

## DESCRIPCIÓN

### **Método y dispositivo para alinear con un sistema coordinado de referencia las mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes**

#### **Sector Tecnológico:**

La presente invención se relaciona con el campo de las mediciones de aceleración, y en particular a un método para transformar la orientación de los datos de aceleración proporcionados por acelerómetros. La invención también se relaciona con un dispositivo que sirve para ejecutar dicho método y además aplicar las mediciones transformadas en la detección de aceleraciones en vehículos.

#### **Tecnología Anterior:**

Los acelerómetros o sensores de aceleración, sean digitales o analógicos, han sido ampliamente usados en tecnologías que implican la medición de aceleración estática (como la gravedad) o aceleración dinámica (como aceleraciones en el movimiento de personas, vehículos u otros objetos).

Los acelerómetros pueden ser de uno, dos o tres ejes, generalmente ortogonales entre sí. Para obtener mediciones adecuadas de un acelerómetro, sus ejes deben estar alineados de acuerdo a un sistema coordinado de referencia dado por el objeto al que se le aplica la medición de aceleración, esto permite obtener con precisión las direcciones y magnitudes de las aceleraciones a las que es sometido dicho objeto, por lo tanto, la correcta orientación de un acelerómetro es necesaria para obtener datos de aceleración bien definidos en cada eje medido.

Una forma de orientar un acelerómetro es alineándolo manualmente y fijándolo cuando los ejes del sistema coordinado de referencia coincidan con los ejes del sensor, este método tiene la desventaja de que el sensor está obligado a colocarse en una orientación física predeterminada, además, puede existir una mala precisión en su colocación. Aún cuando esta orientación manual pudiera llevarse a cabo con buena precisión, no siempre es factible ya que puede haber muchos dispositivos o aparatos en donde es difícil o no es posible adecuar físicamente la orientación del acelerómetro, por lo tanto, el acelerómetro no daría medidas adecuadas al no estar los ejes del sensor sincronizados con los ejes del objeto. Una solución a este problema se ha dado en el documento de patente de Estados Unidos número US4905518, el cual propone una base que sostiene un acelerómetro y que puede orientar físicamente el sensor al ser desmontable y montable en múltiples alineaciones.

Un ejemplo de aplicación donde se evidencia el problema técnico de la orientación de los acelerómetros es la instalación de acelerómetros con orientaciones arbitrarias en motocicletas, en donde los datos obtenidos no permitirían establecer claramente hacia dónde se mueve la motocicleta o si ha sufrido una caída. Para resolver este problema, se han planteado algunos métodos en los cuales no sería necesario hacer coincidir físicamente los ejes de un acelerómetro

con los ejes del objeto donde se encuentre instalado, de manera que no habría que preocuparse por la orientación exacta del acelerómetro sino por la transformación de los datos luego de establecer cuál es la orientación relativa del sensor.

En el documento de patente de Estados Unidos número US20140236531A1 se ha hecho una demostración de cómo múltiples acelerómetros, que están colocados en diferentes partes del cuerpo de una persona, no necesitan una estricta orientación ya que mediante la sincronización de sus datos permiten obtener y clasificar las aceleraciones significativas ocurridas como resultado del movimiento del cuerpo. En el documento de patente número US5046056A de Estados Unidos se habla de un acelerómetro con capacidad de auto orientar sus datos verticalmente independientemente de la orientación real del acelerómetro, con lo cual ya se puede notar que en el estado del arte se ha procurado resolver el problema de transformar los datos de acelerómetros que se han orientado arbitrariamente en cualquier aparato, en este caso es un acelerómetro de un solo eje. El documento de patente de los Estados Unidos US20020109673A1 reivindica un acelerómetro en un solo chip capaz de medir aceleración en múltiples planos de movimiento, para hacer uso de este método el chip debe ser montado con un ángulo de 19 grados respecto a la placa de circuito impreso. En el documento de patente número US20090157341A1 se propone un método de corrección de las mediciones de acelerómetros y magnetómetros basado en la combinación de mediciones de gravedad y campo magnético de la Tierra, obteniendo mediciones que están alineadas con nuestro planeta, un campo de aplicación es en los pozos de petróleo y gas. Los documentos de patente de los Estados Unidos US9581615B2 y US20150007632 muestran un método que transforma los datos de aceleración suministrados por un acelerómetro instalado con orientación desconocida en un vehículo, de manera que los datos transformados estén alineados con un sistema de coordenadas dado por el vehículo, dicho método se resume en dos pasos: el primer paso es medir el vector de gravedad para estimar la orientación vertical y el segundo paso consiste en almacenar datos de aceleración del vehículo durante su movimiento para estimar la orientación en el plano horizontal estableciendo así la orientación en los tres ejes de movimiento; muy similar es el método encontrado en el documento de patente de Estados Unidos número US7970573B2 en donde el invento está aplicado al movimiento de los seres humanos, la orientación hacia adelante se estima asumiendo que es la dirección hacia la cual usualmente caminan las personas.

#### **Descripción detallada de la invención:**

La siguiente descripción debe ser entendida como demostrativa, y no como limitante, de las características de la invención; algunos procedimientos pueden ejecutarse en diferente orden y obtener el mismo resultado sin alterar el alcance de la invención presentada. Algunas configuraciones, ubicaciones, escalas o formas mostradas en los dibujos pueden realizarse de manera diferente sin alterar la naturaleza de la invención, de modo que los dibujos no representan limitaciones de la invención sino ejemplos ilustrativos. Las expresiones matemáticas, como por ejemplo las matrices y ecuaciones, pueden tener más de una forma de representarse sin dejar de referirse a la misma expresión.

El presente invento consiste en un método que transforma los datos de aceleración entregados por cualquier acelerómetro de tres ejes, instalado con orientación arbitraria o desconocida, de

manera que los datos transformados estén alineados con el sistema de coordenadas dado por el objeto al que se le aplica la medición. El método emplea dos mediciones de gravedad para construir matrices de transformación, al multiplicar dichas matrices por las mediciones entregadas por el acelerómetro, las mediciones quedan automáticamente alineadas con el sistema de referencia deseado.

Aunque ya existen algunos métodos para corregir la orientación de acelerómetros, el método expuesto en este documento simplifica y optimiza el proceso mediante una toma de datos inicial, que sólo es necesario realizar una única vez luego de haber instalado el acelerómetro en cualquier orientación física, y a partir de ahí se obtienen los datos de calibración que permitirán obtener de manera inmediata, mediciones de aceleración correctamente alineadas con los ejes de movimiento de la aplicación final. La invención incluye un dispositivo que sirve para implementar el mencionado método y que además aprovecha su optimización para minimizar el costo computacional del procesamiento de los datos, incluyendo cálculos preestablecidos para prescindir del cálculo de ángulos, de funciones trigonométricas, o de cualquier cálculo complejo, simplificando así la matemática y mejorando la rapidez y precisión de los resultados.

Una diferencia fundamental de este invento con el estado de la técnica es que, con sólo dos vectores, cada uno producto de una medición, se crea la matriz que permitirá transformar los datos, haciendo que la orientación de las mediciones corresponda con los ejes de la aplicación final; además, para la obtención de los dos vectores, no es necesario tomar las mediciones con el acelerómetro sometido a ningún movimiento ya que la calibración es estática, por ejemplo, si se trata de un vehículo no se necesita que el vehículo esté en movimiento para tomar datos de calibración. Los métodos hasta ahora expuestos en el estado de la técnica son adaptativos, el método aquí propuesto es inmediato; en otras palabras, después de ejecutar el método de calibración, las mediciones del acelerómetro se pueden transformar inmediatamente sin que sea necesario tomar datos adicionales para corregir la orientación como sucede con otros métodos.

Un acelerómetro es un dispositivo que sirve para medir aceleración, los acelerómetros de tres ejes se diseñan para medir aceleración en las tres dimensiones del espacio físico con lo que se hace necesario tener una correcta alineación de los ejes del acelerómetro con los ejes del objeto al que se le quiere aplicar la medición. En muchos casos no es posible o no es factible fijar un acelerómetro a una orientación determinada, es muy común que los acelerómetros necesiten ser instalados en una orientación arbitraria o desconocida teniendo como consecuencia que las mediciones de aceleración quedan desalineadas respecto a los ejes de movimiento que se esperan medir.

En la **Figura 1** se muestra un ejemplo de cómo los ejes de un sistema coordenado de referencia ( $X_s$   $Y_s$   $Z_s$ ) pueden estar desalineados respecto a los ejes de un acelerómetro ( $X_a$   $Y_a$   $Z_a$ ), si se mide la aceleración en esas condiciones, muchas aplicaciones que requieren una correcta orientación de las mediciones de aceleración no funcionarían bien. La invención aquí presentada propone una manera de solucionar este problema sin necesidad de reorientar físicamente el acelerómetro sino mediante un procesamiento de los datos de aceleración basado en matrices de transformación; esta transformación da como resultado nuevos datos que son equivalentes a los de un acelerómetro correctamente alineado. En la

**Figura 2** se muestra los ejes reorientados del acelerómetro ( $X_a'$   $Y_a'$   $Z_a'$ ) y cómo esos ejes coinciden con los ejes del sistema de referencia ( $X_s$   $Y_s$   $Z_s$ ) luego de aplicar la transformación de datos que ajusta virtualmente la orientación del acelerómetro.

Para construir las matrices de transformación primero se deben hacer unas mediciones con el acelerómetro, las cuales deben estar debidamente filtradas para minimizar los ruidos presentes. Las dos mediciones necesarias son las siguientes:

- 1) El objeto donde está instalado el acelerómetro se orienta de manera que el eje vertical asignado del objeto  $Z_s$  coincida con la dirección del vector de gravedad (los ejes del acelerómetro tienen orientación desconocida), mientras se mantiene esa orientación, se miden las componentes de la aceleración de la gravedad percibidas por cada uno de los tres ejes del acelerómetro.
- 2) Manteniendo la orientación de la medición 1) el objeto se rota alrededor de uno de sus ejes horizontales ( $X_s$  ó  $Y_s$ ) con un ángulo comprendido entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (la máxima precisión se obtiene a los  $90^\circ$ ), mientras se mantiene esa inclinación, se miden las componentes de la aceleración de la gravedad percibidas por cada uno de los tres ejes del acelerómetro.

Una manera de realizar la medición 1) se ilustra en la **Figura 3**, donde el sistema coordenado de referencia, con ejes horizontales  $X_s$  y  $Y_s$  y eje vertical  $Z_s$ , se orienta de modo que su eje vertical  $Z_s$  queda alineado con el vector de gravedad  $\vec{g}$ , en este ejemplo, la aceleración de la gravedad apunta hacia la dirección negativa del eje  $Z_s$  pero se puede convenir que apunte en la dirección positiva haciendo la corrección de signos respectiva. La **Figura 4** representa el plano  $XZ$  y la ubicación de los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{g}$  en dicho plano con la orientación de la medición 1).

A partir de la medición 1) se obtiene un vector con las componentes de la aceleración de la gravedad  $\vec{g} = [a_x \ a_y \ a_z]$  vistas por los ejes del acelerómetro y a partir de esos datos se puede crear un nuevo vector  $\vec{a} = [-a_x \ -a_y \ -a_z]$  el cual está en sentido opuesto al vector  $\vec{g}$ . El vector  $\vec{a}$  tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo, se puede usar para determinar la ecuación del plano  $XY$  del sistema de referencia, para determinar la aceleración del objeto en el eje vertical  $Z_s$  y para determinar una matriz de cambio de base que permita expresar los datos en un sistema coordenado diferente.

Antes de realizar la medición 2), es necesario establecer alrededor de cuál eje se rotará el objeto, como ejemplo, la rotación se realizará alrededor del eje  $Y_s$  y girando hacia el semieje  $X_s$  negativo, por lo tanto, el procedimiento se concentrará en el plano  $XZ$ , la **Figura 5** representa la rotación del objeto y su sistema de referencia, de acuerdo a la orientación de la medición 2), el vector de gravedad  $\vec{g}$  se ve desplazado un ángulo  $\theta$  respecto al eje vertical  $Z_s$  y debe estar contenido totalmente en el plano  $XZ$ , se muestra el vector  $\vec{a}$  como vector director del eje vertical  $Z_s$ , con la nueva ubicación del vector  $\vec{g}$  en este plano se captura la magnitud de la aceleración de la gravedad que incide en cada uno de los tres ejes del acelerómetro  $\vec{g} = [b_x \ b_y \ b_z]$  y a partir de esos datos se obtiene un vector  $\vec{b} = [-b_x \ -b_y \ -b_z]$  el cual está en sentido opuesto al vector  $\vec{g}$ .

Hasta este momento, la orientación del acelerómetro es desconocida, pero con los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  se puede buscar una relación que permita expresar los datos de aceleración en los dos

distintos sistemas de coordenadas. En el estado de la técnica, el vector  $\vec{a}$  o su equivalente ya es usado para obtener la componente vertical de la aceleración, la actual invención propone usar un vector adicional  $\vec{b}$  para construir una matriz de transformación que permita obtener de una vez las tres componentes alineadas de la aceleración. En otras palabras, los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  se usan como referencia para transformar mediciones en tres dimensiones de un sistema coordenado a un sistema coordenado diferente.

La **Figura 6** representa los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  que forman el ángulo  $\theta$  y están contenidos en el plano  $XZ$ , el producto vectorial  $\vec{a} \times \vec{b}$  genera un vector  $\vec{c}$  perpendicular al plano  $XZ$  según la regla de la mano derecha, el vector  $\vec{c}$  se puede emplear para alinear las mediciones con el eje  $Y_s$  debido a que ese es el eje perpendicular al plano  $XZ$ . El producto vectorial  $\vec{a} \times \vec{b}$  está definido como:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} x & y & z \\ -a_x & -a_y & -a_z \\ -b_x & -b_y & -b_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = [(a_y b_z - a_z b_y)x \quad (a_z b_x - a_x b_z)y \quad (a_x b_y - a_y b_x)z]$$

Ya que  $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{c}$ , el vector  $\vec{c}$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$\vec{c} = [c_x \quad c_y \quad c_z]$$

Donde:

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y$$

$$c_y = a_z b_x - a_x b_z$$

$$c_z = a_x b_y - a_y b_x$$

Por último, se construye un nuevo vector  $\vec{d}$  que sirve para alinear los datos correspondientes al eje  $X$ , para ello se aplica el producto vectorial  $\vec{c} \times \vec{a}$ :

$$\vec{d} = \vec{c} \times \vec{a} = \begin{vmatrix} x & y & z \\ -c_x & -c_y & -c_z \\ -a_x & -a_y & -a_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{d} = [d_x \quad d_y \quad d_z]$$

Donde:

$$d_x = a_z c_y - a_y c_z$$

$$d_y = a_x c_z - a_z c_x$$

$$d_z = a_y c_x - a_x c_y$$

Hay que tener en cuenta las magnitudes resultantes de los vectores para normalizar posteriormente los resultados, dichas magnitudes se pueden establecer con estas otras definiciones para la magnitud del producto vectorial:

$$|\vec{c}| = |\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}||\vec{b}| \sin \theta$$

$$|\vec{d}| = |\vec{c} \times \vec{a}| = |\vec{c}||\vec{a}| \sin \theta$$

Como se observa en la **Figura 7**, tanto el vector  $\vec{a}$  como el vector  $\vec{c}$  están contenidos en el plano  $YZ$ , el resultado del producto vectorial  $\vec{c} \times \vec{a}$  es un vector  $\vec{d}$  orientado en la dirección  $X_s$  según la regla de la mano derecha.

De esta manera, el vector  $\vec{d}$  puede orientar los datos en el eje  $X_s$ , el vector  $\vec{c}$  puede orientar los datos en el eje  $Y_s$  y el vector  $\vec{a}$  puede orientar los datos en el eje  $Z_s$ . Además, con los vectores  $\vec{a}$ ,  $\vec{c}$  y  $\vec{d}$  se puede crear la matriz de transformación  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} d_x & d_y & d_z \\ c_x & c_y & c_z \\ -a_x & -a_y & -a_z \end{bmatrix}$$

Al multiplicar la matriz de transformación  $M$  por los datos del acelerómetro, los datos se transforman y quedan automáticamente alineados con el sistema de referencia. Para obtener magnitudes adecuadas, la matriz  $M$  debe tener sus filas normalizadas a 1 o a cualquier otro valor conveniente dentro del procesamiento de los datos. Sea  $\vec{u}$  el vector generado por los datos del acelerómetro con componentes  $[x_a \ y_a \ z_a]$ , y sea  $M$  la matriz de transformación que se generó usando el método propuesto, se cumple que  $\vec{u}' = M \cdot \vec{u}$ , donde  $\vec{u}'$  corresponde a las mediciones transformadas de aceleración con componentes  $[x'_a \ y'_a \ z'_a]$ , las cuales están alineadas con el sistema coordenado del objeto al que se le aplica la medición de aceleración.

Nótese que en el ejemplo hasta mostrado, la rotación se realizó alrededor del eje  $Y_s$ , si la rotación se hubiera hecho alrededor del eje  $X_s$ , la matriz de transformación  $M$  quedaría de la siguiente manera, siguiendo los mismos pasos anteriores y teniendo en cuenta la respectiva asignación de signos de acuerdo hacia cuál semieje se realizó la rotación:

$$M = \begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \\ -a_x & -a_y & -a_z \end{bmatrix}$$

Otra manera de implementar la transformación de los datos a partir de los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  es construyendo dos matrices de transformación  $M_3$  y  $M_2$ , Donde  $M_3$  es una matriz 3x3 que corrige la orientación en el eje  $Z_s$  y asigna los ejes  $X$  e  $Y$  a orientaciones arbitrarias pero contenidas en el plano  $XY$ ;  $M_2$  es una matriz 2x2 que se encarga de alinear finalmente la orientación de los ejes  $X_s$  e  $Y_s$  obtenidos en  $M_3$ .

La matriz  $M_3$  es una matriz creada únicamente a partir del vector  $\vec{a} = [-a_x \ -a_y \ -a_z]$ , donde  $\vec{a}$  está orientado hacia el eje  $Z_s$  y  $\vec{a}$  forma la tercera fila de la matriz  $M_3$ . Se puede establecer la ecuación del plano  $XY$  usando a  $\vec{a}$  como vector normal.

$$-a_x x - a_y y - a_z z = 0$$

Ecuación del plano  $XY$

Donde fácilmente se puede asignar un eje  $X$  o  $Y$  arbitrario reemplazando los valores  $x, y, z$  que cumplen la ecuación, esta asignación se hace convenientemente según la precisión o el algoritmo que se quiera implementar. Por ejemplo, una matriz  $M_3$  puede ser creada haciendo que  $x$  sea igual a cero lo cual obliga a asignar a  $y$  y  $z$  valores iguales a  $a_z$  y  $a_y$  pero con signos que cumplan la ecuación así:

$$-a_y(a_z) - a_z(-a_y) = 0$$

De esta ecuación se obtiene un nuevo vector  $\vec{e} = [0 \quad a_z \quad -a_y]$  el cual si se asigna a la orientación provisional en el eje  $Y$  corresponde a la segunda fila de la matriz  $M_3$ . Para hallar la fila restante, correspondiente a la asignación provisional del eje  $X$ , se puede usar el producto vectorial  $\vec{e} \times \vec{a}$ :

$$\vec{e} \times \vec{a} = \begin{vmatrix} x & y & z \\ 0 & a_z & -a_y \\ -a_x & -a_y & -a_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{e} \times \vec{a} = [a_z^2 - a_y^2 \quad a_x a_y \quad -a_x a_z]$$

Por lo tanto:

$$M_3 = \begin{vmatrix} a_z^2 - a_y^2 & a_x a_y & -a_x a_z \\ 0 & a_z & -a_y \\ -a_x & -a_y & -a_z \end{vmatrix}$$

Para construir la matriz  $M_2$ , se usa el vector  $\vec{b}$ . Sea  $\vec{v} = M_3 \cdot \vec{b}$ , las componentes  $x$  e  $y$  de  $\vec{v}$  se pueden usar para crear la matriz  $M_2$  así:

$$M_2 = \begin{vmatrix} v_x & v_y \\ -v_y & v_x \end{vmatrix}$$

De esta manera, siendo  $\vec{u}$  el vector generado por los datos del acelerómetro,  $M_3$  la matriz de transformación 3x3 y  $M_2$  la matriz de transformación 2x2, se cumple que  $\vec{u}'' = M_3 \cdot \vec{u}$ , donde  $\vec{u}'' = [u''_x \quad u''_y \quad u''_z]$  corresponde a los datos del acelerómetro alineados con el eje  $Z_s$  pero con ejes  $X$  e  $Y$  aún sin alinear; también se cumple que  $\vec{u}''' = M_2 \cdot (u''_x \quad u''_y)$ , donde  $\vec{u}'''$  es un vector de dos posiciones que contiene los datos alineados con los ejes  $X_s$  e  $Y_s$  respectivamente.

El invento también consta de un dispositivo que sirve para llevar a cabo el mencionado método y además, mediante las matrices obtenidas puede alinear en tiempo real mediciones de aceleración con el sistema de ejes coordenados de referencia, aunque los ejes del sensor de aceleración no coincidan con los ejes del sistema de referencia. De esta manera el dispositivo extiende, pero no limita su capacidad a la detección de arranques bruscos en vehículos.

El dispositivo consiste en un circuito electrónico que posee entre sus componentes al menos un acelerómetro con capacidad de medir aceleración en tres ejes ortogonales entre sí y provee los datos de aceleración del objeto en el que está instalado. Este objeto puede ser, pero no

exclusivamente, una motocicleta a la cual se le quiere medir las aceleraciones a las que es sometida. Otro de los componentes del circuito es una unidad de procesamiento, es decir, cualquier dispositivo de cómputo con capacidad de obtener y procesar datos del acelerómetro. el método de transformación está implementado en la unidad de procesamiento mediante la respectiva programación del algoritmo. Además de los componentes electrónicos básicos que se requieren para el funcionamiento del circuito, se incluye también otras etapas como una memoria no volátil para almacenar datos de calibración u otros datos necesarios en el procesamiento. El dispositivo también tiene circuitería diseñada para controlar uno o más dispositivos indicadores como bocinas o luces e incluye acondicionamiento para entrada de señales que pueden ser de interruptores, permitiéndole al usuario interactuar con el dispositivo, por ejemplo, para indicar funciones a realizar o indicar condiciones de calibración. El dispositivo también incluye cables para conexión a fuente de energía eléctrica los cuales pueden conformar un arnés en el cual también se puede incluir los cables externos para interruptores y luces. La **Figura 8** muestra un esquema general del dispositivo para la detección de la orientación de las mediciones entregadas por acelerómetros, el cual está a manera de ejemplo, pues más realizaciones se pueden llevar a cabo usando el mismo método, por ejemplo, es posible adaptar el dispositivo para transformar los datos de un acelerómetro externo en vez del acelerómetro instalado internamente.

La **Figura 9** muestra las partes que constituyen un ejemplo de diseño del dispositivo para alinear las mediciones entregadas por acelerómetros. Debido a sus características este diseño tiene un enfoque de aplicación hacia los vehículos; dicha figura incluye también accesorios como luces y caja de control. La **Figura 10** muestra un ejemplo del dispositivo mostrado en la **Figura 9** ensamblado como producto final.

El dispositivo está diseñado para instalarse en un objeto, al cual se le quiere aplicar mediciones de aceleración en cualquier orientación que sea conveniente en su instalación, ya que tiene la capacidad de ajustar los datos a los ejes de referencia. Dicho ajuste consiste en crear una matriz de transformación a partir de dos vectores obtenidos con mediciones de gravedad medidas en condiciones específicas y multiplicar dicha matriz por las mediciones de aceleración, de modo que los valores entregados por el acelerómetro en sus tres ejes se conviertan en valores referenciados con el sistema coordenado deseado, indistintamente de la orientación física del acelerómetro.

El dispositivo tiene la capacidad de transformar automáticamente la orientación de un acelerómetro, pero para su funcionamiento debe haberse llevado a cabo una calibración inicial que el usuario puede realizar en cualquier momento. Esta calibración es un proceso obligatorio que se debe realizar cada vez que se instala el dispositivo en un objeto o que, por cualquier motivo, luego de instalado éste ha sido movido de su posición de instalación inicial. Después de la calibración del acelerómetro, el dispositivo debe quedar totalmente fijo, sin rotaciones ni traslaciones con respecto al objeto de referencia para garantizar el correcto funcionamiento. En caso de que se desajuste su orientación debe realizarse de nuevo el proceso de calibración según el método presentado en esta invención.

Otra de las características con las que cuenta esta invención, es que la calibración se hace in situ una vez se haga la instalación. Es decir, la calibración se hace independiente del objeto y del

fabricante. Para reducir las fuentes de ruido debido a los movimientos y a las vibraciones, este dispositivo se diseñó para ser calibrado de manera estática sin herramientas ni elementos externos.

Esta invención tiene una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, pero sin limitarse a, vehículos, donde un acelerómetro de tres ejes puede instalarse con una orientación arbitraria o desconocida y mediante el dispositivo, puede clasificarse las distintas aceleraciones del vehículo en tres direcciones: vertical, longitudinal y lateral.

Para ilustrar cómo se puede usar el dispositivo, en la **Figura 11** se puede apreciar que el dispositivo ha sido instalado en una motocicleta. La motocicleta ya tiene sus ejes asignados, los cuales servirán de referencia en la calibración. Con la moto orientada verticalmente como se indica en la **Figura 11**, se capturan las componentes de la aceleración de la gravedad percibidas por el acelerómetro y con dichas componentes el dispositivo crea el vector  $\vec{a}$ . Como segundo paso, la motocicleta se debe inclinar hacia uno de sus lados como se indica en la **Figura 12**, en la cual se ha escogido inclinar hacia el semieje  $X$  negativo, el nivel de la inclinación se escoge de acuerdo a las preferencias o conveniencias del usuario, por ejemplo, una inclinación de  $30^\circ$  es conveniente por ser lo suficientemente precisa para hallar la magnitud del producto vectorial sin ser una inclinación excesiva que le sea difícil realizar al usuario ni tan pequeña que genere mucha imprecisión en los datos; manteniendo la motocicleta en dicha inclinación se capturan los datos de aceleración de la gravedad percibidos por los tres ejes del acelerómetro y con dichos datos el dispositivo crea el vector  $\vec{b}$ . A partir de los dos vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$ , el dispositivo se encarga de calcular las matrices de transformación y de proporcionar datos de aceleración alineados con los ejes de la motocicleta.

Una vez el dispositivo proporciona datos correctamente orientados con el sistema de ejes dado por la motocicleta, se pueden determinar los diferentes movimientos en la motocicleta y se pueden aplicar diversos algoritmos para detectar eventos. Siendo el eje  $Y$  positivo asignado a la dirección de avance de la motocicleta y el eje  $Z$  el eje vertical, se pueden aplicar los siguientes algoritmos para detectar eventos ocurridos con la motocicleta:

- Detección de aceleraciones bruscas a las que es sometida la motocicleta, mediante un umbral positivo que representa el límite donde se considera que una aceleración se convierte en aceleración brusca y mediante un tiempo determinado en el que la aceleración se mantiene por encima del umbral.
- Detección de frenadas bruscas de la motocicleta, mediante un umbral negativo que representa el límite donde se considera que una frenada se convierte en frenada brusca y mediante un tiempo determinado en el que la aceleración se mantiene por debajo (aceleración negativa) del umbral.
- Detección de caídas de la motocicleta, mediante la estimación de la componente de la gravedad en uno, dos o los tres ejes, este algoritmo está directamente asociado con la detección de inclinaciones.

Para mejorar la detección de estos eventos, además de un filtrado convencional, a las mediciones de aceleración se les puede aplicar una histéresis con la que se puede contrarrestar el ruido.

El dispositivo puede incluir entre sus características un sensor de voltaje para monitorear el voltaje de alimentación, este sensor puede ser un convertidor analógico-digital embebido en un microcontrolador y permitiría a la la unidad de procesamiento de datos digitales gestionar un modo de ahorro de energía si el voltaje es inferior a un valor predeterminado, esta característica serviría, por ejemplo, para evitar una descarga total en las baterías.

Una característica adicional del método y del dispositivo es que no siempre sería necesario tomar mediciones con cada acelerómetro para obtener los vectores de calibración, esto aplica si se sabe de antemano que diversos acelerómetros quedan instalados en su aplicación final conservando la misma orientación relativa, los vectores de calibración de uno de esos acelerómetros sirven también para los demás acelerómetros. Por ejemplo, si se van a instalar dispositivos con acelerómetro en un lote de vehículos y se sabe que la orientación de la instalación es siempre la misma en cada uno de los vehículos, los vectores, y también la matriz de transformación  $M$ , obtenidos por uno de los dispositivos se pueden reutilizar inmediatamente por los demás dispositivos, pudiendo de esta manera hacer una producción en serie con datos de calibración precargados para el lote.

#### **Indicación de aplicación industrial:**

El presente invento puede ser aplicado, pero sin limitarse a esta aplicación, a un activador de sirena con base en los arranques bruscos en vehículos. El acelerómetro puede instalarse en una motocicleta en cualquier posición u orientación y mediante el dispositivo se hace corresponder los ejes de la motocicleta con las medidas entregadas por el acelerómetro para clasificar correctamente el tipo de movimiento que se está ejecutando. Puede ser usado, por ejemplo, en motocicletas de policía para detectar una persecución policial repentina, ya que en este tipo de eventos hay una alta aceleración instantánea y el dispositivo interpreta una aceleración con estas características como una persecución, activando las sirenas y/o luces automáticamente. La utilidad de esta aplicación radica en que, en una persecución, el policía no tiene mucho tiempo para activar manualmente las sirenas mientras que el dispositivo lo hace automáticamente.

#### **Descripción de los dibujos:**

**La Figura 1** consiste en un esquema que ilustra los ejes de un sistema de referencia ( $X_s$   $Y_s$   $Z_s$ ) y los ejes de un acelerómetro de tres ejes ( $X_a$   $Y_a$   $Z_a$ ) desalineados respecto al sistema.

**La Figura 2** consiste en un esquema que ilustra los ejes de un sistema de referencia ( $X_s$   $Y_s$   $Z_s$ ) y los ejes corregidos de un acelerómetro de tres ejes ( $X_a'$   $Y_a'$   $Z_a'$ ) de modo que coinciden con los ejes del sistema de referencia.

**La Figura 3** representa en el espacio tridimensional la alineación del vector de gravedad  $\vec{g}$  con el eje vertical  $Z_s$  del sistema de referencia, así como el vector  $\vec{a}$  que equivale al vector  $\vec{g}$  pero en sentido opuesto de modo que  $\vec{a}$  apunta hacia el lado positivo del eje  $Z_s$ .

**La Figura 4** representa en el plano  $XZ$  la alineación del vector de gravedad  $\vec{g}$  con el eje vertical  $Z_s$  del sistema de referencia, así como el vector  $\vec{a}$  que equivale al vector  $\vec{g}$  pero en sentido opuesto de modo que  $\vec{a}$  apunta hacia el lado positivo del eje  $Z_s$ .

**La Figura 5** representa en el plano  $XZ$  la rotación del sistema de referencia alrededor del eje  $Y_s$  y en dirección hacia el semieje  $X_s$  negativo, de manera que el vector de gravedad  $\vec{g}$  tiene una nueva orientación con respecto al eje vertical  $Z_s$  del sistema de referencia, generando así un nuevo vector  $\vec{b}$  equivalente al vector  $\vec{g}$  pero en sentido opuesto, este nuevo vector  $\vec{b}$  forma un ángulo  $\theta$  con el vector  $\vec{a}$ , dicho ángulo coincide con el ángulo de rotación del sistema de referencia.

**La Figura 6** representa los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  contenidos en el plano  $XZ$ , estos vectores forman el ángulo  $\theta$  y su producto vectorial  $\vec{a} \times \vec{b}$  genera un vector  $\vec{c}$  perpendicular al plano  $XZ$  según la regla de la mano derecha.

**La Figura 7** representa los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{c}$  contenidos en el plano  $YZ$ , estos vectores son perpendiculares y su producto vectorial  $\vec{c} \times \vec{a}$  genera un vector  $\vec{d}$  perpendicular al plano  $YZ$  según la regla de la mano derecha.

**La Figura 8** representa un ejemplo esquemático del dispositivo (13) para alineación de mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes, el cual consta de un circuito impreso (1) que contiene una unidad de procesamiento (2) programada para aplicar el algoritmo de alineación de las mediciones de aceleración, incluye además al menos un acelerómetro de tres ejes (3) que se comunica con la unidad de procesamiento (2) y una memoria no volátil (4) para guardar los datos obtenidos en la calibración. Los cables de alimentación del circuito (5) impreso van primero a una etapa para la fuente de alimentación (6) que luego distribuye la energía a todos los componentes; incluye también otras etapas como el circuito de acondicionamiento de entrada de interruptores (7) el cual permite al usuario interactuar con el dispositivo mediante botones (8), un circuito controlador para bocina (9) con el cual se puede conectar una bocina (10) de acuerdo a la potencia que entrega el circuito (9) y un circuito controlador de luces (11) que sirve para activar luces indicadoras (12).

**La Figura 9** representa un ejemplo de realización del dispositivo (13), sin ensamblar, para alineación de mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes, el cual consta de un circuito impreso (1) que contiene entre otros componentes una unidad de procesamiento (2) con memorias RAM y EEPROM internas, un acelerómetro de tres ejes (3), tornillos de sujeción para el circuito (14), una bocina (10) cuyos cables (23) tienen un conector (22) para conectar con el circuito impreso (1), una tapa para encajar (15), un tornillo de sujeción del encaje (16), arnés del equipo (18) con cables para luces, controles y cables de alimentación que terminan en un conector para el arnés (17). Dicha figura también representa los accesorios, que son: el arnés con los cables de alimentación (5), el cual finaliza en un conector (19) que debe empalmar con el conector del dispositivo (17), cables para switches (20) que van a una caja de control (8), cables para luces (21) que van a luces de emergencia o señalización (12), soporte (25) con sus respectivos tornillos (26) que permite fijar el dispositivo (13) al objeto donde se va a instalar.

**La Figura 10** representa un ejemplo de realización del dispositivo (13) para alineación de mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes, ensamblado como producto final.

**La Figura 11** es una motocicleta (24) la cual tiene asignada un sistema coordenado de ejes que indican sus distintas direcciones así: eje  $Z$  para dirección vertical, eje  $X$  para dirección lateral y eje  $Y$  para dirección longitudinal. La motocicleta (24) contiene un dispositivo (13) para alineación de mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes. El vector de gravedad  $\vec{g}$  está alineado con el eje vertical  $Z$ .

**La Figura 12** es una motocicleta (24) inclinándose hacia el semieje  $X$  negativo con un ángulo  $\theta$  respecto a la línea normal  $N$  formada por una superficie con pendiente cero. El eje vertical  $Z$  y el eje horizontal  $X$  se desplazan junto con la motocicleta (24). El vector de gravedad  $\vec{g}$  sirve para referenciar el ángulo de inclinación  $\theta$ . La motocicleta (24) contiene un dispositivo (13) para alineación de mediciones de aceleración entregadas por acelerómetros de tres ejes, el cual se puede calibrar mediante esta inclinación.