



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 360 137**

51 Int. Cl.:
G01C 21/16 (2006.01)
G01C 25/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07011651 .2**
96 Fecha de presentación : **14.06.2007**
97 Número de publicación de la solicitud: **1870669**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **26.12.2007**

54 Título: **Procedimiento de verificación de una unidad de medida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, en estado estacionario.**

30 Prioridad: **24.06.2006 DE 10 2006 029 148**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.06.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.06.2011

73 Titular/es: **LFK-Lenkflugkörpersysteme GmbH**
Hagenauer Forst 27
86529 Schrobenhausen, DE

72 Inventor/es: **Grabmeier, Michael**

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

ES 2 360 137 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

Procedimiento de verificación de una unidad de medida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, en estado estacionario

CAMPO TÉCNICO

- 5 La presente invención concierne a un procedimiento de verificación de una unidad de medida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, en estado estacionario, según el preámbulo de la reivindicación 1.

ESTADO DE LA TÉCNICA

- 10 Particularmente en artefactos voladores no tripulados, la unidad de medida inercial forma el sensor de base de una disposición de ordenador de navegación y de un sistema de control unido con ésta. Los vehículos y especialmente los vehículos aéreos están equipados hoy en día casi siempre con sistemas de navegación inercial asistidos por satélite (por ejemplo, un sistema GPS), cuya precisión, en caso de fallo de la asistencia por satélite, depende de la calidad de los valores de medida obtenidos por la unidad de medida inercial.

- 15 Por tanto, hay que aspirar a la minimización de los errores de medida de la unidad de medida inercial para garantizar una precisión suficientemente alta de los resultados de navegación. A este fin, se calibran las unidades de medida inerciales después de la fabricación.

- 20 Particularmente cuando las unidades de medida inerciales no han estado en funcionamiento durante un período de tiempo bastante largo o han estado expuestas a sacudidas desde que se realizó una calibración, por ejemplo durante el transporte, se tiene que, según enseña la experiencia, la precisión de medida de la unidad de medida inercial puede empeorarse. Por tanto, hay que aspirar a que se puedan verificar la capacidad funcional y la precisión de medida de una unidad de medida inercial antes de su utilización, sin que esté disponible para ello un equipo de prueba correspondiente, tal como el que está previsto para la calibración de una unidad de medida inercial.

- 25 Particularmente en unidades de medida inerciales que están incorporadas en artefactos voladores no tripulados, se ha ofrecido un ensayo de esta clase antes de la utilización de un artefacto volador no tripulado equipado con ellas para impedir que el artefacto volador no tripulado, debido a errores de navegación, no pueda realizar su misión planeada o sólo pueda realizarla de manera imprecisa.

- 30 Hasta ahora, integrando una unidad de medida inercial en un artefacto volador no tripulado se han captado únicamente la aceleración absoluta y la velocidad angular absolutas, medidas en la unidad de medida inercial, en comparación con la aceleración terrestre y la rotación terrestre, respectivamente. Por lo demás, se ha realizado hasta el momento una comparación entre la velocidad vertical medida por una unidad de medida inercial de un artefacto volador no tripulado montado en un vehículo portador en vuelo y el movimiento vertical percibido por el vehículo portador.

- 35 Esta comparación realizada hasta ahora era demasiado imprecisa para obtener una manifestación exacta sobre la precisión de medida de la unidad de medida funcional o se realizaba únicamente cuando el artefacto volador equipado con la unidad de medida inercial ya estaba de camino con su vehículo portador.

- 40 Se conoce por el documento DE 197 57 333 C1 un procedimiento de calibración rápida automática de una medición autónoma a bordo de un vector de velocidad, en el que la calibración automática de un transmisor de velocidad en servicio operacional se efectúa por medio de una referencia de velocidad. Esta calibración funciona solamente en movimiento, es decir, únicamente después del despegue del vehículo aéreo, y no en estado estacionario.

- 45 El documento US 2004/0133346 A1 revela la ejecución de un algoritmo strapdown en combinación con una estimación de errores por medio de un filtro de Kalman. El filtro de Kalman suministra, en base a la estimación de errores, unos valores de corrección para un sistema de navegación. Estos valores de corrección se ponen después nuevamente a disposición del algoritmo strapdown para su ulterior procesamiento.

EXPOSICIÓN DE LA INVENCION

- 50 Por tanto, el problema de la presente invención consiste en indicar un procedimiento de verificación de una unidad de medida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, que proporcione ya en el estado estacionario de la unidad de medida inercial, antes o después de la integración de la unidad de medida inercial en el vehículo, una manifestación fiable sobre la precisión de medida de la unidad de medida inercial y permita así decidir si se puede utilizar o no la unidad de medida inercial.

Este problema se resuelve por medio del procedimiento con las características de la reivindicación 1.

Con miras a la realización de un procedimiento según la invención para verificar una unidad de me-

- 5 dida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, en estado estacionario, la unidad de medida inercial presenta al menos un sensor de aceleración que suministra una señal de aceleración en traslación, y al menos un sensor de velocidad de giro que suministra una señal de velocidad de giro. La unidad de medida inercial está unida, además, con una disposición de ordenador de navegación dotada de al menos un ordenador, la cual presenta un primer elemento funcional que está formado por hardware de ordenador o por software y que recibe y procesa como datos de entrada la señal de aceleración en traslación suministrada por el sensor de aceleración y la señal de velocidad de giro suministrada por el sensor de velocidad de giro. La disposición de ordenador de navegación presenta, además, un segundo elemento funcional que puede estar formado también por hardware de ordenador o por software y que recibe y procesa datos de entrada provenientes de la primera unidad de ordenador, y esta disposición presenta un tercer elemento funcional que puede estar formado también por hardware de ordenador o por software, que recibe y procesa los datos de entrada provenientes de la unidad de medida inercial, el primer elemento funcional y el segundo elemento funcional y que suministra señales de control al segundo elemento funcional (30). En esta disposición constituida por una disposición de ordenador de navegación y una unidad de medida inercial unida con ella se ejecutan según la invención los pasos de procedimiento siguientes:
- 10
- 15
- a) habilitación de datos de la posición actual de la unidad de medida inercial y de los ángulos de Euler actuales como información sobre la orientación actual de la unidad de medida inercial en el espacio;
 - 20 b) inicialización de un algoritmo strapdown con los datos - habilitados en el paso a) - de la posición angular, de los ángulos de Euler actuales y de la velocidad actual de la unidad de medida inercial con relación a la tierra en el primer elemento funcional;
 - c) procesamiento continuo de los datos de aceleración en traslación y de los datos de velocidad de rotación de las señales continuamente suministradas por la unidad de medida inercial en el primer elemento funcional después del algoritmo strapdown para obtener datos de posición, velocidad y ángulos de Euler fijos con respecto a la tierra, y
 - 25
- c') suministro continuo de estos datos al segundo elemento funcional,
- 30 d) procesamiento continuo de los datos suministrados por el primer elemento funcional con relación a posición, velocidad y ángulos de Euler en el filtro de Kalman formado por el segundo elemento funcional con miras a realizar una estimación de errores y una detección de los errores de aceleración y de los errores de velocidad de giro para todos los ejes del espacio,
 - e) formación de valores de corrección de aceleración a partir de los errores de aceleración y de valores de corrección de velocidad de giro a partir de los errores de velocidad de giro en el segundo elemento funcional,
 - 35 f) suministro de los valores de corrección de aceleración y de los valores de corrección de velocidad de giro al primer elemento funcional para realizar una corrección de valores de medida,
 - g) repetición de los pasos c) a f) durante un primer espacio de tiempo prefijado, entrando también los valores de corrección de aceleración y los valores de corrección de velocidad de giro en el procesamiento continuo del paso c) después del algoritmo strapdown,
 - 40 h) después de transcurrido el primer espacio de tiempo prefijado, comprobación de si los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro detectados en el paso d) se encuentran dentro de intervalos de tolerancia prefijados y emisión de un aviso de error e interrupción del procedimiento en caso de que la comprobación arroje el resultado de que al menos uno de los errores está fuera del intervalo de tolerancia,
 - 45 i) almacenamiento de los datos resultantes de los errores de aceleración con su varianza y de los errores de velocidad de giro con su varianza en una unidad de memoria y prosecución del procedimiento,
 - j) suministro de los datos de posición, velocidad y ángulo de Euler, resultantes del procesamiento continuo actual en el paso c), al tercer elemento funcional (40) y detención de la estimación de errores del filtro de Kalman,
 - 50 k) cálculo de las variaciones de ángulos de Euler y de las variaciones de velocidad dentro de un segundo espacio de tiempo prefijado a partir de los datos suministrados en el paso j),
 - l) detección de errores suma de aceleración por adición de los errores de aceleración almacenados en el paso i) y de las variaciones de velocidad calculadas en el paso k) y detección de errores suma de velocidad de giro por adición de los errores de velocidad de giro almacenados en el paso l) y de las variaciones de ángulos de Euler, calculadas en el paso k), en el tercer elemento funcional,
 - 55

mento funcional (40),

- m) comprobación de si los errores suma de aceleración y los errores suma de velocidad de giro detectados en el paso l) se encuentran o no dentro de intervalos de tolerancia prefijados.

5 Después de la realización de una fase de inicialización que comprende los pasos a) y b) se procede en una llamada fase de alineación para enderezar la navegación, que presenta los pasos c) a g) a detectar primeramente en el primer elemento funcional, que puede estar formado por hardware de ordenador o por software, según un algoritmo strapdown en sí conocido (Titterton, D. H., Weston, J. L.: Strapdown inertial navigation Technology, 2ª Edición, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics - Series 5, IEE, 2004) la posición, la velocidad y los ángulos de Euler - que describen la orientación en el espacio - de la unidad de medida inercial para los tres ejes del espacio. Con estos datos se realiza después una estimación de errores en un 10 segundo elemento funcional que presenta filtros de Kalman en sí conocidos y que puede estar formado también por hardware de ordenador o por software. Los errores estimados son suministrados de vuelta después al primer elemento funcional y son tenidos allí en cuenta por el algoritmo strapdown para la determinación de posición, velocidad y ángulos de Euler. Una vez transcurridos el primer espacio de tiempo prefijado y, por 15 tanto, la fase de alineación se efectúa una comprobación referente a si los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro detectados se encuentran dentro de intervalos de tolerancia prefijados, y se efectúan la emisión de un aviso de error y la interrupción del procedimiento en caso de que la comprobación arroje el resultado de que al menos uno de los errores está fuera del intervalo de tolerancia. En caso contrario, se 20 almacenan los datos resultantes de los errores de aceleración con su varianza y de los errores de velocidad de giro con su varianza en una unidad de memoria y se pasa así a una llamada fase inercial que presenta los pasos i) a l).

25 En la fase inercial los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler que resultan del procesamiento actual continuo en el paso c) se suministran - sin que se efectúe una corrección de estos datos por medio de valores de corrección detectados por el segundo elemento funcional - a un tercer elemento funcional que puede estar formado también por hardware de ordenador o por software. A partir de estos datos se calculan después las variaciones de ángulos de Euler y las variaciones de velocidad que se presenten dentro del segundo espacio de tiempo prefijado. El tercer elemento funcional forma después un error suma de aceleración y un error suma de velocidad de giro y comprueba si estos errores se encuentran dentro de un respectivo intervalo de tolerancia prefijado.

30 Si ocurre esto, esta unidad de medida inercial está entonces capacitada para ser utilizada. Si al menos uno de estos errores suma, el error suma de aceleración o el error suma de velocidad de giro, se encuentra fuera del respectivo intervalo de tolerancia prefijado, esta unidad de medida inercial no está entonces capacitada para ser utilizada. El respectivo resultado puede indicarse por medio de un equipo de salida.

35 La detección de los errores suma de aceleración y de los errores suma de velocidad de giro, así como los pasos de prueba se realizan para los tres ejes del espacio. Se logra así un resultado de verificación especialmente fiable.

40 Por medio de este procedimiento según la invención se puede detectar de manera sencilla, rápida y fiablemente, en el estado estacionario de una unidad de medida inercial, con ayuda de una disposición de ordenador de navegación equipada de manera correspondiente, si esta unidad de medida inercial es utilizable o no. No es necesario para ello disponer la nueva unidad de medida inercial en bancos de pruebas especiales, tal como ocurre, por ejemplo, para su calibrado (por medio de una mesa giratoria o una centrífuga). Por 45 tanto, el procedimiento según la invención puede realizarse también con una disposición de ordenador de navegación correspondientemente equipada en el lugar en el que debe utilizarse la unidad de medida inercial, por ejemplo en un aeródromo poco antes de la utilización de un artefacto volador no tripulado equipado con una unidad de medida inercial.

Otras características de ejecución preferidas y ventajosas del procedimiento según la invención son objeto de las reivindicaciones subordinadas.

Preferiblemente, la unidad de medida inercial está orientada en dirección aproximadamente horizontal antes de la realización del paso a).

50 Preferiblemente, durante la repetición indicada en el paso g) se comprueba en el paso c) después de un tiempo prefijado (preferiblemente alrededor de 1 minuto después del comienzo de la repetición) si el ángulo de balanceo calculado por el algoritmo strapdown o el ángulo de cabeceo calculado por el algoritmo strapdown se encuentran cada uno de ellos dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno a 0°. Preferiblemente, este intervalo de tolerancia deberá ascender a $\pm 3^\circ$.

55 Asimismo, se prefiere que, durante la repetición indicada en el paso g), se compruebe en el paso c) después de transcurrido un tiempo prefijado (preferiblemente alrededor de 1 minuto después del comienzo de la repetición) si la velocidad calculada por el algoritmo strapdown con relación a la tierra está dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno a 0 m/s. Preferiblemente, este intervalo de tolerancia asciendo a $\pm 0,3$ m/s.

Preferiblemente, se comprueba también en el paso h) si la precisión del error de aceleración, preferiblemente la desviación estándar o la varianza, calculada por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional para el eje vertical del sensor de aceleración está por debajo de un valor umbral prefijado.

5 Más preferiblemente, se comprueba también en el paso h) si la precisión del error de velocidad de giro, preferiblemente la desviación estándar o la varianza, calculada por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional para el respectivo eje horizontal del sensor de velocidad de giro está por debajo de un valor umbral definido.

10 Por último, se comprueba también más preferiblemente en el paso h) si el respectivo valor absoluto del error de medida estimado detectado por el segundo elemento funcional en el filtro de Kalman para el eje vertical del sensor de aceleración está por debajo de un respectivo valor umbral prefijado.

Se comprueba también más preferiblemente en el paso h) si los valores absolutos de los errores de medida estimados detectados por el segundo elemento funcional en el filtro de Kalman para el respectivo eje horizontal del sensor de velocidad de giro están por debajo de un respectivo valor umbral prefijado.

15 Se prefiere igualmente que se compruebe también en el paso h) si la precisión de error, preferiblemente la desviación estándar o la varianza, detectada por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional para el respectivo eje horizontal del sensor de aceleración está dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno al respectivo valor inicial empleado en el paso b).

20 Además, en el paso h) se comprueba más preferiblemente si la precisión de error, preferiblemente la desviación estándar o la varianza, detectada por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional para el eje vertical del sensor de velocidad de giro está dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno al respectivo valor inicial empleado en el paso b).

Preferiblemente, en el paso i) se almacenan también varianzas de los ángulos de Euler.

25 Además, se prefiere que la variación de velocidad calculada en el paso k) se transforme en el sistema de ejes de la unidad de medida inercial y se corrija en la cuantía de una participación de la aceleración terrestre que se obtiene a partir de los errores de velocidad de giro detectados.

Después de concluida la comprobación en el paso m) se realizan preferiblemente los pasos adicionales siguientes.

30 m1) cálculo de la diferencia entre la aceleración total medida en promedio por el sensor de aceleración y la aceleración terrestre,
m2) cálculo del error de aceleración total resultante sobre la base de los errores suma de aceleración,

m3) comprobación de si la diferencia entre la diferencia calculada en el paso m1) y el error de aceleración total calculado en el paso m2) se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia prefijado.

35 Por último, como alternativa a esto o adicionalmente, después del paso de comprobación m) se realizan preferiblemente los pasos de comprobación adicionales siguientes:

m1') cálculo de la diferencia entre la velocidad de giro total medida en promedio por el sensor de velocidad de giro y la rotación terrestre,

m2') cálculo del error de velocidad de giro total resultante sobre la base de los errores suma de velocidad de giro,

40 m3') comprobación de si la diferencia entre la diferencia calculada en el paso m1') y el error de velocidad de giro total calculado en el paso m2') se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia prefijado.

Cuando sale mal al menos una de las pruebas realizadas en los pasos m), m3) o m3'), se interrumpe preferiblemente el desarrollo del procedimiento y se emite un aviso de error correspondiente.

45 Como alternativa o bien adicionalmente a esto, se puede emitir un aviso de liberación correspondiente cuando se hayan recorrido con éxito todas las pruebas realizadas en el paso m) o en los pasos m) y m3) o m) y m3') o en los pasos m), m3) y m3').

En lo que sigue se describen y explican con más detalle ejemplos de realización preferidos de la invención con detalles de ejecución adicionales y otras ventajas haciendo referencia a los dibujos adjuntos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

50 Muestran:

La figura 1, la constitución esquemática de una disposición de ordenador de navegación con unidad de medida inercial conectada para la ejecución del procedimiento según la invención; y

La figura 2, un diagrama de flujo del procedimiento según la invención.

EXPOSICIÓN DE EJEMPLOS DE REALIZACIÓN PREFERIDOS

5 En la figura 1 se representa esquemáticamente la constitución de una unidad de medida inercial 1 y de una disposición de ordenador de navegación 2 unido con ésta.

La unidad de medida inercial 1 presenta un sensor de aceleración 10, 10', 10" para cada eje del espacio. Además, la unidad de medida inercial 1 contiene un sensor de velocidad de giro 11, 11', 11" para cada eje del espacio.

10 La disposición de ordenador de navegación 2 contiene un primer elemento funcional 20, un segundo elemento funcional 30 y un tercer elemento funcional 40. Los elementos funcionales 20, 30, 40 pueden estar formados por hardware de ordenador o por software. El primer elemento funcional 20 está unido con la unidad de medida inercial 1 a través de una primera línea de datos 12 que transmite los datos de aceleración y a través de una segunda línea de datos 13 que transmite los datos de velocidad de giro. Además, a través de una primera línea de datos externa 21, el primer elemento funcional 20 recibe de transmisores externos correspondientes datos sobre la posición actual, la velocidad actual y los ángulos de Euler actuales de la unidad de medida inercial 1. Estos datos actuales se denominan también datos iniciales y sirven para inicializar un programa que se desarrolla en el primer elemento funcional 20 y que está programado de modo que los datos de aceleración que entran por la primera línea de datos 12 y los datos de velocidad de giro que entran por la segunda línea de datos 13 sean procesados por medio de un algoritmo strapdown, tal como éste ha sido representado, por ejemplo, en la figura 2.2 del documento "Simulation des Verhaltens ainer low-cost Strapdown IMU unter Laborbedingungen" de Raul Dorobantu (ISBN 3934205054) y descrito con referencia a esta figura. Como resultado, el algoritmo strapdown que se desarrolla en el primer elemento funcional suministra datos sobre la posición, la velocidad y los ángulos de Euler de la unidad de medida inercial 1 sobre la base de los datos de aceleración y los datos de velocidad de giro suministrados por la unidad de medida inercial 1 al primer elemento funcional 20. Por tanto, la unidad de medida inercial 1 y el primer elemento funcional 20 de la disposición de ordenador de navegación 2 forman conjuntamente un sistema de navegación inercial 3.

Los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler de la unidad de medida inercial 1, obtenidos en el primer elemento funcional 20, son suministrados por el primer elemento funcional 20, a través de una tercera línea de datos 22, al segundo elemento funcional 30 de la disposición de ordenador de navegación 2.

El segundo elemento funcional 30 recibe de un transmisor externo (no mostrado), a través de una segunda línea de datos externa 31, datos de posición actuales de la unidad de medida inercial 1 y las varianzas de error para estos datos de posición actuales. El segundo elemento funcional 30 está aquí programado de modo que trabaje como un filtro de Kalman. Un filtro de Kalman es en general conocido y es un estimador de estado estocástico para sistemas dinámicos. Puede estimar estados o parámetros de un sistema sobre la base de mediciones parcialmente redundantes que llevan ruido superpuesto, minimizándose los errores medios cuadráticos. Una ventaja decisiva del filtro de Kalman frente a otros procedimientos de estimación estocástica es el desarrollo iterativo del proceso de cálculo que tiene lugar en el filtro de Kalman. A este fin, se predice primero el valor de salida más probable sobre la base de datos de entrada del sistema y se compara luego este valor con un valor de salida realmente medido. Se pondera linealmente la diferencia de los dos valores y ésta sirve para corregir el estado actual.

En el presente caso de aplicación el filtro de Kalman sirve para que, durante una llamada fase de alineación, se estimen tanto los errores con los que están afectados los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler calculados por el algoritmo strapdown como los errores de medida de los sensores. Además de los errores estimados se calculan las respectivas varianzas para poder hacer una manifestación sobre la precisión de la estimación de error.

Durante la fase de alineación, los datos de corrección para corregir la aceleración y para corregir la velocidad de giro, determinados en el segundo elemento funcional 30 sobre la base de los errores detectados, son conducidos de vuelta al primer elemento funcional 20 desde el segundo elemento funcional 30 a través de una cuarta línea de datos 32 y entran como datos de corrección, durante la fase de alineación, en el algoritmo strapdown que se desarrolla en el primer elemento funcional 20. Se mejora así la precisión de los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler de la unidad de medida inercial 1 en el transcurso del tiempo obtenidos por el algoritmo strapdown en el primer elemento funcional 20 y retransmitidos al segundo elemento funcional 30 a través de la tercera línea de datos 22.

Después de transcurrido el primer espacio de tiempo prefijado se almacenan los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro detectados por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional 30 para cada uno de los tres ejes, así como sus varianzas y las varianzas de los ángulos de Euler, y se retransmiten estos valores almacenados al tercer elemento funcional 40 desde la segunda unidad de ordenador 30 a través de una quinta línea de datos 33.

El tercer elemento funcional 40 está programado de modo que pueda realizar una función de evaluación para los datos recibidos y una función de control para un dispositivo de salida, así como para el segundo elemento funcional 30. A este fin, el tercer elemento funcional 40 notifica al segundo elemento funcional 30, a través de una sexta línea de datos 34, la clase de funcionamiento actualmente prefijada (fase de inicialización, fase de alineación o fase inercial) de la disposición de ordenador de navegación 2, con lo que el segundo elemento funcional 30 contiene, por ejemplo, información sobre el comienzo, la duración y el final del primer espacio de tiempo prefijado que determina la duración de la fase de alineación y al final del cual los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro, así como sus varianzas y las varianzas de los ángulos de Euler tienen que ser transferidos al tercer elemento funcional 40 desde la memoria del segundo elemento funcional 30 y la línea de retorno de los datos de corrección tiene que ser ajustada al primer elemento funcional 20 a través de la cuarta línea de datos 32.

Además, el tercer elemento funcional 40 recibe del primer elemento funcional 20, a través de una séptima línea de datos 23, datos de las velocidades obtenidas por el algoritmo strapdown en la dirección de los tres ejes del espacio, así como de los ángulos de Euler obtenidos por el algoritmo strapdown y la aceleración terrestre. Asimismo, el tercer elemento funcional 40 recibe, a través de una octava línea de datos 14, los datos de aceleración en la dirección de los tres ejes del espacio, obtenidos por los sensores de aceleración 10, 10', 10" de la unidad de medida inercial 1, así como, a través de una novena línea de datos 15, los datos de velocidad de giro alrededor de los respectivos ejes del espacio obtenidos por los sensores de velocidad de giro 11, 11', 11" de la unidad de medida inercial 1.

Durante la fase inercial que sigue a la fase de alineación se calculan primeramente en el tercer elemento funcional 40 las respectivas variaciones de ángulos de Euler y variaciones de velocidad que se producen dentro del segundo espacio de tiempo prefijado y se forman entonces errores suma de aceleración y errores suma de velocidad de giro. A continuación, en el tercer elemento funcional 40 se verifica para cada uno de los tres ejes del espacio si el respectivo error suma de aceleración detectado y el respectivo error suma de velocidad de giro detectado se encuentran dentro de un respectivo intervalo de tolerancia prefijado. El resultado de esta comprobación es emitido para su ulterior empleo por el tercer elemento funcional 40 de la disposición de ordenador de navegación 2 a través de una primera línea de salida de datos 41, por ejemplo para activar un dispositivo de salida correspondiente. Asimismo, los errores suma de aceleración detectados para cada uno de los tres ejes del espacio y los errores suma de velocidad de giro detectados para cada uno de los tres ejes del espacio son entregados por el tercer elemento funcional 40, a través de una segunda línea de salida de datos 42, al exterior de la disposición de ordenador de navegación 2 para su ulterior empleo.

En la figura 2 se representa un diagrama de flujo de un ejemplo de realización preferido del procedimiento según la invención.

En primer lugar, en el paso a) se determinan por medio de dispositivos de medida externos adecuados la posición actual de la unidad de medida inercial 1 y los ángulos de Euler actuales como información sobre la orientación de la unidad de medida inercial 1 en el espacio, es decir que se determinan las posiciones angulares en torno a los respectivos ejes del espacio. A este fin, se puede determinar la posición actual de la unidad de medida inercial, por ejemplo, con un aparato de medida de navegación por satélite o bien esta posición puede ser suministrada por un sistema de ensayo. Preferiblemente, la unidad de medida inercial está orientada en dirección horizontal, con lo que su posición angular alrededor de los dos ejes horizontales (eje de balanceo y eje de cabeceo) asciende en cada caso a 0°. La orientación de la unidad de medida inercial alrededor del eje vertical (eje de guiñada) puede realizarse, por ejemplo, por medio de una brújula. Los datos así obtenidos son suministrados después por los dispositivos de medida externos al primer elemento funcional 20, en donde se efectúa en el paso b) una inicialización del algoritmo strapdown con estos datos de la posición actual y de los ángulos de Euler actuales, así como de la velocidad actual de la unidad de medida inercial 1 con relación a la tierra. Dado que el presente procedimiento se realiza en estado estacionario, la velocidad actual - fija con respecto a la tierra - de la unidad de medida inercial asciende a 0 m/s. Los pasos a) y b) determinan la fase de inicialización 101 del procedimiento, lo que se simboliza por medio de las líneas de trazos 101.

A continuación, se procesan continuamente en el primer elemento funcional 20 según el algoritmo strapdown, en el paso c), los datos de aceleración en traslación y los datos de velocidad de giro suministrados continuamente por la unidad de medida inercial 1 para obtener datos de posición, velocidad y ángulos de Euler.

En el paso c') los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler obtenidos en el paso c) son suministrado después por el primer elemento funcional 20 al segundo elemento funcional 30 a través de la tercera línea de datos 22.

Se efectúa allí en el paso d), en un filtro de Kalman formado en el segundo elemento funcional 30, el procesamiento continuo de los datos suministrados por el primer elemento funcional 20 para realizar una estimación de errores, estimándose errores de aceleración y errores de velocidad de giro por parte del filtro de Kalman.

A continuación, en el paso e) se forman, en el segundo elemento funcional 30, valores de corrección

de aceleración a partir de los errores de aceleración y se forman también valores de corrección de velocidad de giro a partir de los errores de velocidad de giro.

5 Los valores de corrección de aceleración y los valores de corrección de velocidad de giro son realimentados en el paso f) por el segundo elemento funcional 30 al primer elemento funcional 20 a través de la cuarta línea de datos 32 y dichos valores entran allí en el algoritmo strapdown como parámetros de corrección.

10 Mientras dura el primer espacio de tiempo prefijado se repiten después los pasos c) a f) en el paso g), entrando también en el procesamiento del algoritmo strapdown del paso c) los respectivos valores de corrección de aceleración recién determinados y los respectivos valores de corrección de velocidad de giro recién determinados.

Los pasos c) a g) determinan la fase de alineación del procedimiento, lo que está simbolizado por la línea de trazos 102.

15 Cuando ha transcurrido el primer espacio de tiempo prefijado, es decir que ha terminado la fase de alineación, se verifica en el paso h) si los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro detectados en el paso d) se encuentran dentro de intervalos de tolerancia prefijados, y se producen la emisión de un aviso de error y la interrupción del procedimiento en caso de que la comprobación arroje el resultado de que al menos uno de los errores está fuera del intervalo de tolerancia.

En caso contrario, comienza la fase inercial del procedimiento determinada por los pasos i) a l), lo que se ha simbolizado por medio de la línea de trazos 103.

20 En el paso i) se almacenan entonces en una unidad de memoria los datos resultantes de los respectivos errores de aceleración junto con su varianza y los datos de los respectivos errores de velocidad de giro junto con su varianza, así como preferiblemente también las varianzas de los ángulos de Euler.

25 En el paso j) se procede después a suministrar al tercer elemento funcional 40, a través de la séptima línea de datos 23, los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler que resultan del procesamiento continuo actual en el paso c).

En el paso k) se calculan a partir de los datos suministrados en el paso j) las respectivas variaciones de ángulos de Euler y las respectivas variaciones de velocidad que se presentan dentro de otro espacio de tiempo prefijado.

30 A continuación, en el paso l) se calcula para cada eje del espacio un error suma de aceleración por adición del respectivo error de aceleración almacenado en el paso i) y de la respectiva variación de velocidad calculada en el paso k). Asimismo, en el paso l) se calcula para cada eje del espacio un error suma de velocidad de giro por adición del respectivo error de velocidad de giro almacenado en el paso i) y de las variaciones de ángulos de Euler calculadas en el paso k).

35 A continuación, se comprueba en el paso m) si los errores suma de aceleración y los errores suma de velocidad de giro detectados en el paso l) se encuentran o no dentro de un intervalo de tolerancia prefijado.

40 Si la comprobación realizada en el paso m) arroja el resultado de que los errores suma de aceleración y los errores suma de velocidad de giro se encuentran dentro del intervalo de tolerancia prefijado, se efectúa entonces una habilitación "PASA" de la unidad de medida inercial verificada. Si la comprobación en el paso m) arroja el resultado de que al menos uno de los errores detectados está fuera del intervalo de tolerancia prefijado, se produce una salida de error correspondiente "NO PASA".

45 En el estado estacionario de la unidad de medida inercial ésta solamente puede percibir la aceleración terrestre como un fuerte estímulo y la rotación terrestre como un débil estímulo. Cuando se conocen exactamente la posición y la orientación de la unidad de medida inercial y se inicializa con estos valores conocidos el algoritmo strapdown que se desarrolla en el primer elemento funcional, alimentándose periódicamente el filtro de Kalman en la fase de alineación con datos de posición conocidos externamente medidos y ascendiendo las velocidades en las tres respectivas direcciones de los ejes del espacio a 0 m/s, dado que la unidad de medida inercial es estacionaria, y cuando se procesan por el algoritmo strapdown después de la inicialización los valores de medida suministrados por la unidad de medida inercial, se pueden observar y, por tanto, estimar en esta situación por parte del filtro de Kalman los valores de navegación que se exponen seguidamente:

- error de medida de aceleración en la dirección de la aceleración terrestre,
- error de medida de velocidad de giro perpendicularmente a la dirección de la aceleración terrestre,
- ángulos de balanceo y de cabeceo de la unidad de medida inercial.

Los valores de navegación siguientes no pueden ser observados y estimados en esta situación por el filtro de Kalman:

- error de medida de aceleración perpendicularmente a la dirección de la aceleración terrestre,
- error de medida de velocidad de giro en la dirección de la aceleración terrestre,
- 5 - ángulo de guiñada de la unidad de medida inercial.

Por tanto, con el procedimiento según la invención y el dispositivo según la invención descrito en esta solicitud, consistente en la unidad de medida inercial 1 y la disposición de ordenador de navegación 2, se pueden lograr después de un espacio de tiempo prefijado los resultados que se exponen seguidamente.

10 Debido a la aceleración terrestre que, en una unidad de medida inercial orientada en dirección horizontal, actúa sobre el eje de guiñada Z - vertical -, el filtro de Kalman puede observar y estimar bien el error de decalaje y el error de factor de escala del sensor de aceleración Z de la unidad de medida inercial. La varianza obtenida para ello indicará una alta precisión del error estimado.

15 Para los sensores de aceleración que actúan en la dirección del eje de balanceo X - horizontal - y del eje de cabeceo Y - horizontal - no pueden efectuarse estimaciones de error relevantes. En consecuencia, las varianzas de error correspondientes tienen que mantenerse cerca de los valores iniciales.

20 Debido a las porciones de la rotación terrestre que actúan sobre los ejes horizontales X, Y de la unidad de medida inercial, el filtro de Kalman del segundo elemento funcional 30 puede estimar en medida limitada el error de decalaje y el error de factor de escala de los sensores de velocidad de giro X e Y, ya que actúa un débil estímulo (rotación terrestre) sobre estos sensores. Las varianzas obtenidas para ello son netamente más bajas que los valores iniciales.

Para el sensor de velocidad de giro Z no se efectúa ninguna estimación de error relevante. En consecuencia, la varianza de error correspondiente se mantendrá cerca de los valores iniciales.

25 Las varianzas - estimadas por el filtro de Kalman - de los ángulo de balanceo y de cabeceo calculados por el algoritmo strapdown indicarán una alta precisión. Cuando se ha estabilizado la oscilación del filtro de Kalman, es decir, cuando las varianzas de error correspondientes han alcanzado sendos valores sustancialmente estables, se presentan valores estimativos de error de medida aprovechables para el sensor de aceleración Z y para los sensores de velocidad de giro X e Y de la unidad de medida inercial. La duración de la estabilización de oscilación del filtro de Kalman puede acortarse por medio de una parametrización correspondiente (por ejemplo, ruido de los valores de medida de la unidad de medida inercial, varianzas de la información de posición externa, valores límite inferiores de la matriz de covarianzas) de un pequeño ruido de los valores de medida de la unidad de medida inercial o de la información de posición externa alimentada a través de la segunda línea de datos externa 31 o bien cuando esta información de posición externa presenta una alta precisión. En consecuencia, en este sitio se puede efectuar ya una primera comprobación de valor umbral de las cuantías de estos valores estimativos de error de medida. Dado que estos errores de medida estimados se realimentan como valores de corrección al algoritmo strapdown que se desarrolla en el primer elemento funcional, estos errores entran también en cada ciclo de cálculo de las ecuaciones cinemáticas de movimiento del algoritmo strapdown y corrigen así de una manera cada vez mejor los datos de medida suministrados por la unidad de medida inercial al primer elemento funcional 20.

40 El estado de estabilización de oscilación del filtro de Kalman puede leerse también en las varianzas calculadas por él para los ángulos de balanceo y cabeceo, ya que estos ángulos pueden ser bien observados por la aceleración terrestre actuante. Además, se puede comprobar entonces con estos ángulos si la unidad de medida inercial 1 se encuentra en posición horizontal.

45 Para poder estimar también los errores de medida para los sensores de aceleración X e Y y para el sensor de velocidad de giro Z se modifica el desarrollo del procedimiento después de transcurrido el primer intervalo de tiempo prefijado (fase de alineación). Se detienen la estimación de error del filtro de Kalman, que se efectúa en la fase de alineación, y, por tanto, la corrección de error de los resultados de navegación del algoritmo strapdown, de modo que en la fase inicial que tiene lugar seguidamente los errores todavía contenidos en los datos de medida suministrados por la unidad de medida inercial pueden repercutir enteramente, a través de las ecuaciones cinemáticas de movimiento, sobre los resultados de navegación (posición, velocidad y ángulos de Euler). En este caso, después de un tiempo de observación relativamente largo de la unidad de medida inercial estacionaria que se encuentra en estado horizontal se presentará lo siguiente:

50 Debido al error de medida de aceleración en la dirección del eje Z se presentará una pequeña deriva de la velocidad obtenida en la dirección del eje Z, ya que se ha efectuado previamente para esta dirección una estimación significativa de error de medida que repercute ahora en el algoritmo strapdown. Por tanto, se obtiene así un error residual para el sensor de aceleración Z.

55 La corrección de error de medida de velocidad de giro en torno al eje X y al eje Y produce poca deriva del ángulo de balanceo y del ángulo de cabeceo, respectivamente, ya que se han efectuado previamente

para estas direcciones unas estimaciones relevantes de error de medida de los sensores de velocidad de giro X e Y que operan ahora en el algoritmo strapdown. De esta manera, se obtienen errores residuales para los sensores de velocidad de giro X e Y.

5 En la fase inercial se detectan los errores de medida de los sensores de velocidad de giro 11, 11' y 11" a partir de la respectiva variación de ángulos de Euler a lo largo del tiempo que ha transcurrido desde la entrada en la fase inercial. Además, en la fase inercial se detectan los errores de medida de los sensores de aceleración 10, 10', 10" transformando para ello primeramente las velocidades fijas con respecto a la tierra (dirigidas en dirección Norte dirección Este y hacia el centro de la tierra) por medio de los ángulos de Euler en el sistema de ejes fijos del aparato de la unidad de medida inercial. Seguidamente, se calculan las variaciones de estas velocidades fijas del aparato, a saber su aceleración, a lo largo del tiempo desde la entrada en la fase inercial, corrigiéndose las aceleraciones calculadas fijas del aparato en las direcciones X e Y en una medida igual a las proporciones de la aceleración terrestre que, sobre la base de errores de medida de velocidad de giro X e Y, se establecen por medio de la transformación de velocidad anterior.

10 Los cálculos anteriores para errores de medida de velocidad de giro y errores de medida de aceleración se efectúan en la fase inercial después de que ha transcurrido un tiempo suficiente en dicha fase inercial.

Una vez concluida la fase inercial, se suman para cada eje y para cada sensor los errores de medida de aceleración y de velocidad de giro que se habían obtenido en la respectiva fase de alineación y en la respectiva fase de inicialización, de modo que se presenta un valor de error de medida para cada sensor de aceleración y para cada sensor de velocidad de giro.

20 Se comprueba ahora la magnitud de cada valor de error de medida para determinar si sobrepasa un umbral de tolerancia definido. Así, se puede decidir para cada sensor si el valor de error de medida está dentro o fuera de la tolerancia prefijada.

25 Asimismo, se puede verificar preferiblemente la plausibilidad de los errores de medida de aceleración estimados empleando datos de medida brutos de la unidad de medida inercial. A este fin, se detecta primeramente, sobre la base de los resultados de estimación de error obtenidos, un error de medida de aceleración estimado resultante. Durante la alineación de navegación, es decir, durante la fase de alineación, y durante la fase inercial se calcula el valor de la aceleración total bruta resultante medida en promedio por los sensores de aceleración de la unidad de medida inercial, efectuándose esto sobre la base de las mediciones brutas de la unidad de medida inercial, sin que éstas sean corregidas por el filtro de Kalman. Se calcula el valor de la diferencia entre esta aceleración total bruta resultante y la aceleración terrestre calculada en el algoritmo strapdown y este valor representa un error de medición bruto. La diferencia entre este error de medición bruto y el error de medida de aceleración estimado resultante tiene que encontrarse dentro de un intervalo de tolerancia definido a fin de que se satisfaga el criterio de plausibilidad requerido para el error de medida de aceleración estimado.

35 Se puede verificar también la plausibilidad de los errores de medida de velocidad de giro estimados con el procedimiento según la invención empleando valores de medida brutos de la unidad de medida inercial. A este fin, se detecta, sobre la base de los resultados de estimación de error, un error de medida de velocidad de giro estimado resultante (error de medida estimativo de velocidad de giro). Durante la fase de alineación de navegación (fase de alineación) y la fase inercial se calcula el valor de la velocidad de giro total bruta resultante medida en promedio por los sensores de velocidad de giro de la unidad de medida inercial, para lo cual se emplean las mediciones brutas de la unidad de medida inercial sin correcciones realizadas por el filtro de Kalman. Se calcula el valor de la diferencia entre esta velocidad de giro total bruta resultante y la rotación terrestre y este valor representa un error de medición bruta. La diferencia entre este error de medición bruta y el error de medida estimativo de velocidad de giro resultante tiene que encontrarse dentro de un intervalo de tolerancia definido a fin de que se satisfaga el criterio de plausibilidad para los errores de medida de velocidad de giro estimados. Las tolerancias preferidas están en aproximadamente $\pm 0,5 \text{ mG}$ o $\pm 0,5^\circ/\text{h}$.

40 Por tanto, el procedimiento según la invención hace posible la detección de errores de decalaje y de factor de escala para el sensor de aceleración Z y también para los sensores de velocidad de giro X e Y de la unidad de medida inercial 1. Asimismo, se puede detectar el error de decalaje de los sensores de aceleración X e Y y también del sensor de velocidad de giro Z.

Ejemplos de valores para las tolerancias contenidas en este ejemplo de realización son:

- duración de la fase de alineación: aproximadamente 5 a 15 minutos,
- duración de la fase inercial: 2 a 10 minutos,
- umbral de tolerancia para errores de sensores de aceleración: 1 a 6 mG,
- 55 - umbral de tolerancia para errores de sensores de velocidad de giro 1 a 6°/h.

Los símbolos de referencia incluidos en las reivindicaciones, la descripción y los dibujos sirven únicamente para una mejor comprensión de la invención y no deberán limitar el alcance de la protección.

Lista de símbolos de referencia

Designan:

- 1 Unidad de medida inercial
- 2 Disposición de ordenador de navegación
- 5 3 Sistema de navegación inercial
- 10 Sensor de aceleración
- 10' Sensor de aceleración
- 10" Sensor de aceleración
- 11 Sensor de velocidad de giro
- 1 0 11' Sensor de velocidad de giro
- 11" Sensor de velocidad de giro
- 12 Primera línea de datos
- 13 Segunda línea de datos
- 14 Octava línea de datos
- 1 5 15 Novena línea de datos
- 20 Primer elemento funcional
- 21 Primera línea de datos externa
- 22 Tercera línea de datos
- 23 Séptima línea de datos
- 2 0 30 Segundo elemento funcional
- 31 Segunda línea de datos externa
- 32 Cuarta línea de datos
- 34 Sexta línea de datos
- 40 Tercer elemento funcional
- 2 5 41 Primera línea de salida de datos
- 42 Segunda línea de salida de datos
- 101 Fase de inicialización
- 102 Fase de alineación
- 103 Fase inercial
- 3 0

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento de verificación de una unidad de medida inercial de vehículos, especialmente de vehículos aéreos, en estado estacionario,

- en donde la unidad inercial (1) presenta
- 5 · al menos un sensor de aceleración (10) que suministra una señal de aceleración en traslación, y
- al menos un sensor de velocidad de giro (11) que suministra una señal de velocidad de giro,
- en donde la unidad de medida inercial (1) está unida con una disposición de ordenador de navegación (2) dotada de al menos un ordenador,
- 10 · que presenta un primer elemento funcional (20) que recibe y procesa como datos de entrada las señales de aceleración en traslación suministradas por el sensor de aceleración (10) y las señales de velocidad de giro suministradas por el sensor de velocidad de giro (11),
- que presenta un segundo elemento funcional (30) que recibe y procesa los datos de entrada provenientes del primer elemento funcional (20), y
- 15 · que presenta un tercer elemento funcional (40) que recibe y procesa los datos de entrada provenientes de la unidad de medida inercial (1), del primer elemento funcional (20) y del segundo elemento funcional (30) y que suministra señales de control al segundo elemento funcional (30),

con los pasos siguientes:

- a) habilitación de datos
- de la posición actual de la unidad de medida inercial (1) y
- 20 · de los ángulos de Euler actuales como información sobre la orientación de la unidad de medida inercial (1) en el espacio;
- b) inicialización de un algoritmo strapdown en el primer elemento funcional (20) con los datos - habilitados en el paso a) - de la posición actual, los ángulos de Euler actuales y la velocidad actual de la unidad de medida inercial con relación a la tierra;
- 25 c) procesamiento continuo de los datos de aceleración en traslación y los datos de velocidad de giro de las señales suministradas continuamente por la unidad de medida inercial (1) en el primer elemento funcional (20) según el algoritmo strapdown para obtener datos de posición, velocidad de ángulos de Euler fijos con respecto a la tierra, y
- 30 c') suministro continuo de estos datos al segundo elemento funcional (30),
- d) procesamiento continuo de los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler suministrados por el primer elemento funcional (20) en el filtro de Kalman formado por el segundo elemento funcional (30) para realizar una estimación de errores y detectar los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro para todos los ejes del espacio,
- 35 e) formación de valores de corrección de aceleración a partir de los errores de aceleración y de valores de corrección de velocidad de giro a partir de los errores de velocidad de giro en el segundo elemento funcional (30),
- f) suministro de los valores de corrección de aceleración y de los valores de corrección de velocidad de giro al primer elemento funcional (20) para realizar una corrección de valores de medida,
- 40 g) repetición de los pasos c) a f) durante un primer espacio de tiempo prefijado, entrando también los valores de corrección de aceleración y los valores de corrección de velocidad de giro en el procesamiento continuo realizado en el paso c) según el algoritmo strapdown,
- 45 h) después de transcurrido el primer espacio de tiempo prefijado, comprobación de si los errores de aceleración y los errores de velocidad de giro detectados en el paso d) se encuentran dentro de intervalos de tolerancia prefijados y emisión de un aviso de error e interrupción del procedimiento en caso de que la comprobación arroje el resultado de que al menos uno de los errores está fuera del intervalo de tolerancia,
- i) almacenamiento de los datos resultantes de los errores de aceleración con su varianza y de los

errores de velocidad de giro con su varianza en una unidad de memoria y prosecución del procedimiento,

caracterizado por los pasos adicionales siguientes:

- 5 j) suministro de los datos de posición, velocidad y ángulos de Euler resultantes del procesamiento continuo actual en el paso c) al tercer elemento funcional (40) y detención de la estimación de errores del filtro Kalman,
- 10 k) cálculo de las variaciones de ángulos de Euler y de las variaciones de velocidad dentro de un segundo espacio de tiempo prefijado a partir de los datos suministrados en el paso j),
- 10 l) detección de errores suma de aceleración en el tercer elemento funcional (40) por adición de los errores de aceleración almacenados en el paso i) y de las variaciones de velocidad calculadas en el paso k) y detección de errores suma de velocidad de giro en dicho tercer elemento funcional por adición de los errores de velocidad de giro almacenados en el paso i) y de las variaciones de ángulos de Euler calculadas en el paso k),
- 15 m) comprobación de si los errores suma de aceleración y los errores suma de velocidad de giro detectados en el paso l) se encuentran o no dentro de intervalos de tolerancia prefijados.
- 2.- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque la unidad de medida inercial (1) se orienta en dirección aproximadamente horizontal antes de la realización del paso a).
- 3.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque durante la repetición indicada en el paso g) se comprueba al cabo de un tiempo prefijado en el paso c) si el ángulo de balanceo calculado por el algoritmo strapdown o el ángulo de cabeceo calculado por el algoritmo strapdown se encuentran ambos dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno a 0°, preferiblemente en el rango de $\pm 3^\circ$.
- 20 4.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque durante la repetición indicada en el paso g) se comprueba al cabo de un tiempo prefijado en el paso c) si las velocidades fijas con respecto a la tierra en las tres direcciones del espacio, calculadas por el algoritmo strapdown, se encuentran dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno a 0 m/s, preferiblemente en el rango de $\pm 0,3$ m/s.
- 25 5.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque en el paso h) se comprueba si la precisión del error de aceleración, concretamente la desviación estándar o la varianza, para el eje de sensor de aceleración vertical (Z), obtenida por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional (30), está por debajo de un valor umbral prefijado.
- 30 6.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se comprueba en el paso h) si la precisión del error de velocidad de giro, concretamente la desviación estándar o la varianza, para el respectivo eje de sensor de velocidad de giro horizontal (X, Y), obtenida por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional (30), está por debajo de un valor umbral definido.
- 35 7.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se comprueba en el paso h) si las magnitudes de los errores de medida estimados para el eje de sensor de aceleración vertical (Z), detectados en el filtro de Kalman por el segundo elemento funcional (30), están por debajo de un respectivo valor umbral prefijado.
- 40 8.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se comprueba en el paso h) si las magnitudes de los errores de medida estimados para el respectivo eje de sensor de velocidad de giro horizontal (X, Y), detectados en el filtro de Kalman por el segundo elemento funcional (30), están por debajo de un respectivo valor umbral prefijado.
- 45 9.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se comprueba en el paso h) si la precisión de error, concretamente la desviación estándar o la varianza, para el respectivo eje de sensor de aceleración horizontal (X, Y), obtenida por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional (30), está en un intervalo de tolerancia prefijado en torno al respectivo valor inicial obtenido en el paso b).
- 50 10.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se comprueba en el paso h) si la precisión de error, concretamente la desviación estándar o la varianza, para el eje de sensor de velocidad de giro vertical (Z), obtenida por el filtro de Kalman en el segundo elemento funcional (30), está dentro de un intervalo de tolerancia prefijado en torno al respectivo valor inicial obtenido en el paso b).
- 55 11.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se almacenan también en el paso i) las varianzas de los ángulos de Euler.

12.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la variación de velocidad calculada en el paso k) es transformada en el sistema de ejes de la unidad de medida inercial (1) y corregida en la medida de una proporción de aceleración terrestre que resulta de los errores de velocidad de giro detectados.

5 13.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se realizan después del paso m) los pasos adicionales siguientes:

m1) cálculo de la diferencia entre la aceleración total medida en promedio por el sensor de aceleración (10) y la aceleración terrestre,

10 m2) cálculo del error de aceleración total resultante sobre la base de los errores suma de aceleración,

m3) comprobación de si la diferencia entre la diferencia calculada en el paso m1) y el error de aceleración total calculado en el paso m2) se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia prefijado.

14.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se realizan después del paso m) los pasos adicionales siguientes:

15 m1') cálculo de la diferencia entre la velocidad de giro total medida en promedio por el sensor de velocidad de giro (11) y la rotación terrestre,

m2') cálculo del error de velocidad de giro total resultante sobre la base de los errores suma de velocidad de giro,

20 m3') comprobación de si la diferencia entre la diferencia calculada en el paso m1') y el error de velocidad de giro total calculado en el paso m2') se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia prefijado.

15.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque, cuando sale mal al menos una de las comprobaciones realizadas en los pasos m), m3) o m3'), se interrumpe el desarrollo del procedimiento y se emite un aviso de error correspondiente.

25 16.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizado porque, cuando se han recorrido con éxito todas la comprobaciones realizadas en el paso m) o en los pasos m) y m3) o m) y m3') o en los pasos m), m3) y m3'), se emite un aviso de habilitación correspondiente.

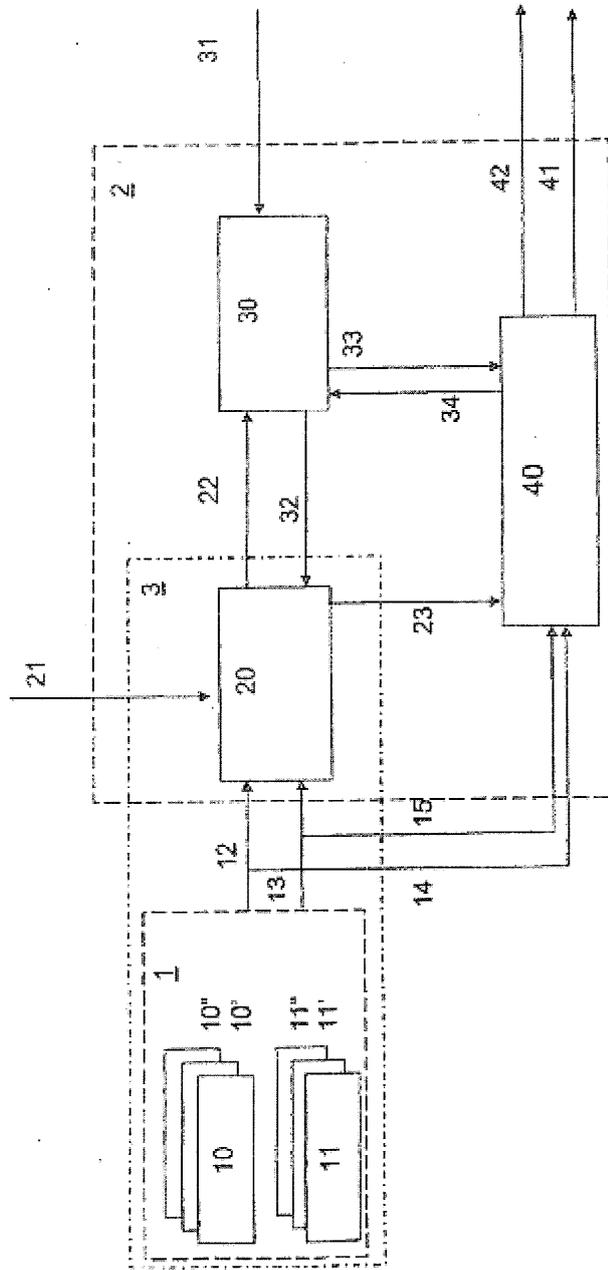


Fig. 1

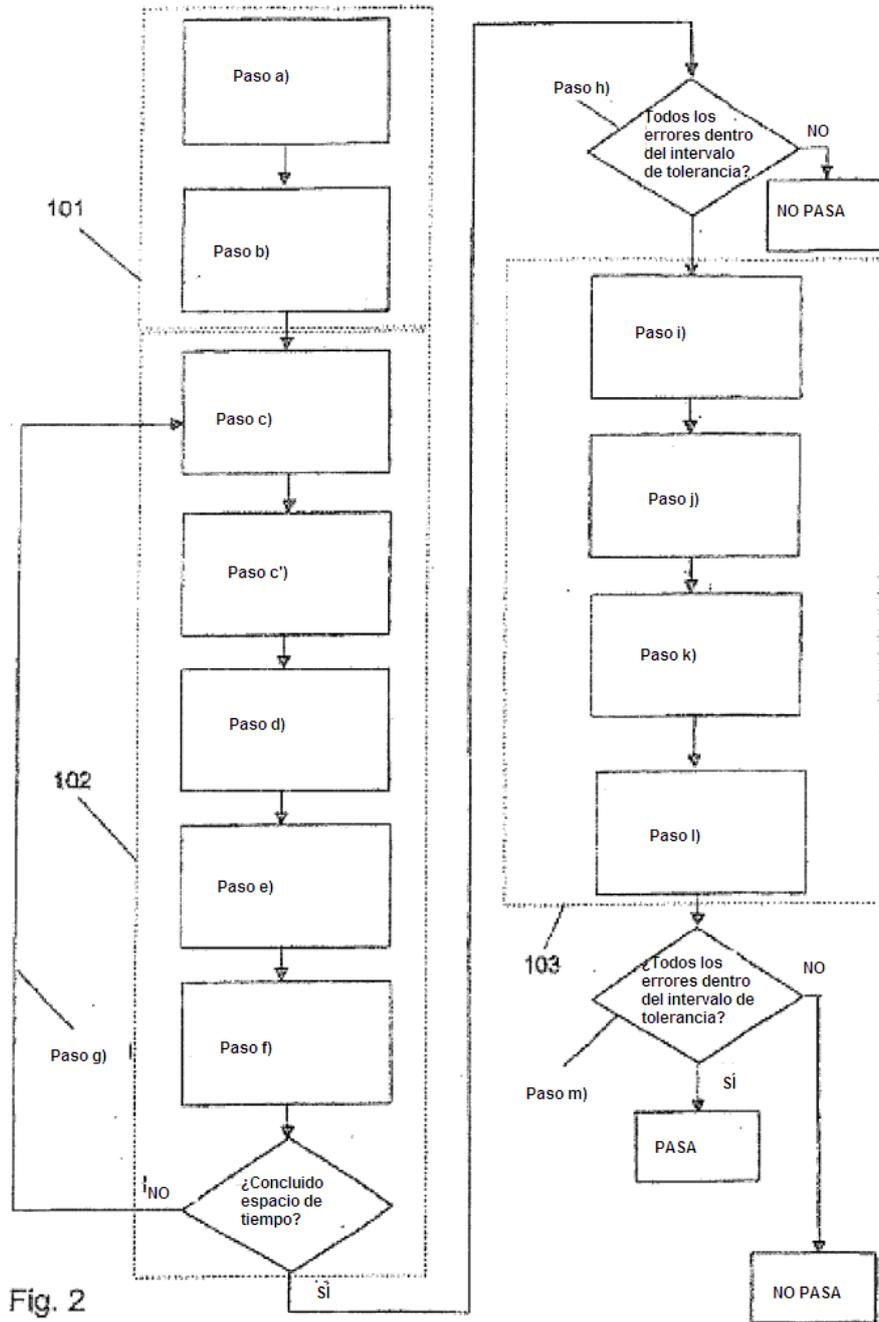


Fig. 2