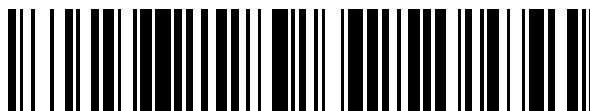


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 779 764**

51 Int. Cl.:

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 21/20 (2006.01)

G01C 22/00 (2006.01)

G01C 21/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.10.2016 PCT/FR2016/052619**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.04.2017 WO17060660**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.10.2016 E 16793957 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2019 EP 3359915**

54 Título: **Procedimiento de estimación del movimiento de un peatón**

30 Prioridad:

08.10.2015 FR 1559591

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

19.08.2020

73 Titular/es:

**SYSNAV (100.0%)
57, rue de Montigny
27200 Vernon, FR**

72 Inventor/es:

**VISSIERE, DAVID;
HILLION, MATHIEU;
DORVEAUX, ERIC;
JOUY, AUGUSTIN y
GRELET, MARC**

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 779 764 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 estimación del movimiento de un peatón

5 Campo técnico general

La presente invención se refiere al campo de la navegación sin GPS.

10 Más precisamente, se refiere a un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón en marcha mediante unas técnicas magnetoinerciales.

Estado de la técnica

15 Actualmente es habitual que un peatón siga su posición por GPS o utilizando una red de comunicaciones (triangulación con la ayuda de bornes emisores, red wifi u otros). Es posible asociarlos con otros sensores para mejorar el posicionamiento, por ejemplo unos sensores barométricos, de campo magnético, de imagen, de radar, etc.

20 Estos procedimientos resultan muy limitados ya que no funcionan en interior, en los túneles o demasiado lejos de los emisores, y resultan dependientes de tecnologías exteriores como los satélites para el GPS que pueden no estar disponibles o incluso estar deliberadamente interferidos.

25 Alternativamente, también se conocen unos procedimientos "autónomos" para seguir en cualquier entorno el desplazamiento relativo de un vehículo pesado tal como un avión de caza o de línea, un submarino, un barco, etc., gracias a una central inercial o magneto-inercial. Por desplazamiento relativo, se entiende la trayectoria del vehículo en el espacio con respecto a un punto y a una referencia dados en la inicialización. Además de la trayectoria, estos procedimientos permiten obtener asimismo la orientación del vehículo con respecto a la misma referencia inicial.

30 Una central inercial está constituida como mínimo por tres acelerómetros y por tres girómetros dispuestos de manera triaxial. Típicamente, los girómetros "mantienen" una referencia, en la que una doble integración temporal de las mediciones de los acelerómetros permite estimar el movimiento.

35 Es conocido de manera notable que para poder utilizar los procedimientos de navegación inercial clásica, tales como los utilizados en las aplicaciones pesadas como la navegación de los aviones de caza o de línea, de los submarinos, de los barcos, etc., es necesario utilizar unos sensores de precisión muy alta. En efecto, la doble integración temporal de una medición de aceleración hace que un error constante de aceleración cree un error de posición que aumenta de manera proporcional al cuadrado del tiempo.

40 Y estos sensores de alta precisión son demasiado pesados, ocupan demasiado espacio y son demasiado caros para ser embarcados por un peatón.

45 Para poder estimar una trayectoria con unos sensores inerciales ligeros y de bajo coste tales como los utilizados en los teléfonos móviles, por ejemplo, se deben realizar diferentes procedimientos que no necesitan la integración de los sensores inerciales durante períodos temporales largos.

50 Un primer procedimiento muy expandido consiste en contar los pasos efectuados. La detección de cada paso se realiza referenciando un motivo característico de un paso en las mediciones inerciales. Se obtiene una estimación de la dirección de la marcha separadamente de la velocidad o de la distancia, por ejemplo orientándose hacia el norte magnético terrestre con la ayuda de sensores sensibles al campo magnético. En numerosos lugares, fuertes perturbaciones magnéticas hacen imprecisa la determinación del rumbo magnético terrestre. Estas perturbaciones son frecuentes particularmente en el interior de edificios debido a la presencia de materiales magnéticos por ejemplo en el mobiliario, las paredes, instalaciones eléctricas y objetos diversos, etc.

55 Por esta razón, se han propuesto unos procedimientos complementarios para orientarse a pesar de estas perturbaciones. Por otro lado, es habitual asociar un filtro de actitud, por ejemplo de tipo Kalman extendido para combinar las mediciones de campo magnético e inerciales. Esto permite mejorar la precisión de la orientación y en particular del rumbo.

60 Después de cada paso, la posición estimada del portador es actualizada efectuando un desplazamiento de la longitud estimada de un paso en la dirección de la marcha estimada a partir del rumbo calculado por la central inercial.

65 Este procedimiento se ha utilizado sujetando la central inercial en diversos emplazamientos en un individuo, por ejemplo en el pie, en el cinturón, en un bolsillo, en la muñeca, en la mano, en las gafas, en la frente, etc.

Las prestaciones obtenidas están limitadas por la estimación imprecisa de la longitud del paso y la diferencia entre rumbo y dirección de la marcha. Esta estimación se puede mejorar con la ayuda de una armonización de las referencias y uniendo por un modelo la longitud y la frecuencia de los pasos. Sin embargo, existe una incertidumbre significativa ya que, por un lado, un peatón nunca tiene dos pasos de longitud exactamente idéntica, y por otro lado, un peatón efectúa diferentes tipos de marcha con unos pasos de longitud variable no distinguibles, ningún modelo resulta satisfactorio en la actualidad.

Un segundo procedimiento consiste en integrar las mediciones de aceleración y de velocidad angular en unos períodos de tiempo muy cortos para determinar la trayectoria de la central inercial y así del portador de la central. Este procedimiento no necesita ninguna estimación de la longitud de paso, pero está limitado por la acumulación de los errores de integración que ya han sido mencionados. Para unos sensores de tipo MEMS, esto se traduce en un error del mismo orden de magnitud que la longitud de un paso después de algunos segundos.

Una solución propuesta en la bibliografía («Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors. Computer Graphics and Applications», Foxlin, E., IEEE Computer Graphics and Applications - Volumen: 25, Versión: 6, páginas 38-46, Nov.-Dic. 2005) consiste en reinicializar la velocidad calculada cuando se sabe que es nula, procedimiento denominado a menudo ZUPT (Zero velocity UPdaTe). El pie en particular tiene una velocidad nula en contacto con el suelo. Por lo tanto, colocando la central inercial en el zapato y detectando la fase en la que el pie está en contacto con el suelo, es posible reinicializar la velocidad a cero. La integración de la aceleración es entonces necesaria únicamente durante la fase en la que el pie está en el aire, fase que dura aproximadamente un segundo. En cuanto el pie está en el suelo, se conoce la velocidad, igual a cero.

Con el fin de mejorar este procedimiento, es posible utilizar un filtro de estimación por ejemplo de Kalman, un filtro no lineal o cualquier otro filtro para combinar la información de los diferentes sensores. Este filtro puede comprender por ejemplo un estado con 6 grados de libertad para la velocidad y la actitud. Se pueden añadir otros estados, por ejemplo la posición, el sesgo de los sensores, etc. El filtro proporciona asimismo una medición de la incertidumbre de los estados estimados con una matriz de covarianza. Esto permite combinar fácilmente las mediciones de sensores adicionales para los cuales también está disponible una estimación de la incertidumbre. Y puede tratarse de mediciones de posición absoluta o relativa.

En la fase de ZUPT, la actualización de los estados del filtro es progresiva y corrige eventualmente todos los estados y no únicamente la velocidad.

El procedimiento ZUPT permite mejorar así la calidad de la estimación del movimiento, pero resulta que plantea un cierto número de problemas suplementarios debidos a la posición poco práctica del sensor en el pie. Esto lo hace muy sensible a los choques (a regular en función del tipo de suela), poco estético e incómodo ya que es preciso integrarlo en el zapato. Y lo que es más, el rumbo es difícil de determinar cerca del suelo con la presencia de campos magnéticos parásitos y el propio zapato a menudo está constituido por materiales magnéticos. Por último, se plantea el problema de la carrera, para la cual la fase durante la cual el pie está inmóvil en el suelo es muy reducida, o incluso nula, lo cual impide la corrección de los estados del filtro.

Paralelamente, es deseable estimar el movimiento de las extremidades inferiores para caracterizar ciertos trastornos.

Al igual que en las aplicaciones de navegaciones, los procedimientos conocidos (véase la solicitud US 2013123665) proponen estimar la trayectoria de un pie y por lo tanto los andares del portador a partir de las mediciones inerciales adquiridas por un dispositivo posicionado de nuevo en el pie con, como consecuencia, las mismas dificultades. El estudio de los andares con este tipo de dispositivos se limita así a unos estudios puntuales en un centro de estudio o cuando tiene lugar una actividad específica como una sesión de entrenamiento deportivo, debido al volumen ocupado y a la no practicidad del sensor en el pie.

El documento EP1137911 divulga la estimación del movimiento de un peatón basada en las mediciones procedentes de una central inercial. Dicha central inercial está colocada en una extremidad inferior de dicho peatón.

Sería deseable disponer de un nuevo procedimiento de estimación del movimiento de un peatón que presente una calidad superior a la de los procedimientos actuales y no sea restrictivo.

Presentación de la invención

La presente invención se refiere así según un primer aspecto a un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón en marcha según la reivindicación 1.

Según otras características ventajosas y no limitativas:

- se estima la velocidad de dicha extremidad inferior por integración de la aceleración medida expresada en el referencial terrestre en función de la velocidad angular medida, y se estima el movimiento de dicha

extremidad inferior por integración de la velocidad estimada;

- dicha velocidad esperada viene dada por la fórmula $\vec{v}_{att} = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$, en la que $\vec{\omega}$ es la velocidad angular medida y \vec{r} el brazo de palanca;
- dichos medios de medición inercial están dispuestos en dicha extremidad inferior entre un tobillo y una rodilla;
- la etapa (c) comprende el cálculo por los medios de tratamiento de datos de una aceleración esperada en función de dicha velocidad angular medida y del brazo de palanca, determinándose dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón, durante el cual dicho extremo distal de dicha extremidad inferior está en contacto con el suelo, en función de la aceleración medida y de dicha aceleración esperada;
- dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón durante el cual dicho extremo distal de dicha extremidad inferior está en contacto con el suelo se determina en la etapa (c) como aquel durante el cual una diferencia entre la aceleración medida y la aceleración esperada es inferior a un umbral predeterminado;
- dicha aceleración esperada viene dada por la fórmula

$$\vec{Y}_{act} = -\vec{g} + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r},$$

en la que $\vec{\omega}$ es la velocidad angular medida, \vec{r} el brazo de palanca y \vec{g} la aceleración de la gravedad;

- dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón durante el cual dicho extremo distal de dicha extremidad inferior está en contacto con el suelo se determina en la etapa (c) como aquel durante el cual la aceleración y/o la velocidad angular medidas corresponden a un motivo predeterminado representativo del contacto del extremo de la extremidad inferior con el suelo;
- la corrección de una velocidad estimada de dicha extremidad inferior en la etapa (c) comprende la utilización de un filtro estimador de estado lineal o no lineal;
- el procedimiento comprende una etapa (a0) previa de determinación de dicho brazo de palanca;
- el brazo de palanca se determina minimizando la diferencia entre la aceleración medida y una aceleración esperada en función de dicha velocidad angular medida y del brazo de palanca, cuando tiene lugar un intervalo temporal predeterminado de dicha marcha del peatón durante el cual dicho extremo distal de dicha extremidad inferior está en contacto con el suelo;
- dicha determinación del brazo de palanca comprende la integración del brazo de palanca en el filtro estimador de estado lineal o no lineal;
- el procedimiento comprende una etapa (f) subsiguiente de análisis por los medios de tratamiento de datos del movimiento estimado de manera que se identifique un trastorno de la marcha de dicho peatón.

Según un segundo aspecto, la invención se refiere a un equipo de estimación del movimiento de un peatón en marcha según la reivindicación 13.

Según otras características ventajosas y no limitativas:

- el equipo es una caja que comprende los medios de medición inercial;
- el equipo comprende además unos medios de sujeción de la caja a la extremidad inferior, un magnetómetro, y unos medios de comunicación.
- el equipo es un terminal móvil o un servidor, adaptado para comunicarse con una caja que comprende los medios de medición inercial.

Según un tercer aspecto, un ejemplo se refiere a un sistema que comprende el equipo según el segundo aspecto de la invención y por lo menos una caja de conexión.

Según un cuarto y un quinto aspecto, la invención se refiere a un producto de programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código para la ejecución de un procedimiento de estimación del movimiento de

un peatón en marcha según el primer aspecto de la invención; y a un medio de almacenamiento legible por un equipo informático en el que un producto de programa de ordenador comprende unas instrucciones de código para la ejecución de un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón en marcha según el primer aspecto de la invención.

5

Presentación de las figuras

Otras características y ventajas de la presente invención aparecerán con la lectura de la descripción siguiente de un modo de realización preferido. Esta descripción se dará haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

10

- la figura 1 es un diagrama de equipos para la realización del procedimiento según la invención;
- la figura 2 representa con mayor detalle un ejemplo de caja para la realización del procedimiento según la invención;
- las figuras 3a-3b representan esquemáticamente unas etapas sucesivas cuando tiene lugar una fase de puesta en contacto del pie con el suelo;
- las figuras 4a-4b representan unos ejemplos de resultados de estimación del movimiento de un peatón obtenidos gracias a la realización del procedimiento según la invención.

15

20

Descripción detallada

Estimación de un movimiento

25

La presente invención se refiere a un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón 1 en marcha.

El concepto de "estimación de un movimiento" se debe comprender en el sentido amplio.

30

En efecto, en una primera aplicación, lo cual puede definir el movimiento (y que será estimado por lo tanto) es el desplazamiento global del peatón. Esto permite por ejemplo seguir su posición en un mapa, determinar la distancia recorrida, etc., en particular para navegación sin GPS, seguimiento personal, etc.

35

En una segunda aplicación, lo cual puede definir el movimiento, es por el contrario los andares del peatón, en particular la trayectoria del pie. Esto resulta útil en particular para fines médicos.

Arquitectura

40

Con referencia a la figura 1, el peatón presenta por lo menos una extremidad inferior 10 (es decir, una pierna) equipada con medios de medición inercial 20. Se comprenderá que cada una de las dos extremidades inferiores 10 del peatón 1 puede estar equipada con medios de medición inercial 20.

45

Más precisamente, los medios de medición inercial 20 son solidarios con esta extremidad inferior 10, es decir, que presentan un movimiento sustancialmente idéntico en el referencial terrestre, más adelante se verá cómo. Los medios de medición inercial están dispuestos ventajosamente de manera más precisa en la región denominada crural de la pierna inferior 10, es decir la mitad inferior que se extiende entre un tobillo 12 y una rodilla 13 del peatón (incluidos), y de manera general cualquier emplazamiento que presente, cuando un extremo distal 11 de la extremidad inferior 10 (es decir, el talón del pie) está en contacto con el suelo (y ventajosamente de forma permanente), sustancialmente solo un movimiento de rotación con respecto a este extremo distal 11 de la extremidad inferior 10, es decir, debido a un brazo de palanca. De esta manera, cuando el talón del pie 11 está posado, los medios 20 casi no pueden realizar más que una rotación en el referencial terrestre, y no una traslación.

50

55

A continuación se verá el interés de este tipo de posicionamiento. Para resumir, los medios 20 están dispuestos típicamente a nivel de una tibia del peatón 1, ya que, por definición, cualquier punto de la tibia está articulado con el pie únicamente por el tobillo 12, y por lo tanto que su movimiento relativo solo puede ser una rotación, pero se comprenderá que pueden estar asimismo en el muslo. En efecto, durante un paso, cuando el talón del pie 11 se posa en el suelo, toda la extremidad inferior 10 está rígida (efectivamente, es fisiológicamente necesario tensar la pierna sobre la que se apoya durante un paso, con riesgo de incomodidad y de ineficacia de la marcha). Debido a esta rigidez de la extremidad inferior cuando tiene lugar esta fase de apoyo, se obtiene un puro movimiento de rotación entre los puntos del muslo y el extremo distal 11 de la extremidad 10. Se comprenderá que cuando tiene lugar un apoyo sobre la otra extremidad inferior ya no existe necesariamente ninguna rotación pura entre el muslo y el pie 11 de la extremidad inferior 10 considerada, pero esto no tiene importancia ya que el pie 11 está "en el aire" como se verá más adelante. Por último, se observará que evidentemente los medios 20 no estarán dispuestos sobre el pie 11, ya que es precisamente ésta la posición que se busca evitar por las molestias que causa. En todos los casos, las puntas del pie 11 no presentan ningún movimiento de rotación cuando este último está en el suelo y los medios 20 no pueden por lo tanto estar dispuestos en el mismo.

65

La distancia entre el punto de rotación del extremo distal 11 y los medios 20 se denomina en lo que sigue de la presente descripción "brazo de palanca". Y se anota \vec{r} el vector que representa este brazo de palanca orientado desde el extremo 11 hacia los medios 20.

5

Los medios de medición inercial 20 son preferentemente los de una caja 2 tal como se ha representado en la figura 2 que presenta unos medios 23 de sujeción a la extremidad inferior 10. Estos medios de sujeción 23 consisten por ejemplo en un brazalet por ejemplo con banda autoenganchante que ciñe la extremidad y permite la unión solidaria. Como se verá más adelante, es deseable en efecto que los medios de medición inercial 20 estén dispuestos lo más cerca posible de la rodilla 13, y que no se puedan desplazar a lo largo de la extremidad 10.

10

Por medios de medición inercial 20, se entiende una central de inercia que comprende por lo menos tres acelerómetros y tres girómetros dispuestos de manera triaxial. Los girómetros miden la velocidad angular instantánea de la central inercial con respecto al referencial terrestre, señalada con $\vec{\omega}$. Los acelerómetros son sensibles a las fuerzas exteriores distintas de las gravitacionales aplicadas al sensor, y permiten medir una aceleración señalada con $\vec{\gamma}$. Como se verá, los medios 20 están acompañados ventajosamente por lo menos por un magnetómetro 24 de manera que se formen unos medios 20, 24 de medición magnetoinercial. El magnetómetro 24 mide un campo anotado \vec{B} . Dicho magnetómetro 24 es útil para indicar un rumbo del peatón (es decir, una dirección en un plano horizontal), en particular al inicio ya que como se ha explicado, el movimiento es relativo. El magnetómetro 24 ya no es indispensable a continuación, pero puede servir para fijar el rumbo que se desvía a consecuencia de la acumulación de errores relacionados con las mediciones de velocidad angular.

15

20

La caja 2 puede comprender unos medios de tratamiento 21 (típicamente un procesador) para la realización directamente en tiempo real de los tratamientos del presente procedimiento, o bien las mediciones pueden ser emitidas a través de los medios de comunicación 25 hacia un dispositivo externo tal como un terminal móvil (teléfono inteligente) 3, o incluso un servidor remoto 4, o también las mediciones pueden ser registradas en unos medios de almacenamiento de datos 22 locales (una memoria por ejemplo de tipo flash) memoria local para un procesamiento *a posteriori* por ejemplo en el servidor 4.

25

Los medios de comunicación 25 pueden realizar una comunicación inalámbrica de corto alcance por ejemplo Bluetooth o Wifi (en particular en un modo de realización con un terminal móvil 3) o incluso ser unos medios de conexión a una red móvil (típicamente UMTS/LTE) para una comunicación a larga distancia. Se debe observar que los medios de comunicación 25 pueden ser por ejemplo una conexión por cable (típicamente USB) para transferir los datos de los medios de almacenamiento de datos 22 locales a los de un terminal móvil 3 o de un servidor 4.

30

35

Si es un terminal móvil 3 (respectivamente un servidor 4) el que aloja la "inteligencia", comprende unos medios de tratamiento 31 (respectivamente 41) tales como un procesador para la realización de los tratamientos del presente procedimiento que serán descritos. Cuando los medios de tratamiento utilizados son los 21 de la caja 2, ésta puede incluir también unos medios de comunicación 25 para transmitir la posición estimada. Por ejemplo, la posición del usuario puede ser enviada al terminal móvil 3 para visualizar la posición en una interfaz de un programa de navegación.

40

En la continuación de la presente descripción, se observará que los medios de tratamiento de datos 21, 31, 41 respectivamente de la caja 2, de un teléfono inteligente 3 y de un servidor remoto 4 pueden, indiferentemente y según las aplicaciones, realizar la totalidad o parte de las etapas del procedimiento.

45

Principio y anotaciones

En una primera etapa (a), el procedimiento comprende la adquisición por los medios de medición inercial 20 de la aceleración $\vec{\gamma}$ y de la velocidad angular $\vec{\omega}$ de dicha extremidad inferior 10. Se observa que en la continuación de la descripción, cuando se menciona aceleración/velocidad/posición de la extremidad inferior 10, se entiende a nivel de los medios de medición inercial 20.

50

Estas magnitudes se miden ventajosamente con un muestreo dt (es decir, todos los "dt" segundos) siendo dt muy pequeño ante el tiempo característico de los movimientos del peatón 1, típicamente 40 ms.

55

La orientación de los medios 20 con respecto al referencial inercial terrestre puede venir dada por ejemplo por una matriz de rotación (anotada R), un cuaternión de actitud (anotado q), la actitud es sinónimo de orientación en el espacio o de los ángulos de Euler (balanceo ϕ , cabeceo θ , guiñada ψ). Estas tres representaciones son equivalentes, por lo tanto se utilizan indiferentemente en este documento. La velocidad y la posición de los medios 20 (y por lo tanto de la extremidad inferior 10) están anotadas respectivamente \vec{v} y \vec{d} , y se estiman respectivamente por una simple y doble integración de la aceleración en el referencial terrestre que, como se verá más adelante, se calcula a partir de la aceleración $\vec{\gamma}$ medida (dada en el referencial móvil de los medios de medición inercial 20) y de la orientación de los medios 20 con respecto al referencial terrestre (actualizada a partir

60

de las mediciones de velocidad angular).

La inicialización de la actitud se puede realizar por ejemplo a partir de las mediciones de aceleración (llegado el caso, de las mediciones de un eventual magnetómetro 24) considerando que la extremidad 10 y por lo tanto los medios 20 son inmóviles al inicio y que el campo magnético es igual al campo magnético terrestre. En este caso, la aceleración medida es igual a la opuesta del campo gravitacional $\vec{\gamma} = -\vec{g}$. Se obtiene entonces el balanceo y el cabeceo con las fórmulas siguientes:

$$\varphi = -\tan^{-1} \frac{\gamma_y}{\gamma_z}$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{\gamma_x}{\sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2 + \gamma_z^2}}$$

El rumbo magnético se puede calcular entonces a partir de la medición del campo magnético con la fórmula:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{B_z \cdot \text{sen} \varphi - B_y \cdot \text{cos} \varphi}{B_x \cdot \text{cos} \theta + B_y \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \varphi + B_z \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{cos} \varphi}$$

La fórmula que da la matriz de paso del referencial terrestre al referencial de los medios 20 a partir de los ángulos de Euler es:

$$R_{i \rightarrow b} = \begin{bmatrix} \text{cos} \theta \cdot \text{cos} \psi & -\text{cos} \theta \cdot \text{sen} \psi & \text{sen} \theta \\ \text{cos} \psi \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \varphi + \text{cos} \varphi \cdot \text{sen} \psi & \text{cos} \varphi \cdot \text{cos} \psi - \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \psi & -\text{cos} \theta \cdot \text{sen} \varphi \\ \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \psi - \text{cos} \varphi \cdot \text{cos} \psi \cdot \text{sen} \theta & \text{cos} \psi \cdot \text{sen} \varphi + \text{cos} \varphi \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \psi & \text{cos} \theta \cdot \text{cos} \varphi \end{bmatrix}$$

La velocidad y la posición de los medios 20 con respecto al referencial terrestre se inicializan a cero. La posición inicial no puede ser determinada directamente a partir de las mediciones de acelerómetros, girómetros y magnetómetros, puede ser proporcionada por otro sensor (por ejemplo, GPS) o indicada por el usuario. Se conoce por lo tanto a lo largo del tiempo con los únicos sensores inerciales (y llegado el caso magnéticos) la posición relativa del dispositivo 2 (y por lo tanto del peatón 1), definida con respecto a la posición inicial.

Se designará el referencial inercial terrestre por el índice *i* y el referencial de los medios 20 también denominado *body* por el índice *b*. De esta manera, la matriz de cambio de base del referencial inercial terrestre hacia el referencial central se anota $R_{i \rightarrow b}$. Se anota R_n la estimación de esta matriz después de *n* pasos de muestra.

La actitud está ligada a la velocidad angular $\vec{\omega}$ según la ecuación diferencial en la matriz de paso $R_{i \rightarrow b}$. Las coordenadas de ω se expresan en la base de la central inercial.

$$\dot{R}_{i \rightarrow b} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{bz} & \omega_{by} \\ \omega_{bz} & 0 & -\omega_{bx} \\ -\omega_{by} & \omega_{bx} & 0 \end{bmatrix} \cdot R_{i \rightarrow b}$$

Considerando que el período de muestreo señalado con *dt* es suficientemente corto, se puede utilizar por ejemplo un desarrollo en el orden 1 como aproximación:

$$R_{i \rightarrow b}(t + dt) = R_{i \rightarrow b}(t) + \dot{R}_{i \rightarrow b}(t) \cdot dt$$

Esta aproximación se puede utilizar para actualizar la estimación de la matriz R_n para cada medición:

$$\hat{R}_{n+1} = \hat{R}_n + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{R}_n \cdot dt$$

Para actualizar la posición y la velocidad, se utiliza la medición de aceleración. En particular, el procedimiento comprende habitualmente una etapa (b) de estimación de la velocidad en función de dicha aceleración medida (en la práctica por integración) y una etapa (e) de estimación del movimiento en función de la velocidad estimada (en

la práctica también por integración).

La aceleración de los medios 20 con respecto al referencial terrestre viene dada así por:

$$\vec{a} = \vec{\gamma} + \vec{g}$$

Y la aproximación que da la velocidad en función de la aceleración es:

$$\overrightarrow{v(t + dt)} = \overrightarrow{v(t)} + \overrightarrow{a(t)} \cdot dt$$

Y la estimación de la velocidad se actualiza así para cada medición según:

$$\hat{v}_{n+1} = \hat{v}_n + \hat{a}_n \cdot dt$$

La medición del acelerómetro es conocida en el referencial de los medios 20 *body* mientras que el campo gravitacional es conocido en el referencial terrestre, la expresión de la aceleración en el referencial terrestre es por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \\ a_{iz} \end{bmatrix} = R_{b \rightarrow i} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{bx} \\ \gamma_{by} \\ \gamma_{bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, si se expresa la velocidad en la base del referencial terrestre, la fórmula de actualización en el *n*-ésimo paso de muestra es:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{ix,n+1} \\ \hat{v}_{iy,n+1} \\ \hat{v}_{iz,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{ix,n} \\ \hat{v}_{iy,n} \\ \hat{v}_{iz,n} \end{bmatrix} + \left(\hat{R}_n^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{bx,n} \\ \gamma_{by,n} \\ \gamma_{bz,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \right) \cdot dt$$

Y si se expresa la velocidad en la base del referencial de la central, la fórmula de actualización en el *n*-ésimo paso de muestra es:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n+1} \\ \hat{v}_{by,n+1} \\ \hat{v}_{bz,n+1} \end{bmatrix} = \hat{R}_{n+1} \cdot \hat{R}_n^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n} \\ \hat{v}_{by,n} \\ \hat{v}_{bz,n} \end{bmatrix} + \hat{R}_{n+1} \cdot \left(\hat{R}_n^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{bx,n} \\ \gamma_{by,n} \\ \gamma_{bz,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \right) \cdot dt$$

Lo que se convierte después de sustituciones y en el orden 1 en dt:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n+1} \\ \hat{v}_{by,n+1} \\ \hat{v}_{bz,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n} \\ \hat{v}_{by,n} \\ \hat{v}_{bz,n} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n} \\ \hat{v}_{by,n} \\ \hat{v}_{bz,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{bx,n} \\ \gamma_{by,n} \\ \gamma_{bz,n} \end{bmatrix} + \hat{R}_n \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \right) \cdot dt$$

Por último, la estimación de la posición se actualiza según:

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_{ix,n+1} \\ \hat{d}_{iy,n+1} \\ \hat{d}_{iz,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_{ix,n} \\ \hat{d}_{iy,n} \\ \hat{d}_{iz,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_{ix,n} \\ \hat{v}_{iy,n} \\ \hat{v}_{iz,n} \end{bmatrix} \cdot dt$$

Preferentemente, con un filtro de Kalman extendido (se volverá sobre ello más adelante), la matriz de covarianza es actualizada linealizando las fórmulas anteriores alrededor del punto actual.

Condición pie en el suelo

El presente procedimiento utiliza astutamente la condición "pie en el suelo" en la que se basa el procedimiento ZUPT, pero sin la necesidad de tener el sensor en el pie.

Como se observa en la figura 3a, el pie negro en contacto con el suelo tiene una velocidad nula en la fase representada para las etapas 2 a 4. Los medios de medición inercial 20 eran estáticos cuando el pie está en el suelo en el procedimiento ZUPT (y por lo tanto se podía restablecer la velocidad)

El figura 3b representa esta vez un emplazamiento posible de los medios de medición inercial 20 por encima del tobillo 12 durante la fase de contacto talón/suelo. En el caso del presente procedimiento, los medios de medición inercial 20 realizan una rotación por lo menos durante esta fase pie en el suelo, y por lo tanto presentan una "velocidad esperada" de los medios 20 (es decir, de dicha extremidad inferior 10) que va a permitir una reprogramación. Dicha velocidad esperada depende de la velocidad angular medida y de dicho brazo de palanca, en particular se calcula a partir del modelo pierna en rotación alrededor del extremo 11 fijo en el suelo. Entonces es igual al producto vectorial entre el vector rotación instantánea $\vec{\omega}$ y el vector \vec{r} :

$$\vec{v} = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

Una dificultad con respecto al procedimiento ZUPT es llegar a determinar un intervalo temporal de dicha marcha del peatón 1 durante el cual dicho extremo distal 11 de dicha extremidad inferior 10 está en contacto con el suelo, y más exactamente el momento en el que el movimiento es una pura rotación y el modelo que da la velocidad es correcto.

Para ello, una etapa (c) permite determinar este intervalo temporal de contacto con el suelo en función de la aceleración medida, de la velocidad angular medida, y del brazo de palanca supuesto o estimado. Esto explica por qué no es indispensable que los medios 20 presenten sustancialmente un movimiento de rotación con respecto al extremo distal 11 de la extremidad inferior 10 cuando no está en contacto con el suelo.

En un primer modo de realización, esta etapa (c) comprende el cálculo por los medios de tratamiento de datos 21, 31, 41 de una "aceleración esperada" en función de dicha velocidad angular medida y del brazo de palanca.

En efecto, con el mismo modelo que suponen los medios 20 en rotación a la distancia r (es decir, la longitud del brazo de palanca) desde el punto fijo 11, la aceleración teórica es igual a:

$$\vec{a}_{act} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

Añadiendo el término debido al campo de gravedad, la medición de aceleración esperada es igual a:

$$\vec{\gamma}_{act} = -\vec{g} + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

Esta relación proporciona un criterio para determinar si el modelo de brazo de palanca es correcto, y la etapa (c) comprende la determinación del intervalo temporal de contacto con el suelo en función de la aceleración medida y de dicha aceleración teórica.

Más precisamente, se considera el modelo válido cuando la diferencia entre la medición esperada de la aceleración y la medición realizada por los medios de medición inercial 20 es nula:

$$\overrightarrow{\text{Diferencia}} = \vec{\gamma} - \vec{\gamma}_{act} = \vec{\gamma} + \vec{g} - \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} - \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

El campo de gravedad es conocido en el referencial terrestre, mientras que las mediciones del girómetro y del acelerómetro así como \vec{r} son conocidas en la base de la central inercial. Para calcular la diferencia vectorial, es preciso por lo tanto efectuar un cambio de base. Para no depender de la matriz de cambio de base, se pueden comparar las normas de los vectores

$$\text{Diferencia} = \left| \vec{\gamma} - \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} - \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r} \right| - |\vec{g}|$$

El término $\frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r}$ generalmente es pequeño con respecto a los otros términos, por lo tanto es posible despreciarlo para evitar tener que calcular la derivada de la velocidad angular. La fórmula de la diferencia se simplifica entonces:

$$\text{Diferencia} = \left| \vec{\gamma} - \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r} \right| - |\vec{g}|$$

Esta diferencia no es en la práctica exactamente nula y se selecciona el período durante el cual es inferior a un umbral predeterminado, por ejemplo 10% de $|\vec{g}|$. En otras palabras, dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón 1 durante el cual dicho extremo distal 11 de dicha extremidad inferior 10 está en contacto con el suelo se

determina en la etapa (c) como aquel durante el cual una diferencia entre la aceleración medida y la aceleración teórica es inferior a este umbral predeterminado.

En un segundo modo de realización que no forma parte de la presente invención, se puede investigar aproximadamente la fase de contacto con el suelo a partir de un motivo característico en la señal de los sensores. La rotación de la pierna cuando tiene lugar el balanceo o el choque cuando el pie toca el suelo por ejemplo pueden permitir determinar aproximadamente dicho intervalo de contacto con el suelo. Por ejemplo, cuando se detecta la aceleración de un choque, se puede decidir que durante un tiempo característico (por ejemplo un cuarto de segundo) después de esta detección, el pie está en el suelo.

Alternativamente, se puede, en una fase previa de calibración, medir los valores habituales de aceleración y de velocidad angular que corresponden a un contacto del pie con el suelo, constituyendo estos valores habituales (puntuales o en un intervalo) el motivo de referencia, e identificar los intervalos de tiempo que minimizan la diferencia entre los valores medidos y este motivo de referencia.

En todos los casos, es posible buscar entonces en dicho intervalo el momento en el que la diferencia definida a partir de la aceleración es mínima. De esta manera, se identifica el mejor momento para efectuar la reprogramación. Por ejemplo, se puede utilizar un procedimiento alternativo basado en un motivo predeterminado para identificar aproximadamente el intervalo de contacto con el suelo, y después minimizar la diferencia entre la aceleración medida y la aceleración esperada dentro de este intervalo (es decir, utilizar el procedimiento principal descrito anteriormente).

En dicho intervalo temporal determinado (y preferentemente en el punto identificado en este intervalo), una etapa (d) permite la reprogramación de la velocidad estimada.

Más precisamente, se calcula dicha velocidad esperada de la extremidad inferior 10 mediante los medios de tratamiento de datos 21, 31, 41 en función de dicha velocidad angular medida y de dicho brazo de palanca. En particular, como se ha explicado, es igual al producto vectorial entre el vector de rotación instantánea $\vec{\omega}$ y el vector \vec{r} :

$$\vec{v}_{act} = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

Se corrige entonces la velocidad estimada de dicha extremidad inferior 10 en función de la velocidad esperada.

La diferencia entre esta velocidad esperada y la velocidad estimada \hat{v} obtenida por integraciones sucesivas se utiliza para la reprogramación. Es completamente posible reprogramar reemplazando simplemente el valor de la velocidad estimada por la velocidad esperada, pero preferentemente y como se ha explicado, se utiliza un filtro estimador de estado lineal (filtro Luenberger, filtro de Kalman, etc.) o no-lineal (filtro de Kalman extendido, observador invariante, etc.). En la presente descripción, se considerará el ejemplo de un filtro de Kalman extendido, pero el experto en la materia sabrá extrapolar a otros filtros.

La ganancia de Kalman K_{n+1} se calcula a partir de la matriz de covarianza según la fórmula de un filtro de Kalman extendido. Se pueden modelizar los errores debidos a los sensores y a las aproximaciones como un ruido de distribución gaussiana. La varianza se estima midiendo el ruido de los sensores en reposo. La reprogramación de la estimación del estado $\hat{x}_{n+1,n}$ que contiene la matriz de cambio de base, la velocidad y la posición se realiza añadiendo el término de corrección:

$$\hat{x}_{n+1,n+1} = \hat{x}_{n+1,n} + K_{n+1} \cdot \left(\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{v}_{bx,n+1} \\ \hat{v}_{by,n+1} \\ \hat{v}_{bz,n+1} \end{bmatrix} \right)$$

Se observa que, en la práctica, el error de velocidad permite asimismo corregir la orientación.

Cuando el pie deja el contacto con el suelo, la actitud y la velocidad únicamente se actualizan nuevamente a partir de los valores medidos de la aceleración y de la velocidad angular proporcionados por los medios 20. Los errores de cálculo de la velocidad debidos a la doble integración de los acelerómetros se reinician así en cada paso.

Cálculo del brazo de palanca

Se observa que la longitud del brazo de palanca puede ser una constante introducida por el usuario (llegado el caso tras la medición).

Pero como alternativa, no se conoce obligatoriamente la posición exacta de la caja 2 en la pierna, por lo tanto \vec{r}

puede no ser conocido *a priori*. En este caso, el procedimiento comprende ventajosamente una etapa previa (a0) de determinación de dicho brazo de palanca. Por otro lado, se observa que la caja 2 puede moverse ligeramente a lo largo de la extremidad inferior 10, por lo tanto la etapa (a0) se puede realizar de nuevo (a intervalos regulares o según instrucciones del peatón 1) cuando tiene lugar la marcha para volver a determinar \vec{r} .

5

En efecto, es posible estimar el valor de este vector o bien separadamente, o bien integrando directamente \vec{r} en el estado del filtro de Kalman. Si se supone que los medios de medición inercial 20 están montados de manera que el eje z esté alineado con el eje de la pierna, se puede considerar que el brazo de palanca \vec{r} esté alineado con el eje z y las coordenadas x e y son nulas:

10

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_z \end{bmatrix}$$

En particular, el producto vectorial que da la velocidad se convierte en:

15

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_y \cdot r_z \\ -\omega_x \cdot r_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

Añadiendo un campo r_z en el estado del filtro de Kalman extendido, se efectúa una reprogramación de r_z en función del error de velocidad medida en cada fase de pie en el suelo.

20

Alternativamente, también se puede estimar \vec{r} directamente cuando el pie está en contacto con el suelo. Se ha explicado que esta fase se puede determinar por ejemplo a partir del choque sufrido cuando el pie toca el suelo, o bien se trata de un intervalo predeterminado en el que el usuario coloca deliberadamente el pie en contacto con el suelo.

25

Durante esta fase, se ha explicado que la medición del acelerómetro viene dada por:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

30

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \frac{d\omega_y}{dt} \\ -\frac{d\omega_x}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x \cdot \omega_z \\ \omega_y \cdot \omega_z \\ -\omega_x^2 \cdot r_z - \omega_y^2 \end{bmatrix} \right) \cdot r_z$$

Se puede buscar así el valor de r_z que minimiza como media la cantidad:

$$\left| \vec{y} - \left(\begin{bmatrix} \frac{d\omega_y}{dt} \\ -\frac{d\omega_x}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x \cdot \omega_z \\ \omega_y \cdot \omega_z \\ -\omega_x^2 \cdot r_z - \omega_y^2 \end{bmatrix} \right) \cdot r_z \right| - |\vec{g}|$$

35

Por último, si no se conoce la orientación de los medios de medición inercial 20, se pueden añadir las tres coordenadas del brazo de palanca al filtro. La reprogramación afecta entonces a las tres coordenadas.

40

La posición de los medios 20 en la extremidad inferior 10 también se puede estimar gracias a la utilización complementaria de otros sensores cuando están disponibles, por ejemplo un GPS que proporciona una velocidad y la orientación de la central con respecto a la tierra, siendo la incógnita entonces el brazo de palanca, o también un sistema de visión que proporciona una velocidad y la orientación. En función de la precisión de la información con respecto a la velocidad exacta a nivel del sensor, será necesario un tiempo de filtrado más o menos largo.

45

Resultados

La figura 4a representa un ejemplo de una trayectoria obtenida tras la integración de las mediciones de una caja 2 llevada por encima del tobillo 12. La marcha está constituida por una ida y vuelta en una calle con descenso y después subida de dos escaleras. Los acelerómetros y los girómetros utilizados en los medios 20 son unos

sensores MEMS calibrados con precisión. Se ha utilizado un filtro de Kalman extendido con una reprogramación utilizando el modelo de brazo de palanca cuando el pie está en el suelo como se ha descrito anteriormente.

5 Se constata la ausencia de deriva en una marcha de varios cientos de metros (el peatón 1 vuelve exactamente al punto de partida) y la calidad y la precisión de la navegación.

10 La figura 4b representa más precisamente el descenso y el ascenso de las escaleras durante la marcha ilustrada en la figura 4a. Se muestra en este caso la altura de la caja 2 en función de la distancia recorrida. Cada zancada en plano se reconoce de manera característica, elevándose el tobillo 12 aproximadamente 18 cm efectuando una trayectoria curva. En el descenso de las escaleras entre las distancias marcadas 118 m y 125 m, se reconoce cada zancada, franqueando el pie 11 dos escalones y una altura de aproximadamente 30 cm. Asimismo entre las distancias marcadas de 128 m a 132 m, se reconoce para cada zancada el franqueo de dos escalones.

15 Así, incluso cuando se está en un entorno muy problemático para una central magneto-inercial (ascenso y descenso de escaleras, en lugar de permanecer en plano), se constata que la calidad ofrecida por el presente procedimiento sigue siendo irreprochable.

20 Este último resulta óptimo para seguir el recorrido de un peatón 1 en un área poco o mal cubierta por una señal GPS, en el interior de edificios, en subsuelo, cerca de paredes altas, en el bosque, etc.

Como se ha explicado anteriormente, dicha vista que muestra para cada paso la elevación de los medios 20 permite detectar fácilmente unos trastornos de la marcha.

25 Equipos y sistema

Según un segundo aspecto, la invención se refiere en particular a los equipos 2, 3, 4 para la realización de uno u otro de los modos de realización del procedimiento.

30 Como se ha explicado anteriormente, según un primer modo de realización, el equipo es una caja 2 autónoma que comprende los medios de medición inercial 20 y los medios de tratamiento de datos 21 configurados para la realización de las etapas del procedimiento.

35 La caja 2 comprende además unos medios de sujeción 23 de la caja 2 a la extremidad inferior 10, y llegado el caso, un magnetómetro 24, unos medios de almacenamiento de datos 22 (para el almacenamiento de las aceleraciones/velocidad angulares medidas o de los movimientos estimados) y/o unos medios de comunicación 25 para la exportación de los resultados.

40 Según un segundo modo de realización, el equipo es un terminal móvil 3 o un servidor 4, adaptado para comunicarse con una caja 2 que comprende los medios de medición inercial 20. En otras palabras, el terminal 3 o el servidor 4 comprende los medios de tratamiento 31 o 41 configurados para la realización de las etapas del procedimiento. Cada caja 2 puede comprender aun así unos medios de tratamiento de datos 21 para el control de los medios 20 y la transmisión (a través de los medios de comunicación 25) de los datos medidos a los medios de tratamiento de datos 31, 41.

45 Se debe observar que los medios 21, 31, 41 pueden, llegado el caso, compartir unas etapas del procedimiento. Por ejemplo, en caso de aplicación médica, los medios de tratamiento 21 de la caja 2 pueden realizar las etapas hasta (e), y *a posteriori* los medios 41 del servidor 4 realizan la etapa (f) de análisis de manera que identifiquen un eventual trastorno de la marcha de dicho peatón 1.

50 La invención se refiere asimismo en este caso al sistema que comprende el equipo 3, 4 según este modo de realización y la o las cajas 2 "satélites" en conexión.

En todos los casos, los medios de tratamiento de datos 21, 31, 41 del equipo 2, 3, 4 "principal" están configurados para realizar:

- 55
- un módulo de recepción de una aceleración y de una velocidad angular de una extremidad inferior 10 de dicho peatón 1 adquiridas por unos medios de medición inercial 20 solidarios con dicha extremidad inferior 10 y dispuestos de manera que presenten sustancialmente un movimiento de rotación con respecto a un extremo distal 11 de dicha extremidad inferior 10 por lo menos cuando dicho extremo distal 11 de la
 - 60 extremo distal 11 de dicha extremidad inferior 10 está en contacto con el suelo;
 - un módulo de estimación de una velocidad de dicha extremidad inferior 10 en función de dicha aceleración y de dicha velocidad angular medidas;
 - 65 - un módulo de determinación de un intervalo temporal de dicha marcha del peatón 1 durante el cual dicho extremo distal 11 de dicha extremidad inferior 10 está en contacto con el suelo en función de la aceleración

medida, de la velocidad angular medida, y de un brazo de palanca entre los medios de medición inercial 20 y dicho extremo distal 11;

- 5 - un módulo de cálculo en dicho intervalo temporal determinado de una velocidad esperada de dicha extremidad inferior 10 en función de dicha velocidad angular medida y de dicho brazo de palanca;
- un módulo de corrección en dicho intervalo temporal de la velocidad estimada de dicha extremidad inferior 10 en función de la velocidad esperada;
- 10 - un módulo de estimación del movimiento del peatón 1 en función de la velocidad estimada de dicha extremidad inferior 10.

Producto de programa de ordenador

- 15 Según un tercer y cuarto aspectos, la invención se refiere a un producto de programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código para la ejecución (en los medios de tratamiento 21, 31, 41) de un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón 1 en marcha según el primer aspecto de la invención, así como a unos medios de almacenamiento legibles por un equipo informático (por ejemplo unos medios de almacenamiento de datos 22) en el que se encuentra este producto de programa de ordenador.
- 20

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de estimación del movimiento de un peatón (1) en marcha que comprende las etapas de:

- 5 (a) medir una aceleración y una velocidad angular de una extremidad inferior (10) por unos medios de medición inercial (20) solidarios con dicha extremidad inferior (10) de dicho peatón (1) y dispuestos de manera que presenten sustancialmente un movimiento de rotación con respecto a un extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) por lo menos cuando dicho extremo distal (11) de la extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo;
- 10 (b) estimar por unos medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) una velocidad de dicha extremidad inferior (10) en función de dicha aceleración y de dicha velocidad angular medidas;
- 15 (c) determinar por los medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) un intervalo temporal de dicha marcha del peatón (1) durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo en función de la aceleración medida, de la velocidad angular medida, y de un brazo de palanca entre los medios de medición inercial (20) y dicho extremo distal (11);
- 20 (d) en dicho intervalo temporal determinado:
 - o calcular por los medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) una velocidad esperada de dicha extremidad inferior (10) en función de dicha velocidad angular medida y de dicho brazo de palanca;
 - o corregir la velocidad estimada de dicha extremidad inferior (10) en función de la velocidad esperada;
- 25 (e) estimar por los medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) el movimiento del peatón (1) en función de la velocidad corregida de dicha extremidad inferior (10).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se estima la velocidad de dicha extremidad inferior (10) mediante integración de la aceleración medida expresada en el referencial terrestre en función de la velocidad angular medida, y se estima el movimiento de dicha extremidad inferior (10) mediante integración de la velocidad estimada.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 y 2, en el que dicha velocidad esperada viene dada por la fórmula $\vec{v}_{act} = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$, en la que $\vec{\omega}$ es la velocidad angular medida y \vec{r} es el brazo de palanca.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dichos medios de medición inercial (20) están dispuestos en dicha extremidad inferior (10) entre un tobillo (12) y una rodilla (13).

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la etapa (c) comprende el cálculo por los medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) de una aceleración esperada en función de dicha velocidad angular medida y del brazo de palanca, determinándose dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón (1), durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo, en función de la aceleración medida y de dicha aceleración esperada.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón (1), durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo, se determina en la etapa (c) como aquel durante el cual una diferencia entre la aceleración medida y la aceleración esperada es inferior a un umbral predeterminado.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 y 6, en el que dicha aceleración esperada viene dada por la fórmula

$$\vec{\gamma}_{act} = -\vec{g} + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r} + \vec{\omega} \wedge \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

55 en la que $\vec{\omega}$ es la velocidad angular medida, \vec{r} el brazo de palanca y \vec{g} la aceleración de la gravedad.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho intervalo temporal de dicha marcha del peatón (1), durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo, se determina en la etapa (c) como aquel durante el cual o después del cual la aceleración y/o la velocidad angular medidas corresponden a un motivo predeterminado representativo del contacto del extremo (11) de la extremidad inferior (10).

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la corrección de una velocidad estimada de dicha extremidad inferior (10) en la etapa (c) comprende la utilización de un filtro estimador de estado lineal o no lineal.
- 5 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende una etapa (a0) previa de determinación de dicho brazo de palanca.
- 10 11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que se determina el brazo de palanca minimizando la diferencia entre la aceleración medida y una aceleración esperada que depende de dicha velocidad angular medida y del brazo de palanca, cuando tiene lugar un intervalo temporal predeterminado de dicha marcha del peatón (1) durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo.
- 15 12. Procedimiento según las reivindicaciones 9 y 10 en combinación, en el que dicha determinación del brazo de palanca comprende la integración del brazo de palanca en el filtro.
13. Equipo (2, 3, 4) de estimación del movimiento de un peatón (1) en marcha que comprende unos medios de tratamiento de datos (21, 31, 41) configurados para realizar:
- 20 - un módulo de recepción de una aceleración y de una velocidad angular de una extremidad inferior (10) de dicho peatón (1) medidas por unos medios de medición inercial (20) solidarios con dicha extremidad inferior (10) y dispuestos de manera que presenten sustancialmente un movimiento de rotación con respecto a un extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) por lo menos cuando dicho extremo distal (11) de la extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo;
- 25 - un módulo de estimación de una velocidad de dicha extremidad inferior (10) en función de dicha aceleración y de dicha velocidad angular medidas;
- 30 - un módulo de determinación de un intervalo temporal de dicha marcha del peatón (1) durante el cual dicho extremo distal (11) de dicha extremidad inferior (10) está en contacto con el suelo en función de la aceleración medida, de la velocidad angular medida, y de un brazo de palanca entre los medios de medición inercial (20) y dicho extremo distal (11);
- 35 - un módulo de cálculo en dicho intervalo temporal determinado de una velocidad esperada de dicha extremidad inferior (10) en función de dicha velocidad angular medida y de dicho brazo de palanca;
- 40 - un módulo de corrección en dicho intervalo temporal de la velocidad estimada de dicha extremidad inferior (10) en función de la velocidad esperada;
- un módulo de estimación del movimiento del peatón (1) en función de la velocidad corregida de dicha extremidad inferior (10).
- 45 14. Producto de programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código para la ejecución de un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón (1) en marcha según una de las reivindicaciones 1 a 12, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.
15. Medios de almacenamiento legibles por un equipo informático en el que un producto de programa de ordenador comprende unas instrucciones de código para la ejecución de un procedimiento de estimación del movimiento de un peatón (1) en marcha según una de las reivindicaciones 1 a 12.

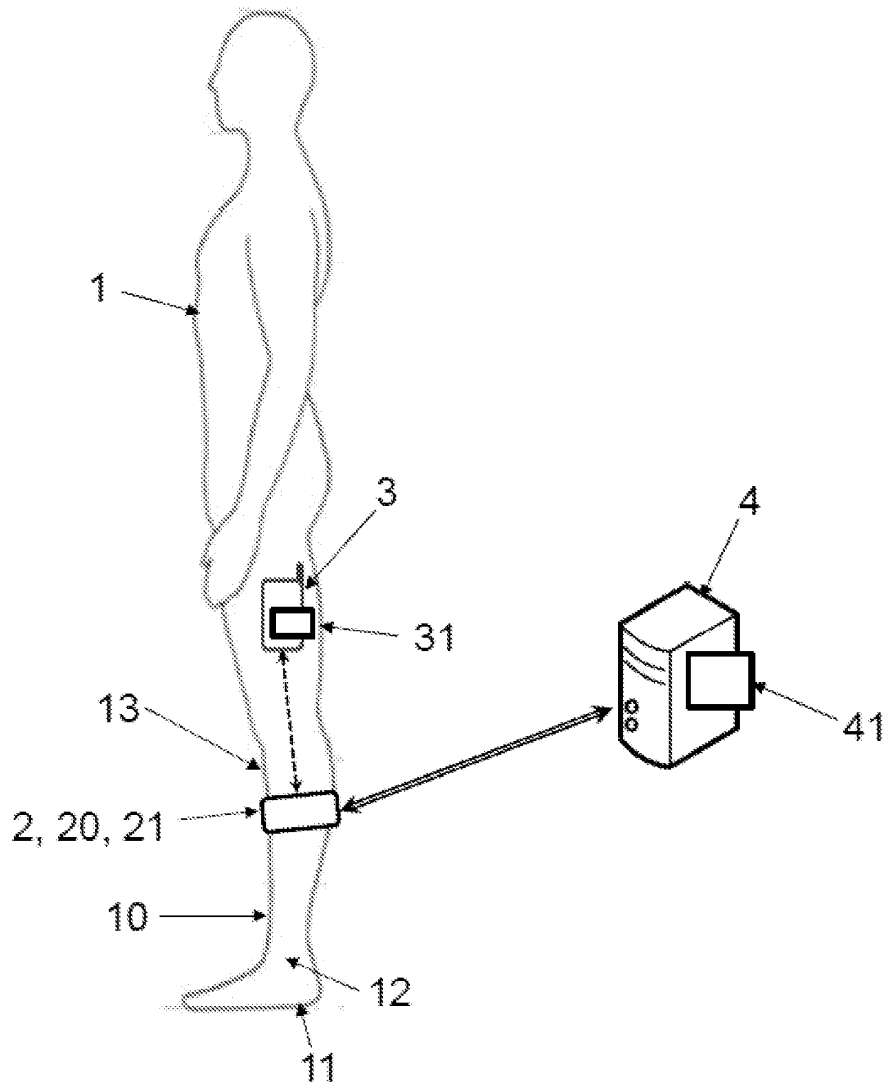


FIG. 1

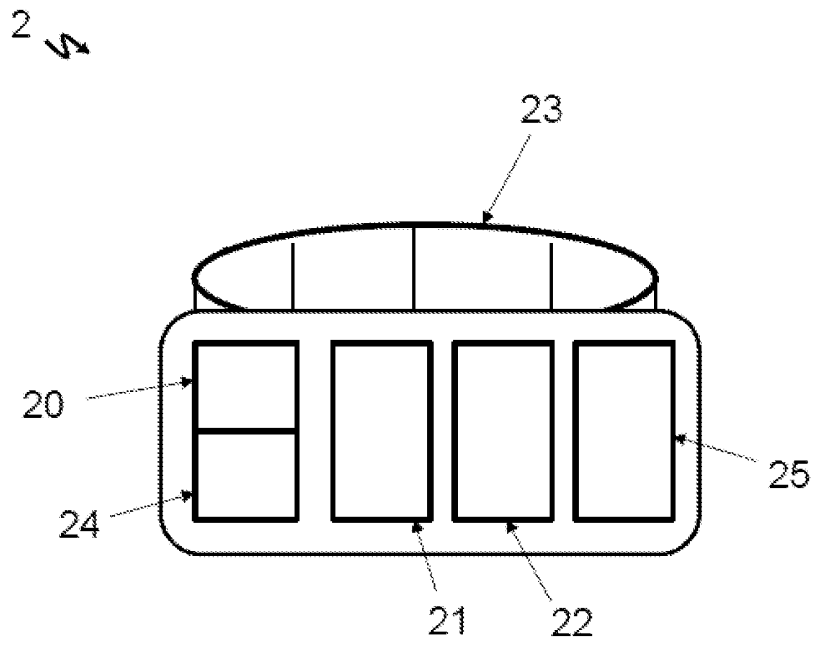


FIG. 2

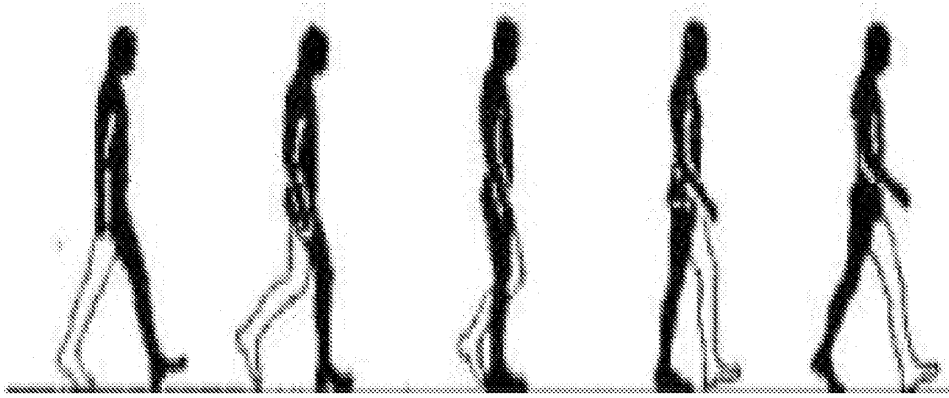


FIG. 3a

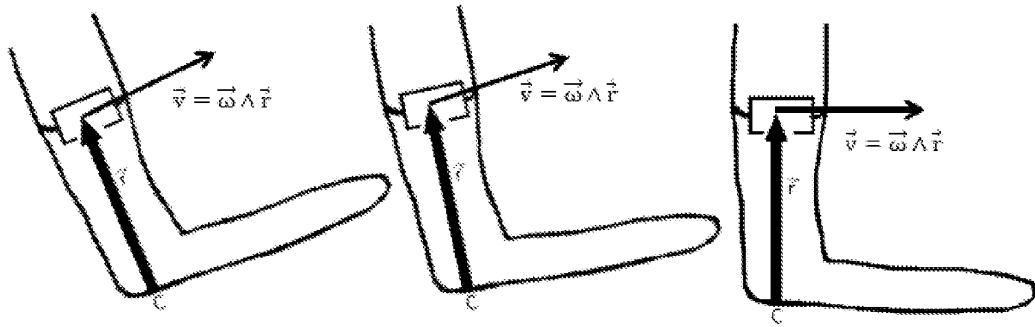


FIG. 3b

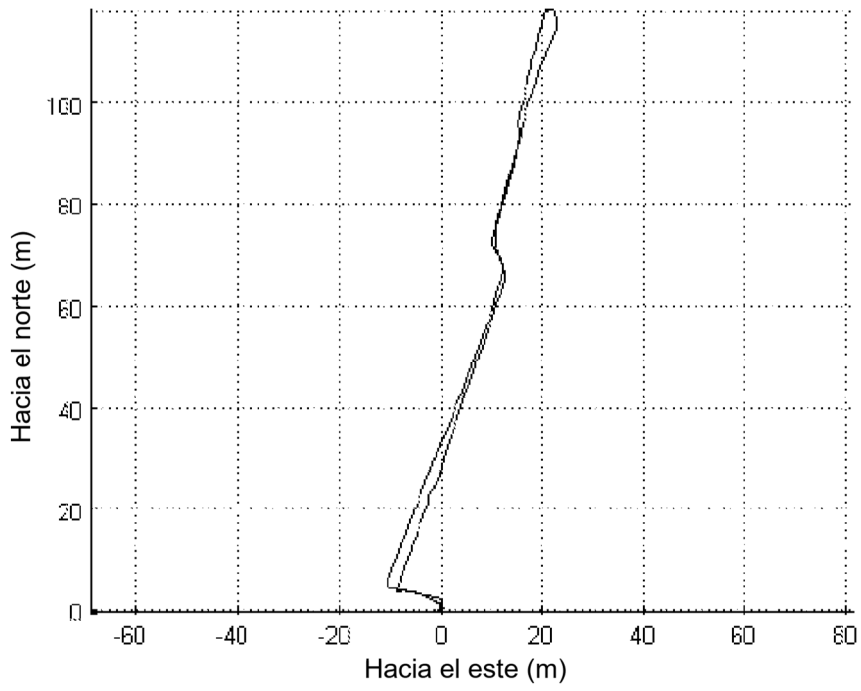


FIG. 4a

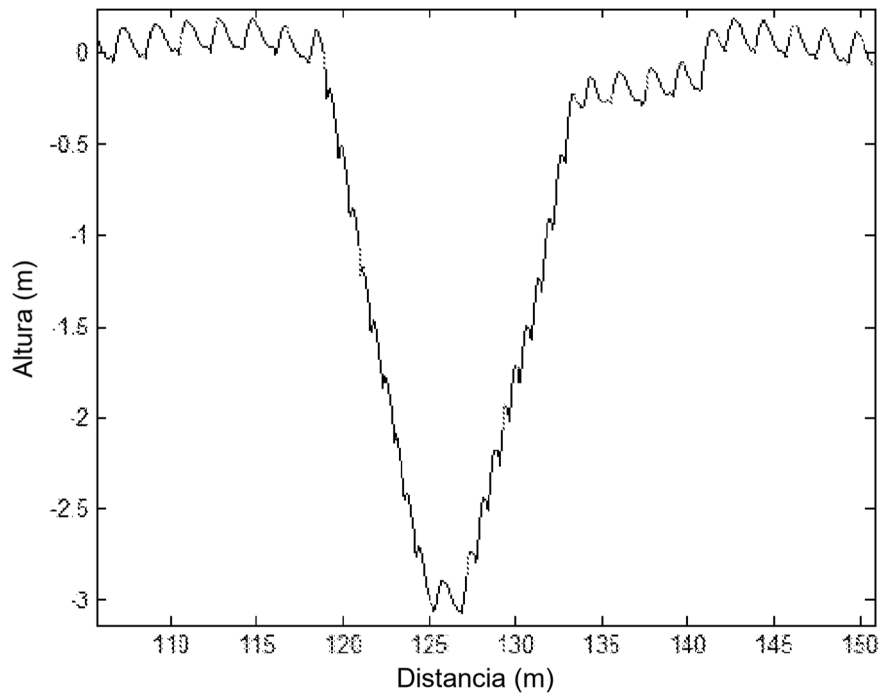


FIG. 4b