

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 435 524**

51 Int. Cl.:

**G01P 3/22** (2006.01)

**G01P 7/00** (2006.01)

**G01P 15/08** (2006.01)

**G01P 15/18** (2013.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.05.2006 E 06753731 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2013 EP 1889006**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo**

30 Prioridad:

**03.06.2005 DE 102005025478**

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

**20.12.2013**

73 Titular/es:

**ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG  
(100.0%)  
Fahnenbergplatz  
79098 Freiburg, DE**

72 Inventor/es:

**PETERS, CHRISTIAN;  
BUHMANN, ALEXANDER y  
MANOLI, YIANNOS**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 435 524 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 y dispositivo para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo

La invención se refiere a un procedimiento para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo movable en un espacio tridimensional, en donde se facilita un número de sensores de aceleración lineal que tienen cada uno un eje de medición sensible y en donde los sensores individuales de aceleración lineal se disponen, cada uno, en una posición  $P_i$  fija con respecto al cuerpo. Además, la invención se refiere a un dispositivo para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo en un espacio tridimensional, en donde el dispositivo para la captación de al menos una señal de medición de aceleración  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots a_n)$  presenta un número de sensores de aceleración lineal dispuestos de manera fija con respecto al cuerpo.

A este respecto, por una ubicación relativa se entiende una ubicación referida a una posición de referencia, tal como, por ejemplo, una posición inicial. Por un sensor de aceleración lineal se entiende un sensor de aceleración unidireccional que es sensible a aceleraciones que tienen al menos una componente que se encuentra en el eje de medición del sensor de aceleración lineal. Los sensores de aceleración lineal pueden estar dispuestos, separados constructivamente unos de otros, cada uno en una carcasa propia. Pero también es posible que estén integrados sensores de aceleración lineal que presentan al menos dos y, en particular, tres ejes de medición diferentes como sensor de aceleración multidireccional en un elemento estructural eléctrico o electrónico común.

Por el documento DE 199 62 687 A1 son conocidos un procedimiento y un dispositivo para determinar la velocidad angular de un cuerpo giratorio, concretamente de un vehículo a motor. Para medir una señal de medición de aceleración se colocan en el cuerpo en cuatro posiciones separadas entre sí en total nueve sensores de aceleración lineal que tienen cada uno un eje de medición sensible que se extiende a través de la posición correspondiente. En una primera posición que está dispuesta en el origen de un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo están previstos tres sensores de aceleración lineal que están orientados cada uno con su eje de medición sensible en dirección de uno de los ejes x, y, z del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo. En una segunda posición que está dispuesta a una distancia  $r_1$  del origen sobre el eje y están dispuestos dos sensores lineales adicionales, de los cuales uno está orientado con su eje de medición en dirección z y el otro, con su eje de medición en dirección x. En una tercera posición que está dispuesta a una distancia  $r_2$  del origen sobre el eje x están previstos dos sensores lineales adicionales, de los cuales uno está orientado con su eje de medición en dirección y y el otro, en dirección z. De manera correspondiente, en una cuarta posición dispuesta en el eje z a una distancia  $r_3$  del origen están previstos dos sensores lineales que están orientados en dirección x e y. Para la aceleración  $\vec{a}$  en un punto P discrecional se aplica:

$$\vec{a} = A(t) + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2 \cdot \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} + \ddot{\vec{r}} \quad \text{Ec. (1)}$$

A este respecto significan:

$A$  la aceleración del origen del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo,  
 $t$  el tiempo,

$\vec{\omega}$  la velocidad angular del cuerpo y

$\vec{r}$  el vector de posición que apunta desde el origen del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo hacia el punto P.

Suponiendo que un sensor de aceleración lineal está montado de manera fija en el punto P del cuerpo  $\ddot{\vec{r}}$ , los términos se convierten en  $\ddot{\vec{r}}$  y en cero. Con esta suposición se obtiene:

$$\vec{a} = A(t) + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad \text{Ec. (2)}$$

A este respecto se trata de un sistema de ecuación diferencial tridimensional no lineal que no se puede resolver de manera analítica en general. Por lo tanto, la determinación de la velocidad angular del cuerpo giratorio hace necesario un esfuerzo de cálculo relativamente grande. Por consiguiente, el dispositivo que trabaja de acuerdo con el procedimiento es correspondientemente complicado, caro y, a pesar de eso, la mayoría de las veces, inexacto.

Ciertamente, por el documento DE 199 62 687 A1 ya se conoce también un procedimiento en el que se mide la aceleración angular  $\vec{\omega}_x$  del cuerpo alrededor del eje x con ayuda de solo cuatro sensores de aceleración lineal montados de manera fija en el cuerpo. A este respecto, dos sensores de aceleración lineal están dispuestos en el origen del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo, en donde un primer sensor de aceleración lineal está orientado con su eje de medición en dirección del eje y, y un segundo sensor de aceleración lineal, con su eje de medición en dirección del eje z. Un tercer sensor de aceleración lineal está dispuesto en el eje y a una distancia  $r_1$  del origen y está alineado en dirección del eje z. Un cuarto sensor de aceleración lineal está dispuesto en el eje z a una distancia

$r_3$  del origen y está orientado con su eje de medición sensible en dirección del eje y. Si se insertan las posiciones de los cuatro sensores de aceleración lineal en la ecuación (2), se obtiene, después de la transformación algebraica:

$$\vec{\omega}_x = \frac{a_{z1} - a_{z0}}{2 \cdot r_1} - \frac{a_{y3} - a_{y0}}{2 \cdot r_3}, \quad \text{Ec. (3)}$$

en donde  $a_{z0}$ ,  $a_{z1}$ ,  $a_{y0}$ ,  $a_{y1}$  representan los valores de medición de los cuatro sensores de aceleración lineal. Sin embargo, la ecuación (3) se aplica solamente para el caso especial en el que el primer y el tercer sensor de aceleración lineal con su eje de medición están orientados cada uno exactamente en dirección y y los otros dos sensores de aceleración lineal, con sus ejes de medición en ángulo recto con respecto a esto en dirección z. El artículo "Demonstration of a methodology for wheelchair acceleration analysis" de D. P. Van Sickle *et al*, publicado en Engineering In Medicine And Biology Society (páginas 1301 y 1302) describe un procedimiento y un dispositivo para la navegación inercial. Doce sensores de aceleración lineal se disponen cada uno en una posición fija con respecto a un cuerpo movable, que se puede describir a través de un vector de posición estacionario, y con una orientación del eje de medición que se puede describir a través de un vector de dirección. A partir de las señales de medición de aceleración y las magnitudes características correspondientes a los vectores de posición y de dirección se forma una señal de ubicación, velocidad y/o aceleración para el cuerpo. Sin embargo, la disposición en ángulo recto de los sensores de aceleración lineal es problemática en la práctica, ya que durante la producción y el montaje de los sensores de aceleración lineal aparecen tolerancias de fabricación y colocación en el cuerpo. Principalmente debido al montaje de los sensores de aceleración lineal en el cuerpo se producen casi forzosamente desviaciones en la alineación y la colocación. Incluso desviaciones pequeñas de la ubicación de los sensores de aceleración lineal de la disposición de sensores, en la que se basa la ecuación (3), pueden conducir a errores relativamente grandes durante el cálculo de la aceleración angular  $\vec{\omega}_x$ . Esto es, en particular, desventajoso cuando se integra la señal de aceleración angular para determinar la ubicación del cuerpo y, a este respecto, se suman los errores sin restricciones. El último punto en particular ha sido decisivo para que no se hayan impuesto hasta ahora dispositivos para determinar la ubicación que trabajan solamente con sensores de aceleración lineal.

Por lo tanto, existe el objetivo de crear un procedimiento y un dispositivo del tipo mencionado inicialmente que posibiliten, de manera sencilla, una determinación exacta de la ubicación, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo.

Este objetivo se resuelve en cuanto al procedimiento facilitándose un número de n sensores de aceleración lineal que tienen, cada uno, un eje de medición sensible, ascendiendo el número n al menos a doce, disponiéndose los sensores individuales de aceleración lineal, cada uno, en una posición  $P_i$  fija con respecto al cuerpo, que se puede

describir a través de un vector de posición estacionario  $\vec{r} = (r_{xi}, r_{yi}, r_{zi})$  que apunta desde un punto de referencia fijo en el cuerpo hacia la correspondiente posición  $P_i$ , en donde los sensores de aceleración lineal se alinean de tal manera que su eje de medición, en cada caso, está orientado en dirección de un vector de dirección  $\vec{\Theta}_i = (\Theta_{xi}, \Theta_{yi}, \Theta_{zi})$ , indicando  $i \in [1, 2, 3, 4, \dots, n]$ , en cada caso, el sensor correspondiente de aceleración lineal y x, y, z, ejes que se extienden a través del punto de referencia de un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo, seleccionándose los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  de manera que el rango de una matriz de doce columnas formada por los vectores columna

$$\vec{S}_1 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1} \\ \Theta_{x2} \\ \Theta_{x3} \\ \Theta_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}_2 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1} \\ \Theta_{y2} \\ \Theta_{y3} \\ \Theta_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}_3 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1} \\ \Theta_{z2} \\ \Theta_{z3} \\ \Theta_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}_4 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} - \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} - \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} - \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} - \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} - \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}_5 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1}r_{z1} - \Theta_{z1}r_{x1} \\ \Theta_{x2}r_{z2} - \Theta_{z2}r_{x2} \\ \Theta_{x3}r_{z3} - \Theta_{z3}r_{x3} \\ \Theta_{x4}r_{z4} - \Theta_{z4}r_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn}r_{zn} - \Theta_{zn}r_{xn} \end{pmatrix},$$

$$\bar{S}_6 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} - \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} - \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} - \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} - \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} - \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_7 = \begin{pmatrix} -\Theta_{y1}r_{y1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{y2}r_{y2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{y3}r_{y3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{y4}r_{y4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{yn}r_{yn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \bar{S}_8 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix},$$

$$\bar{S}_9 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{y1}r_{y1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{y2}r_{y2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{y3}r_{y3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{y4}r_{y4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{yn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_{10} = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_{11} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

y

$$\bar{S}_{12} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} + \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} + \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} + \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} + \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} + \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

- 5 es igual a doce, captándose con ayuda de los sensores de aceleración lineal al menos una señal de medición de aceleración  $a = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n)$  y formándose a partir de la señal de medición de aceleración y las magnitudes características que describen la ubicación relativa y la orientación de los sensores de aceleración lineal en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo una señal de ubicación, velocidad y/o aceleración para el cuerpo.

La invención parte de la ecuación (2) que, en forma de escritura vectorial, de acuerdo con sus componentes en las coordenadas fijas en el cuerpo x, y, z se puede escribir como sigue:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_z \dot{\omega}_y - r_y \dot{\omega}_z \\ -r_z \dot{\omega}_x + r_x \dot{\omega}_z \\ r_y \dot{\omega}_x - r_x \dot{\omega}_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_y \omega_x \omega_y - r_x \omega_y^2 + r_z \omega_x \omega_z - r_x \omega_z^2 \\ r_x \omega_x \omega_y - r_y \omega_x^2 + r_z \omega_y \omega_z - r_y \omega_z^2 \\ r_x \omega_x \omega_z - r_z \omega_y^2 + r_y \omega_y \omega_z - r_z \omega_x^2 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (4)}$$

Puesto que los sensores individuales de aceleración lineal disponen, cada uno, de solamente un eje de medición sensible con el vector de dirección  $\hat{\Theta}_i$ , se debe formar el producto escalar de la ecuación (4) y  $\hat{\Theta}_i$ . Esto conduce a la ecuación (5) que describe la aceleración  $a_i$  medida con el sensor de aceleración lineal  $i$  en el punto  $P_i$ :

$$\begin{aligned} a_i = & \theta_z (A_x - r_x \omega_x^2 - r_z \omega_y^2 + r_x \omega_x \omega_z + r_y \omega_y \omega_z + r_y \dot{\omega}_x - r_x \dot{\omega}_y) + \\ & \theta_y (A_y - r_y \omega_x^2 - r_y \omega_z^2 + r_x \omega_x \omega_y + r_z \omega_y \omega_z + r_x \dot{\omega}_z - r_z \dot{\omega}_x) + \\ & \theta_x (A_x - r_x \omega_y^2 - r_x \omega_z^2 + r_y \omega_x \omega_y + r_z \omega_x \omega_z + r_x \dot{\omega}_y - r_y \dot{\omega}_z) \end{aligned} \quad \text{Ec. (5)}$$

- 15 Si se observa el lado derecho de la ecuación (5) se observa que se compone de los siguientes doce valores, de los cuales seis son independientes:

$$\mathbf{w} = \{A_x, A_y, A_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z, \omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, \omega_x \omega_y, \omega_x \omega_z, \omega_y \omega_z\}$$

Los valores restantes describen la posición  $\vec{r}_i$  o la orientación  $\vec{\Theta}_i$  de los sensores de aceleración lineal en el espacio.

Si se usa ahora un número n de al menos doce sensores de aceleración lineal, se obtienen los valores de medición de  $a_1$  a  $a_n$ . Si se escribe la ecuación (5) para los n sensores entre ellos, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones, que está representado en el presente documento solamente de manera parcial por razones de espacio

$$\begin{aligned} a_1 &= \theta_{z1}(A_z - r_{z1}\omega_x^2 - r_{z1}\omega_y^2 + r_{x1}\omega_x\omega_z + r_{y1}\omega_y\omega_z + r_{y1}\dot{\omega}_x - r_{x1}\dot{\omega}_y) + \dots \\ a_2 &= \theta_{z2}(A_z - r_{z2}\omega_x^2 - r_{z2}\omega_y^2 + r_{x2}\omega_x\omega_z + r_{y2}\omega_y\omega_z + r_{y2}\dot{\omega}_x - r_{x2}\dot{\omega}_y) + \dots \\ &\dots \\ &\dots \\ a_n &= \theta_{zn}(A_z - r_{zn}\omega_x^2 - r_{zn}\omega_y^2 + r_{xn}\omega_x\omega_z + r_{yn}\omega_y\omega_z + r_{yn}\dot{\omega}_x - r_{xn}\dot{\omega}_y) + \dots \end{aligned} \quad \text{Ec. (6)}$$

Si se separan los doce valores que se han mencionado anteriormente del lado derecho de la ecuación (6), se obtiene el sistema de ecuaciones ilustrado en las Figs. 1a a 1c, que se puede escribir de manera simplificada como:

$$\vec{a} = \underline{A} \cdot \vec{w} \quad \text{Ec. (7)}$$

Para poder determinar ahora a partir de la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$  el movimiento del cuerpo se debe resolver la ecuación (7) despejando  $\vec{w}$ . Para este fin, se debe poder invertir la matriz  $\underline{A}$  12 x n. Este es el caso cuando los sensores de aceleración lineal están dispuestos de manera que la matriz  $\underline{A}$  formada a partir de los vectores columna mencionados en la reivindicación 1  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \vec{s}_4, \vec{s}_5, \vec{s}_6, \vec{s}_7, \vec{s}_8, \vec{s}_9, \vec{s}_{10}, \vec{s}_{11}$ , y  $\vec{s}_{12}$  presenta el rango  $\text{Rg}(\underline{A}) = 12$  o es linealmente independiente y, con ello, el determinante de  $\underline{A}$  no es igual a 0. La norma de cálculo es:

$$\vec{w} = \underline{A}^{-1} \cdot \vec{a} \quad \text{Ec. (8)}$$

El procedimiento de acuerdo con la invención, de manera ventajosa, hace posible, incluso con ejes de medición dispuestos de manera oblicua entre ellos, determinar de manera sencilla con exactitud la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración del cuerpo sin que deba resolverse numéricamente un sistema de ecuaciones diferenciales.

En una configuración preferida de la invención, después de disponer los sensores de aceleración lineal en las posiciones  $P_i$  se llevan a cabo al menos cinco mediciones en las que se acelera el cuerpo en relación con un sistema de coordenadas fijado a tierra en diferentes direcciones conocidas de manera lineal y/o alrededor de al menos un centro de giro conocido, en donde se capta en cada medición, en cada caso, una señal de medición de aceleración  $\vec{a}_k = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n)$  y en donde, a partir de las señales de medición de aceleración  $\vec{a}_k$  y las direcciones y/o el al menos un centro de giro, se determinan las magnitudes características para la ubicación y la orientación de los sensores de aceleración lineal. Por lo tanto, se lleva a cabo una etapa de calibración en la que se establecen las magnitudes características dependiendo de la respectiva ubicación y alineación de los sensores de aceleración lineal, de modo que se tienen en cuenta las posibles tolerancias que aparecen durante la fabricación y/o la colocación de los sensores de aceleración lineal en el cuerpo durante la captación de la señal de ubicación, de velocidad, de aceleración y/o de centro de giro. Por lo tanto, se puede lograr una elevada precisión de medición incluso con tolerancias relativamente grandes de fabricación y colocación de los sensores de aceleración lineal.

En una forma de realización ventajosa de la invención, a partir de la señal de velocidad se establece la ubicación relativa de un centro de giro, alrededor del cual gira el cuerpo en el espacio. A este respecto, para determinar el centro de giro del movimiento de rotación se busca el punto en el que la velocidad es igual a cero. Por ejemplo, en un vehículo a motor, dependiendo de la ubicación del punto de giro en relación con el centro del vehículo a motor y dependiendo de la velocidad angular y/o de la aceleración angular del vehículo a motor se puede controlar la activación de un equipo de seguridad previsto para proteger a los ocupantes del vehículo.

En relación con el dispositivo, el objetivo que se ha mencionado anteriormente se resuelve presentando el dispositivo para captar al menos una señal de medición de aceleración  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n)$  un número de n

sensores de aceleración lineal dispuestos en un lugar fijo en relación con el cuerpo, ascendiendo el número n al menos a doce, pudiéndose describir las posiciones  $P_i$  en las que están dispuestos los sensores de aceleración lineal,

en cada caso, a través de un vector de posición estacionario  $\vec{r}_i = (r_{xi}, r_{yi}, r_{zi})$  que apunta desde un punto de referencia fijo en el cuerpo hacia la correspondiente posición  $P_i$ , presentando los sensores de aceleración lineal, en

- 5 cada caso, un eje de medición sensible que está orientado en dirección de un vector de dirección  $\vec{\Theta}_i = (\Theta_{xi}, \Theta_{yi}, \Theta_{zi})$ , indicando  $i \in [1, 2, 3, 4, \dots, n]$ , en cada caso, el sensor correspondiente de aceleración lineal y x, y, z, ejes que se extienden a través del punto de referencia de un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo, estando seleccionados los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  de manera que el rango de una matriz de doce columnas formada por los vectores columna

$$\bar{S}_1 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1} \\ \Theta_{x2} \\ \Theta_{x3} \\ \Theta_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn} \end{pmatrix}, \bar{S}_2 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1} \\ \Theta_{y2} \\ \Theta_{y3} \\ \Theta_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_3 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1} \\ \Theta_{z2} \\ \Theta_{z3} \\ \Theta_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn} \end{pmatrix}, \bar{S}_4 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} - \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} - \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} - \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} - \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} - \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}, \bar{S}_5 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1}r_{z1} - \Theta_{z1}r_{x1} \\ \Theta_{x2}r_{z2} - \Theta_{z2}r_{x2} \\ \Theta_{x3}r_{z3} - \Theta_{z3}r_{x3} \\ \Theta_{x4}r_{z4} - \Theta_{z4}r_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn}r_{zn} - \Theta_{zn}r_{xn} \end{pmatrix},$$

$$\bar{S}_6 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} - \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} - \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} - \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} - \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} - \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_7 = \begin{pmatrix} -\Theta_{y1}r_{y1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{y2}r_{y2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{y3}r_{y3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{y4}r_{y4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{yn}r_{yn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \bar{S}_8 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix},$$

$$\bar{S}_9 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{y1}r_{y1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{y2}r_{y2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{y3}r_{y3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{y4}r_{y4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{yn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_{10} = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \bar{S}_{11} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

10

y

$$\bar{S}_{12} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} + \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} + \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} + \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} + \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} + \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

es igual a doce y estando unidos los sensores de aceleración lineal con un equipo de evaluación que está configurado para formar una señal de ubicación, velocidad y/o aceleración para el cuerpo a partir de la señal de medición de aceleración a y las magnitudes características que describen la ubicación relativa y la orientación de los sensores de aceleración lineal en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo.

15

Como ya se mencionó con el procedimiento, los ejes de medición de los al menos doce sensores de aceleración lineal también pueden estar dispuestos de forma discrecional de manera oblicua entre ellos, siempre que la matriz formada a partir de los doce vectores columna  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \vec{s}_4, \vec{s}_5, \vec{s}_6, \vec{s}_7, \vec{s}_8, \vec{s}_9, \vec{s}_{10}, \vec{s}_{11}, \vec{s}_{12}$  sea linealmente independiente. Sin embargo, con ayuda del dispositivo se puede determinar con gran precisión la señal relativa de ubicación, de velocidad y/o de aceleración. Esto es ventajoso, en particular, si el cuerpo es un vehículo a motor puesto que los sensores de aceleración lineal pueden ser instalados ahora en lugares apropiados en el vehículo a motor. A este respecto es concebible incluso el uso de sensores de aceleración lineal ya existentes en el vehículo, como por ejemplo sensores de airbag para el dispositivo de acuerdo con la invención.

El dispositivo puede ser parte de un sistema de navegación inercial (INS). El sistema de navegación puede presentar adicionalmente también un sistema de posicionamiento global (GPS) que presenta varios satélites que se encuentran en órbita alrededor de la Tierra en posición conocida. El sistema de navegación inercial se usa, a este respecto, con preferencia cuando se encuentra alterada temporalmente la determinación de posición de GPS, por ejemplo, porque un obstáculo obstruye la vista despejada sobre el satélite. A través de un filtro matemático apropiado, en particular un filtro de Kalman, un filtro de Kalman extendido y/o un filtro de partículas se puede conectar el INS dinámico pero no estable a largo plazo con el GPS lento pero estable a largo plazo. Esto permite un sistema dinámico y estable a largo plazo con mejores propiedades que los sistemas individuales correspondientes. Además, es posible una autocalibración en línea.

El uso del dispositivo de acuerdo con la invención no está limitado al sector del automóvil. El dispositivo puede ser usado en particular también en la técnica médica, en un vehículo aéreo y/o acuático y en todas aquellas otras aplicaciones en las que es de importancia la medición de la ubicación y del movimiento de un cuerpo en el espacio.

En una forma de realización ventajosa de la invención, el dispositivo de evaluación presenta una memoria de datos en la que se guarda al menos una señal de magnitud característica para un vector de línea de una matriz de magnitud característica que es inversa a una matriz de doce columnas que presenta los vectores columna  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \vec{s}_4, \vec{s}_5, \vec{s}_6, \vec{s}_7, \vec{s}_8, \vec{s}_9, \vec{s}_{10}, \vec{s}_{11}, \vec{s}_{12}$ . A este respecto, el dispositivo puede tener un microprocesador conectado con una memoria de datos en la que se realiza el cálculo de la señal relativa de ubicación, de velocidad y/o de aceleración. De manera preferente se determina la matriz de magnitud característica basándose en valores de medición para la ubicación y la alineación de los sensores individuales de aceleración lineal en relación con el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo. Se sobreentiende que, sin embargo, también se puede preestablecer de manera fija la matriz de magnitud característica, por ejemplo, cuando se conoce la ubicación y la alineación de los sensores individuales de aceleración lineal de otro modo que a través de una medición.

Es ventajoso que el dispositivo de evaluación presente medios para la formación de al menos una primera señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$  y que se seleccione la al menos una señal de magnitud característica de manera que la al menos una primera señal de producto escalar se corresponda con un componente vectorial de la aceleración de traslación del cuerpo. A este respecto, estos medios están configurados preferentemente de manera que con ayuda del dispositivo para tres direcciones que se extienden transversalmente entre ellas, como por ejemplo las direcciones de los ejes de un sistema cartesiano de coordenadas, se determina en cada caso un componente para la aceleración de traslación del cuerpo en relación con el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo.

En una forma de realización preferente de la invención, el dispositivo de evaluación presenta medios para formar al menos una segunda señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$ , en donde la al menos una señal de magnitud característica se selecciona de tal manera que la segunda señal de producto escalar se corresponde con un componente vectorial de la aceleración angular del cuerpo. A este respecto, estos medios están configurados preferentemente de manera que con ayuda del dispositivo para tres direcciones que se extienden transversalmente entre ellas, como por ejemplo las direcciones de los ejes de un sistema cartesiano de coordenadas, se determina en cada caso un componente para la aceleración angular del cuerpo en relación con el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo.

En una configuración conveniente de la invención, el dispositivo de evaluación presenta medios para eventualmente integrar por duplicado la al menos una segunda señal de producto escalar. A partir de la aceleración angular se pueden determinar entonces la velocidad angular y/o la ubicación de giro del cuerpo en relación con una ubicación inicial. El dispositivo puede estar previsto, a este respecto, en particular para controlar un dispositivo de seguridad para proteger los ocupantes de un vehículo a motor contra lesiones al volcar. A este respecto, el dispositivo puede servir en particular para determinar el ángulo que presenta un eje preestablecido del vehículo, como por ejemplo el eje longitudinal, en relación con la dirección de la aceleración terrestre, a fin de activar el dispositivo de seguridad en el momento correcto al volcar. Dependiendo de si el vehículo está parado en una llanura o en una montaña se desplaza el ángulo crítico en el que es inevitable un vuelco. A fin de decidir cuáles son las medidas que deben tomarse en caso de un vuelco inminente, también es de gran importancia la posición del eje de giro en el espacio. Por ejemplo, si el eje de giro se encuentra en el interior del vehículo, también se puede usar un dispositivo de seguridad diferente que si el eje de giro se encuentra en el exterior. Especialmente para un dispositivo de seguridad

en un vehículo a motor es ventajosa la robustez de los sensores de aceleración lineal, puesto que los mismos no deben ser destruidos ya a través de un impacto antes del vuelco propiamente dicho.

En una forma de realización ventajosa de la invención, el dispositivo de evaluación presenta medios para formar al menos una tercera señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$ , en donde la al menos una señal de magnitud característica se selecciona de manera que la tercera señal de producto escalar se corresponde con el cuadrado de un componente vectorial de la velocidad angular del cuerpo y en donde el dispositivo de evaluación presenta medios para formar una señal de raíz cuadrada a partir de la señal de producto escalar. El dispositivo puede proveer entonces una señal de medición para el valor de la velocidad angular del cuerpo.

Es ventajoso que el dispositivo de evaluación presente medios para formar al menos una cuarta señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$ , que la al menos una señal de magnitud característica se seleccione de manera que la cuarta señal de producto escalar se corresponda con el producto de dos componentes vectoriales diferentes de la velocidad angular del cuerpo, que el dispositivo de evaluación presente medios para integrar las segundas señales de producto escalar determinadas en cada caso para el componente vectorial correspondiente y para formar al menos una señal de producto a partir de los resultados de estas integraciones, que el dispositivo de evaluación presente un dispositivo de comparación para comparar el valor de esta señal de producto con la cuarta señal de producto escalar y que el dispositivo de comparación tenga una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación. Por lo tanto, la segunda y la cuarta señal de producto escalar son sometidas a una prueba de plausibilidad. Si a este respecto se comprueba que las correspondientes señales de producto escalar no se corresponden entre ellas, se puede descartar la señal relativa de ubicación, de velocidad y/o de aceleración determinada con ayuda del dispositivo y/o se puede bloquear la activación de un dispositivo de seguridad que se encuentra en comunicación de control con el dispositivo.

De manera conveniente, el dispositivo de comparación está configurado para comparar la señal de raíz cuadrada con la señal formada a través de la integración de la al menos una segunda señal de producto escalar y tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación. La plausibilidad de los resultados de medición puede comprobarse entonces todavía mejor.

Es ventajoso que el dispositivo de evaluación presente medios para la integración de la segunda señal de producto escalar y para formar el cuadrado a partir del resultado de esta integración, que estos medios para comparar la señal así obtenida con la tercera señal de producto escalar estén unidos con el dispositivo de comparación y que el dispositivo de comparación tenga una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación. Por lo tanto, se comprueba la plausibilidad de la segunda y la tercera señal de producto escalar.

En una configuración preferida de la invención, el dispositivo de evaluación para diferenciar la señal de raíz cuadrada presenta un dispositivo de diferenciación, en donde el dispositivo de diferenciación para comparar la señal diferenciada con la segunda señal de producto escalar está unido con el dispositivo de comparación y en donde el dispositivo de comparación tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación. También esta medida hace posible una comprobación sencilla y rápida de la plausibilidad de los resultados de la medición.

A continuación se describe con mayor detalle un ejemplo de realización de la invención haciendo referencia al dibujo. Muestran:

Las figuras 1a a 1c, un sistema de ecuaciones que presenta dos vectores y una matriz para doce sensores de aceleración lineal,

La fig. 2, una representación esquemática de un cuerpo desplazable en un espacio tridimensional en dirección de los tres ejes u, v, w de un sistema cartesiano de coordenadas fijo en la Tierra y que puede girar alrededor de estos ejes,

La fig. 3, una representación esquemática de los ejes de medición de sensores de aceleración lineal instalados en el cuerpo en un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo con los ejes x, y y z,

La fig. 4, una tabla en la que aparecen las posiciones de los sensores de aceleración lineal en las coordenadas del sistema cartesiano de coordenadas fijo en el cuerpo,

La fig. 5, una tabla en la que aparecen las direcciones en las que los sensores de aceleración lineal son sensibles en las coordenadas del sistema cartesiano de coordenadas fijo en el cuerpo,

La fig. 6, la matriz del sistema de ecuaciones ilustrado en la fig. 2 para la disposición mostrada en la fig. 3 de sensores de aceleración lineal,

La fig. 7, una matriz que es inversa a la matriz ilustrada en la fig. 6,



La fig. 8, un campo de vectores que contiene vectores de velocidad para un movimiento de un cuerpo que presenta una componente de traslación y una componente de rotación, en donde el centro de giro del movimiento de rotación se indica con C y

La fig. 9, un diagrama de bloques de un dispositivo para determinar la ubicación, la velocidad, la aceleración y/o el centro de giro de un cuerpo en un espacio tridimensional.

Un dispositivo para determinar la ubicación relativa, la velocidad, la aceleración y eventualmente el centro de giro de un cuerpo 1 dispuesto en un espacio tridimensional abarcado por las coordenadas u, v, w de un sistema de coordenadas fijo en el espacio o en la Tierra (fig. 2) para la captación de al menos una señal de medición de aceleración  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$  tiene doce sensores de aceleración lineal 2 dispuestos en una ubicación fija con respecto al cuerpo 1, que son sensibles cada uno en dirección de un eje de medición 3 sensible. El cuerpo 1 se puede mover libremente en el espacio, es decir, se puede desplazar a lo largo de los ejes u, v, w y puede girar alrededor de cada uno de los ejes u, v, w.

En la fig. 2 se puede observar que está asignado al cuerpo un sistema cartesiano de coordenadas fijo del cuerpo con los ejes x, y y z y el origen 4. El origen 5 del sistema de coordenadas fijo en el espacio u, v, w está unido con el origen 4 del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo x, y, z a través de un vector R. En la fig. 2 se representa, a modo de ejemplo, una curva de trayectoria 6 a lo largo de la cual se ha movido el origen 4 del sistema de coordenadas fijo en el cuerpo x, y, z. Además, se ilustra un punto P distanciado del origen 4 del cuerpo 1. El origen 4 está unido a través de un vector  $\vec{r}_i$  con el punto P.

En la fig. 3 están representados los ejes de medición 3 de los sensores de aceleración lineal 2 en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo x, y, z. Las coordenadas  $r_{xi}, r_{yi}, r_{zi}$  de los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y las coordenadas  $\Theta_{xi}, \Theta_{yi}, \Theta_{zi}$  de los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  de los ejes de medición 3 se enumeran cada una en la fig. 4. A este respecto, el índice  $i \in [1, 2, 3, 4, \dots, 12]$  se corresponde con el número del respectivo sensor de aceleración lineal 2. Los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  se determinan de manera preferente a través de calibración.

A partir de la fig. 3 y la tabla en la fig. 4 se puede observar que, en cada caso, tres sensores de aceleración lineal 2, cuyos ejes de medición 3 están orientados en direcciones extendidas transversalmente entre ellas que no están dispuestas en un plano, están dispuestos en la misma posición y forman un sensor de aceleración 7 multidireccional (fig. 9).

Sustituyendo las coordenadas  $r_{xi}, r_{yi}, r_{zi}$  de los doce vectores de posición  $\vec{r}_i$  y las coordenadas  $\Theta_{xi}, \Theta_{yi}, \Theta_{zi}$  de los doce vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  en la matriz  $\underline{A}$  del sistema de ecuaciones ilustrado en las figuras 1a a 1c se obtiene así la matriz de 12x12 representada en la fig. 6. El determinante de esta matriz es -16 y el rango  $Rg(\underline{A}) = 12$ . Con esto se cumple la condición relativa a que los vectores columna de la matriz  $\underline{A}$  son linealmente independientes y la matriz  $\underline{A}$  puede invertirse así de manera conocida. En la fig. 7 se ilustra la matriz invertida redondeada a tres decimales  $\underline{A}^{-1}$  a la que se hace referencia de aquí en adelante como matriz de magnitud característica.

Con ayuda de la matriz de magnitud característica  $\underline{A}^{-1}$  se puede calcular ahora según la ecuación (8) el vector

$\vec{W} = (A_x, A_y, A_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z, \omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, \omega_x \omega_y, \omega_x \omega_z, \omega_y \omega_z)$  y determinar así de manera sencilla la aceleración de traslación  $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$ , la aceleración de rotación  $\vec{\dot{\omega}} = (\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ , los cuadrados de las velocidades angulares  $\omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2$  relativas a los ejes fijos en el cuerpo x, y, z del cuerpo 1 y términos mixtos que se corresponden cada uno con el producto de dos componentes vectoriales diferentes  $\omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2$  de la velocidad angular del cuerpo 1.

A fin de poder determinar el punto de giro de un cuerpo es necesario conocer la velocidad de traslación  $\vec{A}$  y la rotación  $\vec{\omega}$ . El punto de giro se determina al buscar el punto en el que desaparece el valor de la velocidad. La derivación de la velocidad se realiza con ayuda de la superposición de la velocidad de traslación  $R=v$  y la velocidad de rotación  $\omega \times r$ . Para que desaparezca la velocidad se debe cumplir la ecuación  $w \times q = -v$ , en donde q representa el punto de giro. Así se obtiene para el punto de giro  $q = \omega \times v^\perp / \|\omega\|^2$  con  $v^\perp = v - (\omega v) \omega / \|\omega\|^2$ . En la fig. 8 se ilustra un campo vectorial del cuerpo 1 movido con el punto de giro C. La velocidad de traslación es  $v_x = 5$  y  $v_y = 1$  y la rotación  $w = 1$ .

En la fig. 9 se puede observar que los sensores individuales de aceleración lineal 2 para calcular el vector w y las coordenadas del punto de giro C están unidos con un dispositivo de evaluación 8. El dispositivo de evaluación presenta una memoria de datos 9 y un microprocesador 10 que a través de un sistema de bus no representado más detalladamente en el dibujo, está unido con la memoria de datos 9. En la memoria de datos 9 se guarda la matriz de magnitud característica  $\underline{A}^{-1}$ . Para calcular los componentes individuales del vector

$\vec{W} = (A_x, A_y, A_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z, \omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, \omega_x \omega_y, \omega_x \omega_z, \omega_y \omega_z)$ , el microprocesador 10 forma, en cada caso, el producto escalar a partir de los vectores celulares individuales de la matriz de magnitud característica  $A^{-1}$  y la señal de medición de aceleración medida con ayuda de los sensores de aceleración lineal 2  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots a_n)$ .

El vector  $\vec{W} = (A_x, A_y, A_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z, \omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, \omega_x \omega_y, \omega_x \omega_z, \omega_y \omega_z)$  y el punto de rotación C se proveen en forma de una señal de salida correspondiente en una salida de señal de medición 11.

5

Por lo tanto, en el procedimiento para determinar la ubicación relativa, la velocidad y la aceleración y/o el centro de giro de un cuerpo 1 movable en un espacio tridimensional se proveen al menos doce sensores de aceleración lineal 2 y se disponen, cada uno, en una posición de ubicación fija con respecto al cuerpo 1. Con ayuda de los sensores de aceleración lineal 2 se capta al menos una señal de medición de aceleración. A partir de la señal de medición de aceleración y magnitudes características que describen la ubicación y la orientación de los sensores de aceleración lineal 2 en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo se forma una señal de ubicación, de velocidad, de aceleración y/o de centro de giro para el cuerpo 1.

10

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo (1) movable en un espacio tridimensional, en donde se provee un número de n sensores de aceleración lineal (2) que tienen, cada uno, un eje de medición (3) sensible, en donde el número n es al menos doce, en donde los sensores individuales de aceleración lineal (2) están dispuestos, cada uno, en una posición  $P_i$  de ubicación fija en relación con el cuerpo (1)

que se puede describir a través de un vector de posición estacionario  $\vec{r}_i = \begin{pmatrix} r_{xi} \\ r_{yi} \\ r_{zi} \end{pmatrix}$ , que apunta desde un punto de

referencia (4) fijo en el cuerpo hacia la correspondiente posición  $P_i$ , en donde los sensores de aceleración lineal (2) se alinean de manera que su eje de medición (3) está orientado, en cada caso, en dirección de un vector de

dirección  $\vec{\Theta}_i = \begin{pmatrix} \Theta_{xi} \\ \Theta_{yi} \\ \Theta_{zi} \end{pmatrix}$ , en donde  $i \in [1, 2, 3, 4, \dots, n]$  indican, en cada caso, el correspondiente sensor de

- 10 aceleración lineal (2) y x, y, z, ejes de un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo que se extienden a través del punto de referencia (4), en donde los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  se seleccionan de manera que el rango de una matriz de doce columnas formada por los vectores columna

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1} \\ \Theta_{x2} \\ \Theta_{x3} \\ \Theta_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1} \\ \Theta_{y2} \\ \Theta_{y3} \\ \Theta_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_3 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1} \\ \Theta_{z2} \\ \Theta_{z3} \\ \Theta_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn} \end{pmatrix},$$

$$\vec{s}_4 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} - \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} - \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} - \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} - \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} - \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_5 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1}r_{z1} - \Theta_{z1}r_{x1} \\ \Theta_{x2}r_{z2} - \Theta_{z2}r_{x2} \\ \Theta_{x3}r_{z3} - \Theta_{z3}r_{x3} \\ \Theta_{x4}r_{z4} - \Theta_{z4}r_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn}r_{zn} - \Theta_{zn}r_{xn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_6 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} - \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} - \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} - \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} - \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} - \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix},$$

$$\vec{s}_7 = \begin{pmatrix} -\Theta_{y1}r_{y1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{y2}r_{y2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{y3}r_{y3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{y4}r_{y4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{yn}r_{yn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_8 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_9 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{y1}r_{y1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{y2}r_{y2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{y3}r_{y3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{y4}r_{y4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{yn}r_{yn} \end{pmatrix},$$

$$\bar{S}_{10} = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \quad \bar{S}_{11} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{zn} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \bar{S}_{12} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} + \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} + \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} + \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} + \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} + \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

es igual a doce, en donde con ayuda de los sensores de aceleración lineal (2) se capta al menos una señal de

medición de aceleración  $\bar{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$  y en donde a partir de la señal de medición de aceleración y magnitudes

características que describen la ubicación relativa y la orientación de los sensores de aceleración lineal (2) en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo se forma una señal de ubicación, de velocidad y/o de aceleración para el cuerpo (1).

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** después de disponer los sensores de aceleración lineal (2) en las posiciones  $P_i$  se realizan al menos cinco mediciones, en las que el cuerpo (1) en relación con un sistema de coordenadas fijo en la Tierra se acelera en diferentes direcciones conocidas linealmente y/o alrededor de al menos un centro de giro conocido, porque en cada medición se capta, en cada caso, una señal de

medición de aceleración  $\bar{a}_k = \begin{pmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \\ a_{3k} \\ a_{4k} \\ \vdots \\ a_{nk} \end{pmatrix}$  y porque a partir de las señales de medición de aceleración  $\vec{a}_k$  y las

direcciones y/o el al menos un centro de giro se determinan las magnitudes características para la ubicación y la orientación de los sensores de aceleración lineal (2).

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** a partir de la señal de velocidad se determina la ubicación relativa de un centro de giro alrededor del cual gira el cuerpo en el espacio.

4. Dispositivo para determinar la ubicación relativa, la velocidad y/o la aceleración de un cuerpo (1) movable en un espacio tridimensional, en donde el dispositivo para captar al menos una señal de medición de aceleración

$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$  presenta un número de n sensores de aceleración lineal (2) dispuestos en una ubicación fija con

respecto al cuerpo (1), en donde el número n es al menos doce, en donde las posiciones  $P_i$  en las que están dispuestos los sensores de aceleración lineal (2) se pueden describir, en cada caso, a través de un vector de

posición estacionario  $\vec{r}_i = \begin{pmatrix} r_{xi} \\ r_{yi} \\ r_{zi} \end{pmatrix}$  que apunta desde un punto de referencia (4) fijo en el cuerpo hacia la

correspondiente posición  $P_i$ , en donde los sensores de aceleración lineal (2) presentan, cada uno, un eje de

medición (3) sensible que está orientado en dirección de un vector de dirección  $\vec{\Theta}_i = \begin{pmatrix} \Theta_{x1} \\ \Theta_{y1} \\ \Theta_{z1} \end{pmatrix}$ , en donde  $i \in [1, 2, 3,$

4, ... n] indican, en cada caso, el correspondiente sensor de aceleración lineal (2) y x, y, z, ejes de un sistema de coordenadas fijo en el cuerpo que se extienden a través del punto de referencia (4), en donde los vectores de posición  $\vec{r}_i$  y los vectores de dirección  $\vec{\Theta}_i$  están seleccionados de manera que el rango de una matriz de doce columnas formada por los vectores columna

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1} \\ \Theta_{x2} \\ \Theta_{x3} \\ \Theta_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1} \\ \Theta_{y2} \\ \Theta_{y3} \\ \Theta_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_3 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1} \\ \Theta_{z2} \\ \Theta_{z3} \\ \Theta_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn} \end{pmatrix},$$

$$\vec{s}_4 = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} - \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} - \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} - \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} - \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} - \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_5 = \begin{pmatrix} \Theta_{x1}r_{z1} - \Theta_{z1}r_{x1} \\ \Theta_{x2}r_{z2} - \Theta_{z2}r_{x2} \\ \Theta_{x3}r_{z3} - \Theta_{z3}r_{x3} \\ \Theta_{x4}r_{z4} - \Theta_{z4}r_{x4} \\ \vdots \\ \Theta_{xn}r_{zn} - \Theta_{zn}r_{xn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_6 = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} - \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} - \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} - \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} - \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} - \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix},$$

$$\vec{s}_7 = \begin{pmatrix} -\Theta_{y1}r_{y1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{y2}r_{y2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{y3}r_{y3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{y4}r_{y4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{yn}r_{yn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_8 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{z1}r_{z1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{z2}r_{z2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{z3}r_{z3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{z4}r_{z4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{zn}r_{zn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_9 = \begin{pmatrix} -\Theta_{x1}r_{x1} - \Theta_{y1}r_{y1} \\ -\Theta_{x2}r_{x2} - \Theta_{y2}r_{y2} \\ -\Theta_{x3}r_{x3} - \Theta_{y3}r_{y3} \\ -\Theta_{x4}r_{x4} - \Theta_{y4}r_{y4} \\ \vdots \\ -\Theta_{xn}r_{xn} - \Theta_{yn}r_{yn} \end{pmatrix},$$

$$\vec{s}_{10} = \begin{pmatrix} \Theta_{y1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{y1} \\ \Theta_{y2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{y2} \\ \Theta_{y3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{y3} \\ \Theta_{y4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{y4} \\ \vdots \\ \Theta_{yn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{yn} \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_{11} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{x1} + \Theta_{x1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{x2} + \Theta_{x2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{x3} + \Theta_{x3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{x4} + \Theta_{x4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{xn} + \Theta_{xn}r_{zn} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \vec{s}_{12} = \begin{pmatrix} \Theta_{z1}r_{y1} + \Theta_{y1}r_{z1} \\ \Theta_{z2}r_{y2} + \Theta_{y2}r_{z2} \\ \Theta_{z3}r_{y3} + \Theta_{y3}r_{z3} \\ \Theta_{z4}r_{y4} + \Theta_{y4}r_{z4} \\ \vdots \\ \Theta_{zn}r_{yn} + \Theta_{yn}r_{zn} \end{pmatrix}$$

es igual a doce y en donde los sensores de aceleración lineal (2) están unidos con un dispositivo de evaluación (8) que está configurado para formar una señal de ubicación, de velocidad y/o de aceleración para el cuerpo (1) a partir de la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$  y magnitudes características que describen la ubicación relativa y la orientación de los sensores de aceleración lineal (2) en el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo.

5. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación presenta una memoria de datos (9) en la que está guardada al menos una señal de magnitud característica para un vector de línea de una matriz de magnitud característica que es inversa a una matriz de doce columnas que presenta los vectores columna  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \vec{s}_4, \vec{s}_5, \vec{s}_6, \vec{s}_7, \vec{s}_8, \vec{s}_9, \vec{s}_{10}, \vec{s}_{11}, \vec{s}_{12}$ .

6. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para la formación de al menos una primera señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$  y porque la al menos una

señal de magnitud característica está seleccionada de manera que la al menos una primera señal de producto escalar se corresponde con un componente vectorial de la aceleración de traslación del cuerpo (1).

7. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5 o 6, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para formar al menos una segunda señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$  y porque la al menos una señal de magnitud característica está seleccionada de tal manera que la segunda señal de producto escalar se corresponde con un componente vectorial de la aceleración angular del cuerpo (1).
8. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 5 a 7, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para eventualmente integrar por duplicado la al menos una segunda señal de producto escalar.
9. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5 a 8, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para formar al menos una tercera señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$ , porque la al menos una señal de magnitud característica está seleccionada de manera que la tercera señal de producto escalar se corresponde con el cuadrado de un componente vectorial de la velocidad angular del cuerpo (1) y porque el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para formar una señal de raíz cuadrada a partir de la señal de producto escalar.
10. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 5 a 9, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para formar al menos una cuarta señal de producto escalar correspondiente al producto escalar de la al menos una señal de magnitud característica y la señal de medición de aceleración  $\vec{a}$ , porque la al menos una señal de magnitud característica está seleccionada de manera que la cuarta señal de producto escalar se corresponde con el producto de dos componentes vectoriales diferentes de la velocidad angular del cuerpo (1), porque el dispositivo de evaluación (8) presenta medios para integrar las segundas señales de producto escalar determinadas, en cada caso, para el componente vectorial correspondiente y para formar al menos una señal de producto a partir de los resultados de estas integraciones, porque el dispositivo de evaluación (8) presenta un dispositivo de comparación para comparar el valor de esta señal de producto con la cuarta señal de producto escalar y porque el dispositivo de comparación tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación.
11. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5 a 10, **caracterizado porque** el dispositivo de comparación está configurado para comparar la señal de raíz cuadrada con la señal formada a través de la integración de la al menos una segunda señal de producto escalar y porque el dispositivo de comparación tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación.
12. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5 a 11, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación presenta medios para la integración de la segunda señal de producto escalar y para formar el cuadrado a partir del resultado de esta integración, porque estos medios para comparar la señal así obtenida con la tercera señal de producto escalar están unidos con el dispositivo de comparación y porque el dispositivo de comparación tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación.
13. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5 a 12, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación para diferenciar la señal de raíz cuadrada presenta un dispositivo de diferenciación, porque el dispositivo de diferenciación para comparar la señal diferenciada con la segunda señal de producto escalar está unido con el dispositivo de comparación y porque el dispositivo de comparación tiene una salida para una señal de estado de error que depende del resultado de la comparación.
14. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 4 a 12, **caracterizado porque** el dispositivo de evaluación (8) está configurado de manera que durante un movimiento de giro del cuerpo alrededor de un centro de giro determina a partir de la señal de velocidad una señal para la ubicación relativa de un centro de giro.
15. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 4 a 14, **caracterizado porque** comprende el cuerpo (1) y porque el cuerpo (1) es un vehículo a motor.

$$\begin{pmatrix} a_{PS\_1} \\ a_{PS\_2} \\ a_{PS\_3} \\ a_{PS\_4} \\ a_{PS\_5} \\ a_{PS\_6} \\ a_{PS\_7} \\ a_{PS\_8} \\ a_{PS\_9} \\ a_{PS\_10} \\ a_{PS\_11} \\ a_{PS\_12} \end{pmatrix} = \vec{F} + \vec{G}$$

Fig. 1a

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} \theta_{x1} & \theta_{y1} & \theta_{z1} & \theta_{z1}'y1 - \theta_{y1}'z1 & -\theta_{z1}'x1 + \theta_{x1}'z1 & \theta_{y1}'x1 - \theta_{x1}'y1 \\ \theta_{x2} & \theta_{y2} & \theta_{z2} & \theta_{z2}'y2 - \theta_{y2}'z2 & -\theta_{z2}'x2 + \theta_{x2}'z2 & \theta_{y2}'x2 - \theta_{x2}'y2 \\ \theta_{x3} & \theta_{y3} & \theta_{z3} & \theta_{z3}'y3 - \theta_{y3}'z3 & -\theta_{z3}'x3 + \theta_{x3}'z3 & \theta_{y3}'x3 - \theta_{x3}'y3 \\ \theta_{x4} & \theta_{y4} & \theta_{z4} & \theta_{z4}'y4 - \theta_{y4}'z4 & -\theta_{z4}'x4 + \theta_{x4}'z4 & \theta_{y4}'x4 - \theta_{x4}'y4 \\ \theta_{x5} & \theta_{y5} & \theta_{z5} & \theta_{z5}'y5 - \theta_{y5}'z5 & -\theta_{z5}'x5 + \theta_{x5}'z5 & \theta_{y5}'x5 - \theta_{x5}'y5 \\ \theta_{x6} & \theta_{y6} & \theta_{z6} & \theta_{z6}'y6 - \theta_{y6}'z6 & -\theta_{z6}'x6 + \theta_{x6}'z6 & \theta_{y6}'x6 - \theta_{x6}'y6 \\ \theta_{x7} & \theta_{y7} & \theta_{z7} & \theta_{z7}'y7 - \theta_{y7}'z7 & -\theta_{z7}'x7 + \theta_{x7}'z7 & \theta_{y7}'x7 - \theta_{x7}'y7 \\ \theta_{x8} & \theta_{y8} & \theta_{z8} & \theta_{z8}'y8 - \theta_{y8}'z8 & -\theta_{z8}'x8 + \theta_{x8}'z8 & \theta_{y8}'x8 - \theta_{x8}'y8 \\ \theta_{x9} & \theta_{y9} & \theta_{z9} & \theta_{z9}'y9 - \theta_{y9}'z9 & -\theta_{z9}'x9 + \theta_{x9}'z9 & \theta_{y9}'x9 - \theta_{x9}'y9 \\ \theta_{x10} & \theta_{y10} & \theta_{z10} & \theta_{z10}'y10 - \theta_{y10}'z10 & -\theta_{z10}'x10 + \theta_{x10}'z10 & \theta_{y10}'x10 - \theta_{x10}'y10 \\ \theta_{x11} & \theta_{y11} & \theta_{z11} & \theta_{z11}'y11 - \theta_{y11}'z11 & -\theta_{z11}'x11 + \theta_{x11}'z11 & \theta_{y11}'x11 - \theta_{x11}'y11 \\ \theta_{x12} & \theta_{y12} & \theta_{z12} & \theta_{z12}'y12 - \theta_{y12}'z12 & -\theta_{z12}'x12 + \theta_{x12}'z12 & \theta_{y12}'x12 - \theta_{x12}'y12 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} +$$

Fig. 1b



$$\vec{G} = \begin{pmatrix} -\theta_{y1'y1} - \theta_{z1'z1} & -\theta_{x1'x1} - \theta_{z1'z1} & -\theta_{x1'x1} - \theta_{y1'y1} & \theta_{y1'y1} + \theta_{x1'x1} & \theta_{z1'z1} + \theta_{x1'x1} & \theta_{z1'y1} + \theta_{y1'z1} \\ -\theta_{y2'y2} - \theta_{z2'z2} & -\theta_{x2'x2} - \theta_{z2'z2} & -\theta_{x2'x2} - \theta_{y2'y2} & \theta_{y2'y2} + \theta_{x2'x2} & \theta_{z2'y2} + \theta_{y2'z2} & \theta_{z2'y2} + \theta_{y2'z2} \\ -\theta_{y3'y3} - \theta_{z3'z3} & -\theta_{x3'x3} - \theta_{z3'z3} & -\theta_{x3'x3} - \theta_{y3'y3} & \theta_{y3'y3} + \theta_{x3'x3} & \theta_{z3'y3} + \theta_{y3'z3} & \theta_{z3'y3} + \theta_{y3'z3} \\ -\theta_{y4'y4} - \theta_{z4'z4} & -\theta_{x4'x4} - \theta_{z4'z4} & -\theta_{x4'x4} - \theta_{y4'y4} & \theta_{y4'y4} + \theta_{x4'x4} & \theta_{z4'y4} + \theta_{y4'z4} & \theta_{z4'y4} + \theta_{y4'z4} \\ -\theta_{y5'y5} - \theta_{z5'z5} & -\theta_{x5'x5} - \theta_{z5'z5} & -\theta_{x5'x5} - \theta_{y5'y5} & \theta_{y5'y5} + \theta_{x5'x5} & \theta_{z5'y5} + \theta_{y5'z5} & \theta_{z5'y5} + \theta_{y5'z5} \\ -\theta_{y6'y6} - \theta_{z6'z6} & -\theta_{x6'x6} - \theta_{z6'z6} & -\theta_{x6'x6} - \theta_{y6'y6} & \theta_{y6'y6} + \theta_{x6'x6} & \theta_{z6'y6} + \theta_{y6'z6} & \theta_{z6'y6} + \theta_{y6'z6} \\ -\theta_{y7'y7} - \theta_{z7'z7} & -\theta_{x7'x7} - \theta_{z7'z7} & -\theta_{x7'x7} - \theta_{y7'y7} & \theta_{y7'y7} + \theta_{x7'x7} & \theta_{z7'y7} + \theta_{y7'z7} & \theta_{z7'y7} + \theta_{y7'z7} \\ -\theta_{y8'y8} - \theta_{z8'z8} & -\theta_{x8'x8} - \theta_{z8'z8} & -\theta_{x8'x8} - \theta_{y8'y8} & \theta_{y8'y8} + \theta_{x8'x8} & \theta_{z8'y8} + \theta_{y8'z8} & \theta_{z8'y8} + \theta_{y8'z8} \\ -\theta_{y9'y9} - \theta_{z9'z9} & -\theta_{x9'x9} - \theta_{z9'z9} & -\theta_{x9'x9} - \theta_{y9'y9} & \theta_{y9'y9} + \theta_{x9'x9} & \theta_{z9'y9} + \theta_{y9'z9} & \theta_{z9'y9} + \theta_{y9'z9} \\ -\theta_{y10'y10} - \theta_{z10'z10} & -\theta_{x10'x10} - \theta_{z10'z10} & -\theta_{x10'x10} - \theta_{y10'y10} & \theta_{y10'y10} + \theta_{x10'x10} & \theta_{z10'y10} + \theta_{y10'z10} & \theta_{z10'y10} + \theta_{y10'z10} \\ -\theta_{y11'y11} - \theta_{z11'z11} & -\theta_{x11'x11} - \theta_{z11'z11} & -\theta_{x11'x11} - \theta_{y11'y11} & \theta_{y11'y11} + \theta_{x11'x11} & \theta_{z11'y11} + \theta_{y11'z11} & \theta_{z11'y11} + \theta_{y11'z11} \\ -\theta_{y12'y12} - \theta_{z12'z12} & -\theta_{x12'x12} - \theta_{z12'z12} & -\theta_{x12'x12} - \theta_{y12'y12} & \theta_{y12'y12} + \theta_{x12'x12} & \theta_{z12'y12} + \theta_{y12'z12} & \theta_{z12'y12} + \theta_{y12'z12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_x \omega_z \\ \omega_y \omega_z \end{pmatrix}$$

Fig. 1c

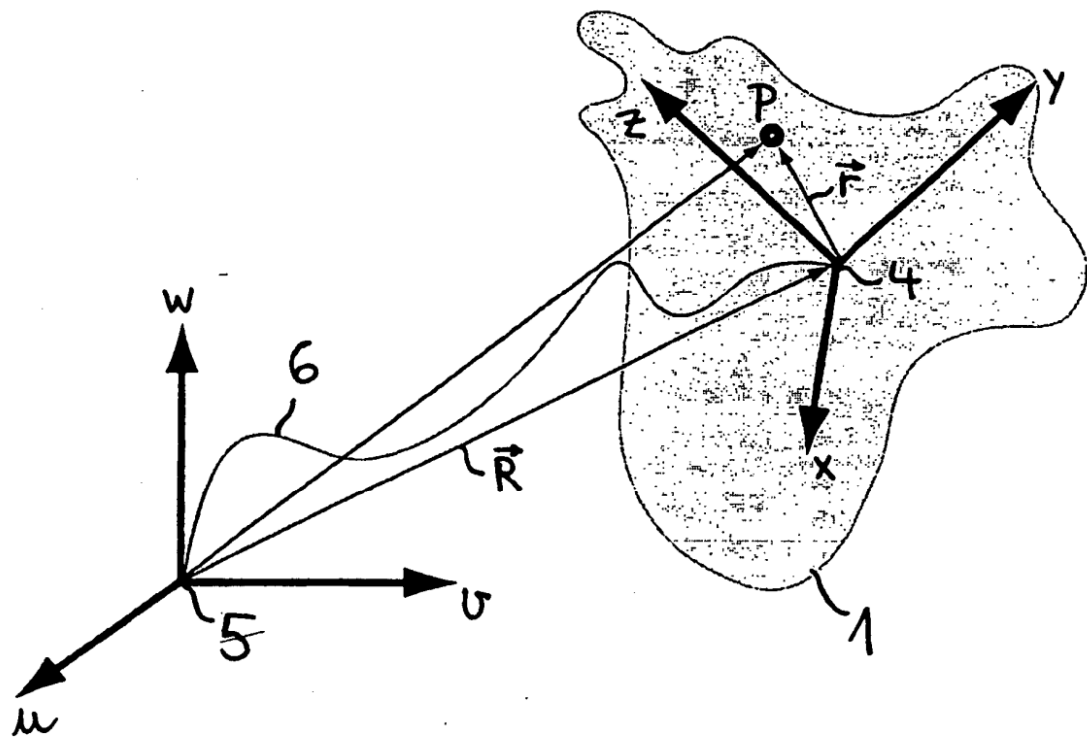


Fig. 2

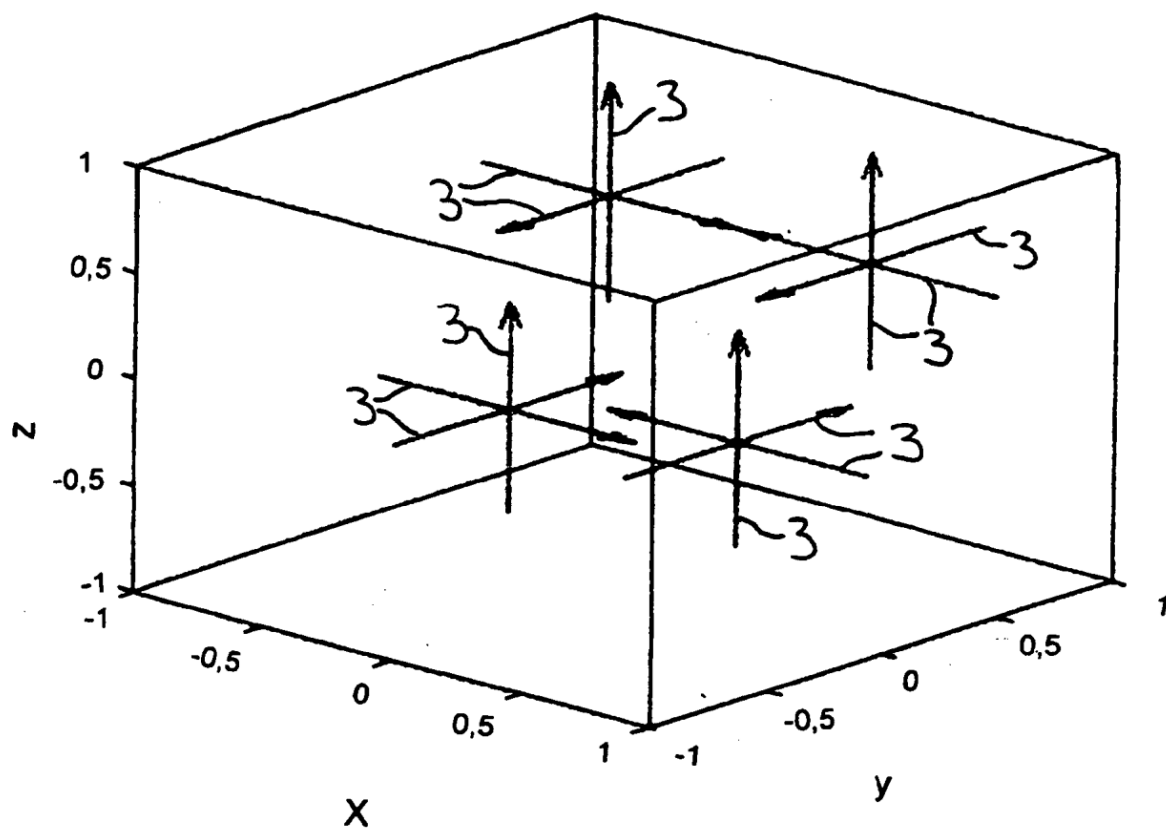


Fig. 3

| i            | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7   | 8   | 9   | 10   | 11   | 12   |
|--------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| $r_{xi}$ [m] | 0    | 0    | 0    | -0,5 | -0,5 | -0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0    | 0    | 0    |
| $r_{yi}$ [m] | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5 | 0,5 | 0,5 | -0,5 | -0,5 | -0,5 |
| $r_{zi}$ [m] | -0,5 | -0,5 | -0,5 | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0    | 0    | 0    |

Fig. 4

| i                 | 1  | 2 | 3 | 4  | 5 | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|-------------------|----|---|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| $\Theta_{xi}$ [-] | -1 | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 0  | -1 | 0  | 0  | 0  | 1  |
| $\Theta_{yi}$ [-] | 0  | 1 | 0 | 0  | 0 | -1 | 0  | 0  | -1 | 0  | 1  | 0  |
| $\Theta_{zi}$ [-] | 0  | 0 | 1 | -1 | 0 | 0  | -1 | 0  | 0  | -1 | 0  | 0  |

Fig. 5

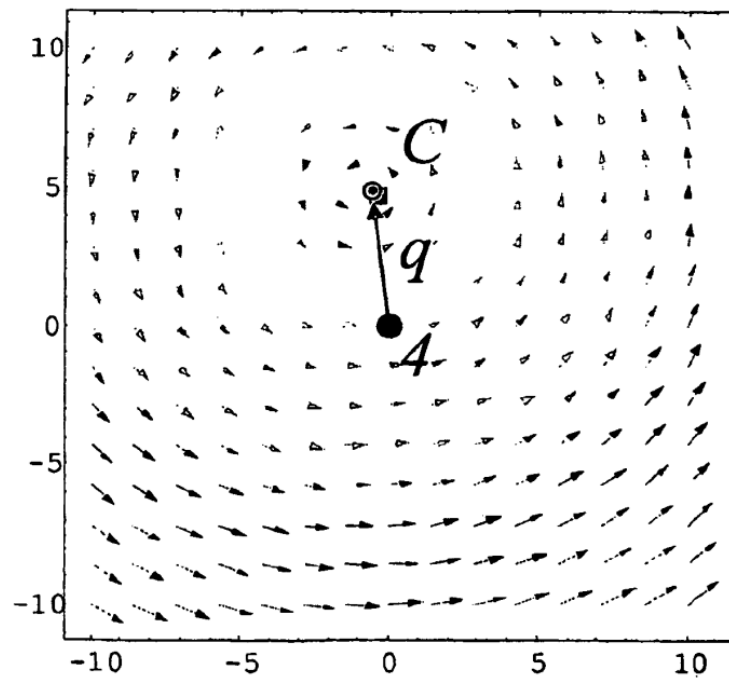


Fig. 8

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & -0,5 \\ 0 & 0 & 1 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & -1 & -0,5 & -0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & -0,5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 \\ 0 & 0 & -1 & -0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & -0,5 & -0,5 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & -0,5 & 0 & -0,5 \\ 0 & 0 & -1 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Fig. 6

$$\begin{pmatrix} -0,25 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 & -0,125 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & -0,125 & 0 & 0 & -0,125 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0,25 & -0,125 & 0 & 0 & -0,125 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,25 & -0,125 & 0 & 0,25 & -0,125 & 0 & 0,25 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0 & -0,5 & 0,25 & 0 & 0,5 & -0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0 & 0 & 0 & -0,125 & 0,5 & 0 & 0,125 & -0,5 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & -0,25 & 0,5 & 0,25 & -0,5 & 0,125 & 0,25 & -0,5 & 0,125 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0,25 & 0,5 & 0,25 & 0,5 & -0,125 & 0,25 & 0,5 & -0,125 & 0 & -0,5 & 0 \\ 0 & -0,25 & -0,5 & -0,25 & 0,5 & 0,125 & -0,25 & 0,5 & 0,125 & 0 & 0,5 & 0 \\ -0,25 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0,5 & 0 & -0,125 & -0,5 & 0 & 0 & -0,5 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & 0,25 & 0 & -0,5 & -0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,5 & 0,25 & -0,125 & 0 & -0,25 & -0,125 & 0 & -0,25 & 0,5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Fig. 7

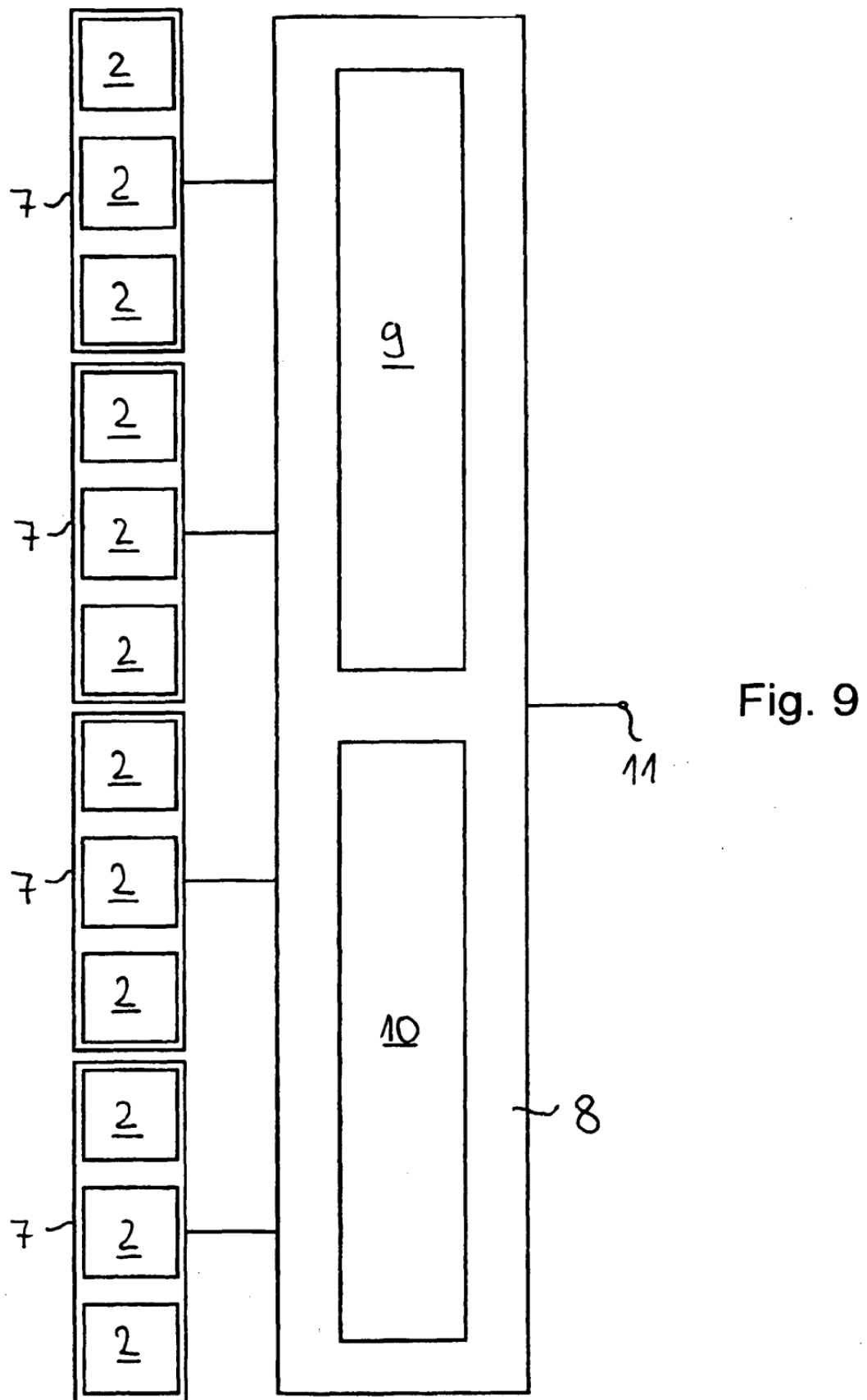


Fig. 9