitud recibidas a partir de sensores 110 de actitud secundarios. Los sensores 110 de actitud secundarios pueden comprender sensores de posicionamiento de actitud ("APS"), tal como rastreadores de campo estelar, balizas de RF terrestres, sensores de horizonte, y similares. Los APS 110 secundarios pueden ubicarse integrados al vehículo espacial y/o en la tierra y están configurados para transmitir las mediciones 106B de actitud de posicionamiento correspondientes con respecto al vehículo espacial al ordenador 104 de vuelo. Según realizaciones adicionales, los sensores 110 de actitud secundarios pueden producir las mediciones 106B de actitud de posicionamiento a una velocidad poco frecuente y/o irregular, tal como una vez en un minuto o una vez a la hora.

El entorno 100 incluye, además, un módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud que se ejecuta en el ordenador 104 de vuelo. El módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede implementarse como software, hardware, o una combinación de los dos y puede ejecutarse en uno o más procesadores del ordenador 104 de vuelo. Según realizaciones, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud implementa un filtro de Kalman modificado que combina las mediciones 106B de actitud de posicionamiento procedentes de los APS 110 secundarios con las velocidades de rotación integradas que comprenden las mediciones 106A de actitud procedentes de los sensores 108 de actitud principales con el fin de generar datos 114 de corrección de error de actitud, tal como se describirá en más detalle a continuación con respecto a la figura 2. El módulo 102 de control de actitud utiliza los datos 114 de corrección de error de actitud para contrarrestar el cambio en la actitud actual según se calcula a partir de las velocidades de rotación recibidas a partir de los sensores 108 de actitud principales.

Haciendo referencia ahora a la figura 2, se proporcionarán detalles adicionales con respecto a realizaciones presentadas en el presente documento para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud. Debe apreciarse que las operaciones lógicas descritas en el presente documento se implementan (1) como una secuencia de acciones implementadas en ordenador o módulos de programa que se ejecutan en un sistema informático y/o (2) como circuitos lógicos de máquina interconectados o módulos de circuito dentro del sistema informático. La implementación es una elección que depende del rendimiento y otros parámetros de funcionamiento del sistema informático. Por consiguiente, las operaciones lógicas descritas en el presente documento se denominan de manera variada como operaciones, dispositivos estructurales, acciones o módulos. Estas operaciones, dispositivos estructurales, acciones y módulos pueden implementarse en software, en firmware, hardware, en lógica digital con fines especiales, y cualquier combinación de los mismos. También debe apreciarse que pueden realizarse más o menos operaciones de las mostradas en las figuras y descritas en el presente documento. Estas operaciones también pueden realizarse en paralelo, o en un orden diferente al descrito en el presente documento.

La figura 2 muestra una rutina 200 para usar ecuaciones derivadas de un algoritmo de filtro de Kalman para generar datos 114 de corrección de error de actitud para su uso por el módulo 102 de control de actitud al calcular la actitud actual del vehículo espacial. En una realización, la rutina 200 se realiza mediante el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud descrito anteriormente con respecto a la figura 1. Se apreciará que la rutina 200 también puede realizarse por otro módulo o componente del ordenador 104 de vuelo, o por cualquier combinación de módulos y componentes.

La rutina 200 comienza en la operación 202, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud recibe mediciones 106B de actitud procedentes de los sensores 110 de actitud secundarios. Por ejemplo, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede recibir mediciones 106B de actitud de posicionamiento a partir de los APS 110 secundarios desde una baliza de RF con base en la tierra detectada en el vehículo espacial. Tal como se describió anteriormente con respecto a la figura 1, las mediciones 106B de actitud procedentes de los sensores 110 de actitud secundarios pueden recibirse de manera irregular y/o de manera poco frecuente, tal como aproximadamente una vez en un minuto o una vez a la hora.

A partir de la operación 202, la rutina 200 avanza a la operación 204, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud calcula la parte útil de la matriz de estado-transición, denominada generalmente como la matriz F, usando las recién recibidas mediciones 106B de actitud de posicionamiento a partir de los APS 110 secundarios. Según realizaciones, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud realiza solo un subconjunto de los cálculos realizados convencionalmente en un filtro de Kalman de 8 estados. Esto se logra mediante la división de las matrices 8×8 en matrices por bloques de 3×3 , 3×2 , 2×3 y 2×2 . Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 3, la matriz F de 8×8 puede dividirse en nueve submatrices por bloques: F_{11} , F_{12} , F_{13} , F_{21} , F_{22} , F_{23} , F_{31} , F_{32} y F_{33} . Las submatrices F_{11} , F_{12} , F_{21} y F_{22} son matrices de 3×3 , las submatrices F_{13} y F_{23} son matrices de 3×2 , las submatrices F_{31} y F_{32} son matrices de 2×3 , y la submatriz F_{33} es una matriz de 2×2 . Se apreciará que pueden ser posibles otros esquemas de división que darán como resultado otras submatrices por bloques, y la división de las matrices en submatrices más granulares puede proporcionar una eficacia adicional, pero puede hacer que el modelo sea demasiado complejo.

Tras la división, las ecuaciones de filtro de Kalman para las matrices de 8×8 convencionales se amplían a una serie de ecuaciones más pequeñas para las submatrices, siendo cada una de las cuales menos numéricamente intensiva que las ecuaciones de 8×8 . Las ecuaciones para estas submatrices por bloques que contienen valores cero pueden abandonarse, y otras que dan como resultado valores fijos pueden calcularse previamente, dejando un número de ecuaciones menos computacionalmente intensivas, más pequeñas para las submatrices importantes que van a realizarse por el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud. Se apreciará además que la división de la

matriz en submatrices por bloques más pequeñas, la ampliación de las ecuaciones para las submatrices por bloques, y la determinación de las submatrices consecuenciales y ecuaciones ampliadas resultantes pueden derivarse analíticamente fuera de línea, programándose el modelo resultante en el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud del ordenador 104 de vuelo. Por tanto, los cálculos realizados por el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud pueden ser mucho más eficaces numéricamente y requerir mucha menos potencia de procesamiento que los de un filtro de Kalman de 8 estados convencional.

Según una realización, al usar las ecuaciones ampliadas descritas anteriormente, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud realiza los siguientes cálculos para actualizar las submatrices F_{11} y F_{12} de la matriz de estado-transición (F):

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$c = \cos(\omega \Delta t)$$

$$s = \sin(\omega \Delta t)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} c & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ -s & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$F_{12} = - \begin{bmatrix} -s/\omega & 0 & c - 1/\omega \\ 0 & 1 - \Delta t & 0 \\ -2 \sin^2(\frac{\omega \Delta t}{2})/\omega & 0 & -s/\omega \end{bmatrix}$$

en donde Δt representa el tiempo entre mediciones 106B de actitud de posicionamiento y ω representa la velocidad de rotación. Se observará que los cálculos solo requieren que se calcule una función de seno y una de coseno, reduciendo significativamente la potencia de procesamiento requerida para los cálculos. Las ecuaciones restantes solo usan operaciones algebraicas sencillas. El resto de la matriz de estado-transición (F) puede calcularse previamente de manera que:

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & I_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

La rutina 200 avanza desde la operación 204 hasta la operación 206, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud calcula la parte útil de la matriz de covarianza del procedimiento, o la matriz "Q". Tal como se utiliza en el presente documento, la matriz Q representa la realización de la matriz de covarianza de ruido de procedimiento en un tiempo "discreto", también denominada Q_k . La matriz Q se divide de manera similar a la matriz F descrita anteriormente, y el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud realiza los siguientes cálculos para actualizar las submatrices Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} , Q_{22} y Q_{33} de la matriz Q:

$$Q_{11} = \begin{bmatrix} s_{arw} \Delta t + 2s_{rrw} \frac{(\omega \Delta t - s)}{\omega^3} & 0 & s0 \\ 0 & s_{arw} \Delta t + \frac{1}{3} s_{rrw} \Delta t^3 & 0 \\ 0 & 0 & s_{arw} \Delta t + 2s_{rrw} \frac{(\omega \Delta t - s)}{\omega^3} \end{bmatrix}$$

$$Q_{12} = - \begin{bmatrix} s_{rrw} \frac{(1 - c)}{\omega^2} & 0 & s_{rrw} \frac{(\omega \Delta t - s)}{\omega^2} \\ 0 & \frac{1}{2} s_{rrw} \Delta t^2 & 0 \\ s_{rrw} \frac{(\omega \Delta t - s)}{\omega^2} & 0 & s_{rrw} \frac{(1 - c)}{\omega^2} \end{bmatrix}$$

$$Q_{21} = Q_{12}^T$$

$$Q_{22} = s_{rrw} \Delta t I_{3 \times 3}$$

$$Q_{33} = s_{brw} \Delta t I_{2 \times 2}$$

en donde s_{arw} es la varianza del ruido de recorrido aleatorio angular del sensor de velocidad inercial, s_{rrw} es la varianza del ruido de recorrido aleatorio de velocidad del sensor de velocidad inercial, y s_{brw} es la varianza del ruido de desviación de baliza. Se observará que la submatriz Q_{11} es diagonal, y que la submatriz Q_{12} tiene cuatro ceros. El

5

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0_{3 \times 2} \\ Q_{21} & Q_{22} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & Q_{33} \end{bmatrix}$$

Desde la operación 206, la rutina 200 avanza a la operación 208, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud calcula la parte útil de la matriz de covarianza propagada, o la matriz "P". El módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede usar las siguientes ecuaciones para calcular las submatrices de la matriz de covarianza propagada prevista, o la matriz "Pp", a partir de la matriz de estado-transición (F) y la matriz de covarianza de procedimiento (Q):

10

$$J = F_{12} P_{12}^T F_{11}^T$$

$$P_{11}^p = F_{11} P_{11} F_{11}^T + J + J^T + F_{12} P_{22} F_{12}^T + Q_{11}$$

$$P_{12}^p = F_{11} P_{12} + F_{12} P_{22} + Q_{12}$$

$$P_{13}^p = F_{11} P_{13} + F_{12} P_{23}$$

$$P_{22}^p = P_{22} + Q_{22}$$

$$P_{23}^p = P_{23}$$

$$P_{33}^p = P_{33} + Q_{33}$$

La rutina 200 avanza desde la operación 208 hasta la operación 210, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud calcula la parte útil de las computaciones de ganancia. Por ejemplo, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede, en primer lugar, computar las submatrices de ganancia G_1 , G_2 , y G_3 usando lo siguiente:

15

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^p H_1^T + P_{13}^p H_3^T \\ P_{21}^p H_1^T + P_{23}^p H_3^T \\ P_{31}^p H_1^T + P_{33}^p H_3^T \end{bmatrix}$$

en donde la matriz H representa la matriz de observación del filtro de Kalman. A continuación, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede producir la matriz de covarianza actualizada (P) a partir de las matrices de ganancia G_1 , G_2 , y G_3 y la matriz de covarianza propagada o prevista (Pp) usando los siguientes cálculos:

20

$$Z = H_1 G_1 + H_3 G_3 + R$$

$$invZ = \frac{1}{(Z(1,1)Z(2,2) - Z(1,2)Z(2,1))} \begin{bmatrix} Z(2,2) & -Z(1,2) \\ -Z(2,1) & Z(1,1) \end{bmatrix}$$

$$K_1 = G_1(invZ)$$

$$K_2 = G_2(invZ)$$

$$K_3 = G_3(invZ)$$

$$P_{11} = P_{11}^p - K_1 G_1^T$$

$$P_{12} = P_{12}^p - K_1 G_2^T$$

$$P_{13} = P_{13}^p - K_1 G_3^T$$

$$P_{22} = P_{22}^p - K_2 G_2^T$$

$$P_{23} = P_{23}^p - K_2 G_3^T$$

$$P_{33} = P_{33}^p - K_3 G_3^T$$

Se observará que, usando las ecuaciones anteriores, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede calcular y actualizar la covarianza en una única etapa, en lugar de en múltiples etapas repetitivas tal como en las ecuaciones de filtro de Kalman convencionales.

Desde la operación 210, la rutina 200 avanza hasta la operación 212, en donde el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud genera los datos 114 de corrección de error de actitud a partir de las matrices de ganancia G_1 , G_2 , y G_3 calculadas anteriormente. Por ejemplo, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede, en primer lugar, computar la δy residual usando lo siguiente:

$$\delta y = y - \hat{y}$$

en donde y es la medición real procedente del sensor de actitud secundario e $\hat{y}$ es la predicción del valor para y basándose en el estado de filtro de Kalman propagado. A continuación, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud calcula la corrección de actitud en el marco de referencia-cuerpo $\delta^B \theta$ usando la siguiente ecuación:

$$\delta^B \theta = G_1 \delta y$$

Según una realización, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede entonces convertir la corrección de actitud en el marco de referencia-cuerpo $\delta^B \theta$ en una corrección de actitud en el marco de referencia ECI $\delta^{ECI} \theta$ usando la siguiente ecuación:

$$\delta^{ECI} \theta = C_B^{ECI} \delta^B \theta$$

en donde C_B^{ECI} es una matriz de 3 x 3 variable en el tiempo que representa el cuerpo de vehículo espacial con respecto a la matriz de transformación de marco de ECI. Mientras que los cálculos de marco de referencia-cuerpo son numéricamente más sencillos, requiriendo menos potencia de procesamiento para computar, la corrección de actitud puede convertirse en el marco de referencia de ECI con el fin de retener la intensividad-tiempo de los cálculos de ECI en el módulo 102 de control de actitud.

Además, el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud puede actualizar un valor de desvío de giroscopio y un valor de desvío de baliza de referencia a partir de las matrices de ganancia y la residual usando las siguientes ecuaciones:

$$b_g = b_g + G_2 \delta y$$

$$b_b = b_b + G_3 \delta y$$

El valor de desvío de giroscopio puede usarse por el módulo 102 de control de actitud en el valor recibido integrado de las mediciones de velocidad de sensor inercial, retirando las mediciones de velocidad de desvío, al tiempo que el

desvío de baliza de referencia puede usarse para ajustar las mediciones de baliza. Tal como se describió anteriormente con respecto a la figura 1, el módulo 102 de control de actitud utiliza los datos 114 de corrección de error de actitud generados para contrarrestar el cambio en la actitud actual tal como se calcula a partir de las velocidades de rotación recibidas a partir de los sensores 108 de actitud principales. Desde la operación 212, la rutina 200 finaliza.

La figura 4 muestra un ordenador 400 ilustrativo que puede ejecutar los componentes de software descritos en el presente documento para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud, de la manera presentada anteriormente. El ordenador 400 puede realizarse en un único dispositivo informático o en una combinación de una o más unidades de procesamiento, unidades de almacenamiento, y/u otros dispositivos informáticos implementados en el ordenador 104 de vuelo de un vehículo espacial, en sistemas informáticos con base en la tierra, o una combinación de los dos. El ordenador 400 incluye una o más unidades 402 de procesamiento central ("CPU"), una memoria 408 de sistema, que incluye una memoria 414 de acceso aleatorio ("RAM") y una memoria 416 de solo lectura ("ROM"), y un bus 404 de sistema que acopla la memoria a las CPU 402.

Las CPU 402 pueden ser procesadores programables convencionales que realizan las operaciones lógicas y aritméticas necesarias para el funcionamiento del ordenador 400. Las CPU 402 pueden realizar las operaciones necesarias cambiando de un estado físico, discreto al siguiente a través de la manipulación de elementos de conmutación que distinguen entre y cambian estos estados. Generalmente, los elementos de conmutación pueden incluir circuitos electrónicos que mantienen uno de dos estados binarios, tales como circuitos biestables, y circuitos electrónicos que proporcionan un estado de salida basándose en la combinación lógica de los estados de uno o más elementos de conmutación adicionales, tales como compuertas lógicas. Estos elementos de conmutación básicos pueden combinarse para crear circuitos lógicos más complejos, incluyendo registros, sumadores-restadores, unidades de lógica aritmética, unidades de puntos de flotación y similares.

El ordenador 400 también incluye un dispositivo 410 de almacenamiento masivo. El dispositivo 410 de almacenamiento masivo puede estar conectado a las CPU 402 a través de un controlador de almacenamiento masivo (no se muestra) conectado adicionalmente al bus 404. El dispositivo 410 de almacenamiento masivo y sus medios legibles por ordenador asociados proporcionan almacenamiento no transitorio, no volátil al ordenador 400. El dispositivo 410 de almacenamiento masivo puede almacenar un sistema de gestión de vuelo y/u otros sistemas de aviónica para el vehículo espacial, así como módulos de aplicación específicos u otros módulos de programa, tales como el módulo 102 de control de actitud y el módulo 112 de filtro de corrección de error de actitud descritos anteriormente con respecto a la figura 1. El dispositivo 410 de almacenamiento masivo también puede almacenar datos recogidos o utilizados por los diversos sistemas y módulos.

El ordenador 400 puede almacenar programas y datos en el dispositivo 410 de almacenamiento masivo transformando el estado físico del dispositivo de almacenamiento masivo para reflejar la información que se almacena. La transformación específica de estado físico puede depender de diversos factores, en diferentes implementaciones de esta divulgación. Ejemplos de tales factores pueden incluir, pero no se limitan a, la tecnología usada para implementar el dispositivo 410 de almacenamiento masivo, si el dispositivo de almacenamiento masivo está caracterizado como almacenamiento principal o secundario y similares. Por ejemplo, el ordenador 400 puede almacenar información en el dispositivo 410 de almacenamiento masivo emitiendo instrucciones a través del controlador de almacenamiento para alterar las características magnéticas de una ubicación particular dentro de un dispositivo de unidad de disco magnético, las características reflectantes o refractivas de una ubicación particular en un dispositivo de almacenamiento óptico, o las características eléctricas de un condensador, transistor u otro componente discreto particular en un dispositivo de almacenamiento de estado sólido. El ordenador 400 puede leer adicional a partir de la información del dispositivo 410 de almacenamiento masivo detectando las características o estados físicos de una o más ubicaciones particulares dentro del dispositivo de almacenamiento masivo.

Aunque la descripción de medios legibles por ordenador contenidos en el presente documento se refiere a un dispositivo de almacenamiento masivo, tal como un disco duro o unidad de CD-ROM, debe apreciarse por los expertos en la técnica que los medios legibles por ordenador pueden ser cualquier medio informático disponible al que pueda accederse por el ordenador 400. Los medios legibles por ordenador incluyen medios de comunicación, tales como señales, y medios de almacenamiento legibles por ordenador. A modo de ejemplo, y no de limitación, medios de almacenamiento legibles por ordenador incluyen medios volátiles y no volátiles, extraíbles y no extraíbles implementados en cualquier método o tecnología para el almacenamiento de información, tal como instrucciones legibles por ordenador, estructuras de datos, módulos de programa u otros datos. Por ejemplo, los medios de almacenamiento legibles por ordenador incluyen, pero no se limitan a, RAM, ROM, EPROM, EEPROM, memoria rápida u otra tecnología de memoria de estado sólido, CD-ROM, discos versátiles digitales ("DVD"), HD-DVD, BLU-RAY, u otro almacenamiento óptico, casetes magnéticos, cinta magnética, almacenamiento de disco magnético u otros dispositivos de almacenamiento magnético, o cualquier otro medio que pueda usarse para almacenar la información deseada de manera no transitoria y al que tenga acceso el ordenador 400. Según una realización, el ordenador 400 puede tener acceso a los medios de almacenamiento legibles por ordenador que almacenan instrucciones ejecutables por ordenador que, cuando se ejecutan por el ordenador, realizan la rutina 200 para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud, tal como se describió anteriormente con respecto a la figura 2.

Según diversas realizaciones, el ordenador 400 puede funcionar en un entorno de red usando conexiones lógicas a otra aviónica y sistemas en el vehículo espacial o a ordenadores en tierra a través de una red, tal como la red 420. El ordenador 400 puede conectarse a la red 420 a través de una unidad 406 de interfaz de red conectada al bus 404. Debe apreciarse que la unidad 406 de interfaz de red también puede utilizarse para conectarse a otros tipos de redes y sistemas informáticos remotos. El ordenador 400 también puede incluir un controlador 412 de entrada/salida para proporcionar salida a controles de actitud y otros dispositivos, unidades de visualización y similares. De manera similar, el controlador 412 de entrada/salida puede recibir entradas procedentes del sensor y otros dispositivos, tales como los sensores 108, 110 de actitud primario y secundario descritos anteriormente con respecto a la figura 1. El controlador 412 de entrada/salida puede recibir además entradas procedentes de dispositivos de entrada, tales como un teclado, un ratón, una estilográfica electrónica, una pantalla táctil asociada con una unidad de visualización y similares. Se apreciará además que el ordenador 400 puede no incluir todos los componentes mostrados en la figura 4, puede incluir otros componentes que no se muestran de manera explícita en la figura 4, o puede utilizar una arquitectura completamente diferente a la mostrada en la figura 4.

Basándose en lo anterior, debe apreciarse que en el presente documento se proporcionan tecnologías para usar un filtro de Kalman modificado para generar correcciones de error de actitud. Aunque el contenido presentado en el presente documento se ha descrito en un lenguaje específico con respecto a características informáticas estructurales, acciones metodológicas, y medios legibles por ordenador, ha de comprenderse que la invención definida en las reivindicaciones adjuntas no se limita necesariamente a las características, acciones, o medios específicos descritos en el presente documento. En lugar de eso, las características, acciones, y medios específicos se dan a conocer como formas de ejemplo de implementar las reivindicaciones.

El contenido descrito anteriormente se proporciona solo a modo de ilustración y no debe considerarse como limitativo. Pueden realizarse diversas modificaciones y cambios al contenido descrito en el presente documento sin alejarse del alcance de la presente divulgación, que se expone en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende instrucciones ejecutables por ordenador que, cuando se ejecutan por un ordenador (400), provocan que el ordenador:
reciba (202) mediciones (106B) de actitud a partir de sensores (110) de actitud secundarios; y
- 5 genere (212) valores (114) de corrección de error de actitud para mediciones (106A) de actitud a partir de sensores (108) de actitud principales basándose en las mediciones (106B) de actitud procedentes de los sensores (110) de actitud secundarios usando ecuaciones ampliadas derivadas para un subconjunto de una pluralidad de submatrices por bloques divididas en bloques de 3x3, 3x2, 2x3 y 2x2 a partir de las matrices de 8x8 de un filtro (112) de Kalman de 8 estados, calculándose previamente un resto de la pluralidad de submatrices por bloque.
- 10 2. Medio de almacenamiento legible por ordenador según la reivindicación 1, que comprende, además, instrucciones ejecutables por ordenador que provocan que el ordenador (400) propague y actualice (210) una covarianza del filtro (112) de Kalman en una única etapa con un periodo de actualización aleatorio.
3. Medio de almacenamiento legible por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en el que las ecuaciones ampliadas derivadas para el subconjunto de la pluralidad de submatrices por bloques utilizan ecuaciones de filtro de Kalman de marco de referencia-cuerpo, y en el que los valores (114) de corrección de error de actitud se convierten de nuevo en un valor de referencia de marco inercial centrado en la tierra antes de proporcionarse a un módulo (102) de control de actitud.
- 15 4. Medio de almacenamiento legible por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en el que una o más de las submatrices por bloques divididas a partir de las matrices del filtro (112) de Kalman son asimétricas.
- 20 5. Medio de almacenamiento legible por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en el que las mediciones (106B) de actitud se reciben a partir de los sensores (110) de actitud secundarios a intervalos irregulares o poco frecuentes.
6. Medio de almacenamiento legible por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en el que las ecuaciones ampliadas derivadas para el subconjunto de la pluralidad de submatrices por bloques incluyen solo una función de seno y una de coseno que van a calcularse.
- 25 7. Medio de almacenamiento legible por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en el que el ordenador comprende un ordenador de vuelo integrado en un vehículo espacial.
8. Método implementado por ordenador de generación de valores de corrección de error de actitud para mediciones de actitud de un vehículo espacial a partir de sensores de actitud principales, comprendiendo el método:
recibir (202) mediciones (106B) de actitud a partir de sensores (110) de actitud secundarios; y
- 30 generar mediante un ordenador (212) los valores (114) de corrección de error de actitud basándose en las mediciones (106B) de actitud procedentes de los sensores (110) de actitud secundarios usando ecuaciones ampliadas derivadas para un subconjunto de submatrices por bloques de 3 x 3, 3 x 2, 2 x 3, y 2 x 2 divididas a partir de las matrices de 8 x 8 de un filtro (112) de Kalman de 8 estados, calculándose previamente un resto de las submatrices por bloques.
- 35 9. Método según la reivindicación 8, en el que una propagación de covarianza del filtro (112) de Kalman se calcula y actualiza en una única etapa.
10. Método según cualquiera de las reivindicaciones 8-9, en el que las ecuaciones ampliadas derivadas para el subconjunto de las submatrices por bloques utilizan ecuaciones de filtro de Kalman de marco de referencia-cuerpo, y en el que los valores (114) de corrección de error de actitud se convierten de nuevo en un valor de referencia de marco inercial centrado en la tierra antes de proporcionarse a un módulo (102) de control de actitud del vehículo espacial.
- 40 11. Método según cualquiera de las reivindicaciones 8-10, en el que las ecuaciones ampliadas derivadas para el subconjunto de las submatrices por bloques incluyen solo una función de seno y una de coseno que van a calcularse.
- 45 12. Método según cualquiera de las reivindicaciones 8-11, en el que los sensores (108) de actitud principales comprenden sensores inerciales.
13. Método según cualquiera de las reivindicaciones 8-12, en el que las mediciones (106A) de actitud se reciben a partir de los sensores (108) de actitud principales a intervalos frecuentes y regulares.
- 50 14. Método según cualquiera de las reivindicaciones 8-13, en el que los sensores (110) de actitud secundarios comprenden sensores de posicionamiento de actitud.

100

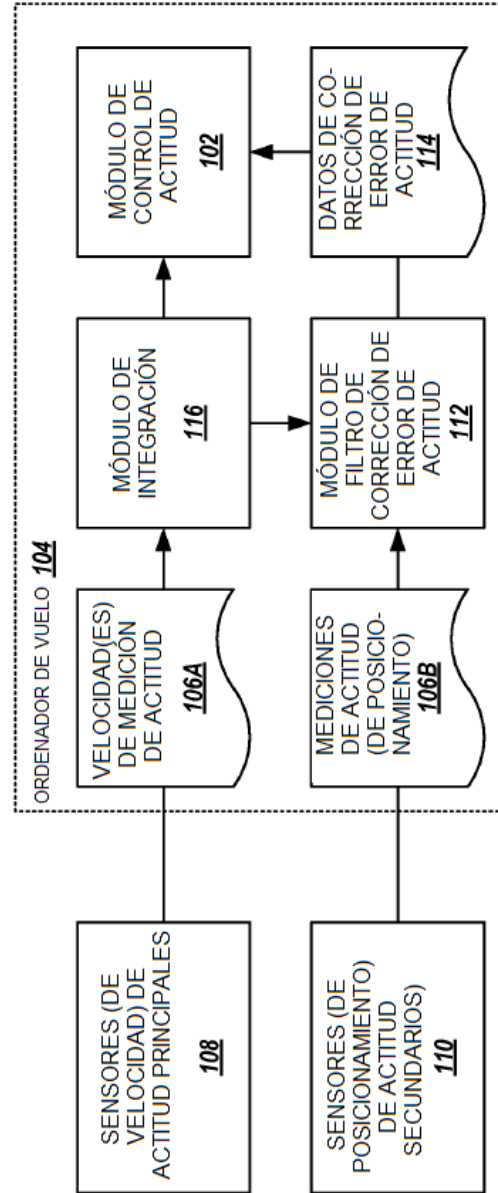


FIG. 1

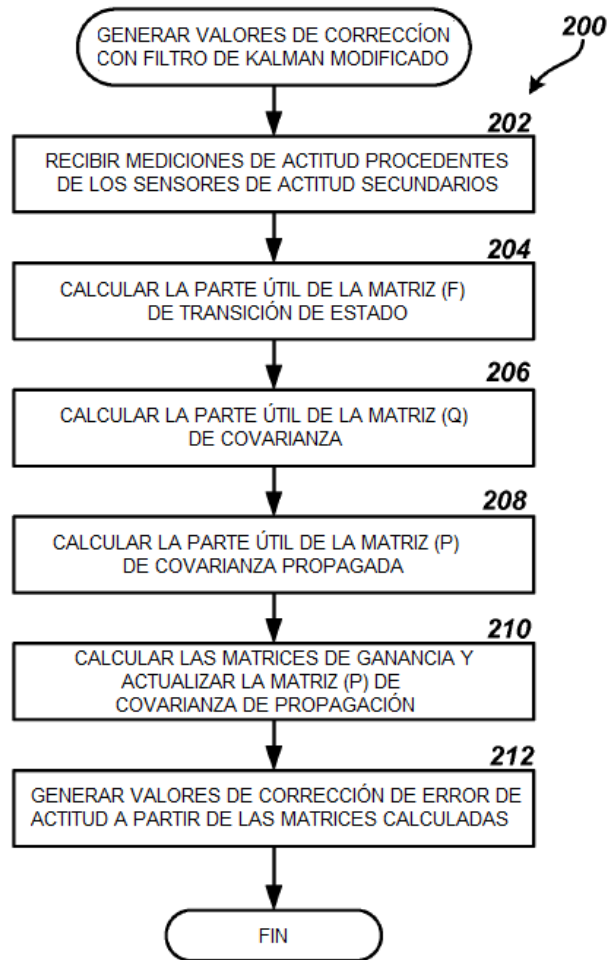


FIG. 2

$$F = \left[\begin{array}{ccc|ccc|cc} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} & f_{16} & f_{17} & f_{18} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} & f_{26} & f_{27} & f_{28} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} & f_{36} & f_{37} & f_{38} \\ \hline f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} & f_{46} & f_{47} & f_{48} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & f_{55} & f_{56} & f_{57} & f_{58} \\ f_{61} & f_{62} & f_{63} & f_{64} & f_{65} & f_{66} & f_{67} & f_{68} \\ \hline f_{71} & f_{72} & f_{73} & f_{74} & f_{75} & f_{76} & f_{77} & f_{78} \\ f_{81} & f_{82} & f_{83} & f_{84} & f_{85} & f_{86} & f_{87} & f_{88} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{array} \right]$$

FIG. 3

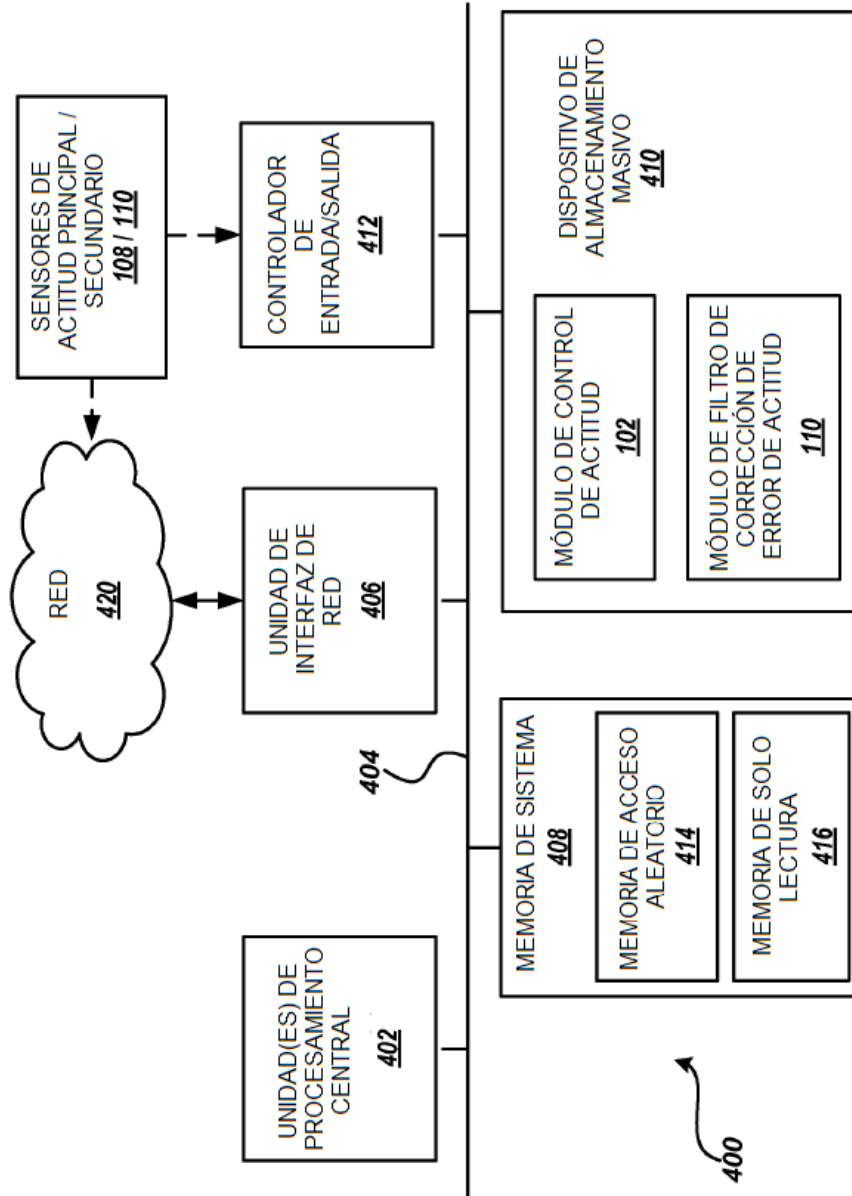


FIG. 4