

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 824 873**

21 Número de solicitud: 201930991

51 Int. Cl.:

G01S 17/42 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

13.11.2019

43 Fecha de publicación de la solicitud:

13.05.2021

71 Solicitantes:

**FUNDACIÓN TEKNIKER (100.0%)
Polo Tecnológico de Eibar, C/ Iñaki Goeneaga 5
20600 Eibar (Gipuzkoa) ES**

72 Inventor/es:

**OLARRA URBERUAGA, Aitor;
KORTABERRIA BERRIOZABAL, Gorka;
CHEKH OUMAR, Brahim Ahmed y
DELGADO CASTRILLO, Andoni**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

54 Título: **MÉTODO Y SISTEMA PARA EL SEGUIMIENTO ESPACIAL DE OBJETOS**

57 Resumen:

Método y sistema para el seguimiento espacial de objetos

Un método para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad (T_x , T_y , T_z , Φ , θ , Ψ), que comprende: unir un artefacto (60) al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación (T_x , T_y , T_z , Φ , θ , Ψ), en donde dicho artefacto (60) comprende una superficie especular (55) y un conjunto de N puntos de referencia (71), en donde cada punto de referencia es definido por una posición (X_i , Y_i , Z_i) en un sistema de coordenadas definido en el artefacto (60); colocar una cámara (40) orientada hacia el artefacto (60) que está unido al objeto; medir los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular (55) y, por lo tanto, del objeto, siendo realizada dicha medición mediante la aplicación de una técnica de autocolimación; capturar una imagen del conjunto de puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i)) que está comprendido en el artefacto (60), obteniendo de este modo en el plano (61) del sensor (42) de la cámara unos puntos de imagen observados (72; (x'_i, y'_i)) que se corresponden con dichos puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i)); obtener el ángulo de giro o balanceo Φ del objeto y un vector de traslación (T_x , T_y , T_z) entre la cámara (40) y el objeto, usando dichos puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i)) y dichos puntos de imagen observados (72; (x'_i, y'_i)) que se obtienen en el sensor (42) de la cámara, mediante la aplicación de un algoritmo de resección espacial restringido por los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ medidos, en donde (T_x , T_y , T_z , Φ , θ , Ψ) representan la posición y la orientación relativas entre la cámara (40) y el objeto.

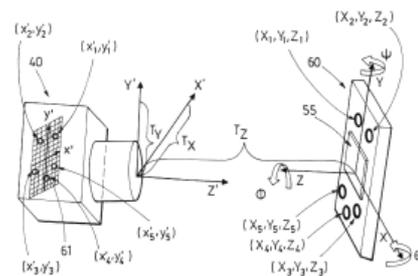


FIG. 7B

ES 2 824 873 A1

DESCRIPCIÓN

MÉTODO Y SISTEMA PARA EL SEGUIMIENTO ESPACIAL DE OBJETOS

CAMPO TÉCNICO

La presente invención se refiere al campo del seguimiento espacial de
5 objetos. En particular, esta se refiere a técnicas de medición sin contacto para
mejorar la precisión que se puede lograr en el seguimiento espacial de objetos
por medio de un procedimiento de resección espacial.

ESTADO DE LA TÉCNICA

En la actualidad, hay diferentes tecnologías y métodos de medición para
10 el seguimiento espacial sin contacto de objetos. Una de estas técnicas se
denomina fotogrametría, que se basa en la extracción de mediciones
tridimensionales a partir de datos bidimensionales (es decir, imágenes). Por lo
general, la fotogrametría usa el método de resección espacial para obtener la
orientación exterior de una única imagen. En la resección espacial, la posición
15 espacial y la orientación de una cámara se determina basándose en la
proyección central de la cámara y el modelado de la distorsión óptica debido a
los errores de forma de lente. El modelo de cámara estenopeica (en inglés,
pinhole camera) representa la definición matemática de rendimiento luminoso a
través de una lente de cámara entre el mundo en 3D (el espacio del objeto) y
20 una imagen en 2D (el plano de sensor). Esto se esquematiza en la figura 1, que
representa cómo obtener la posición y la orientación de un objeto 11 usando
una única cámara 10 mediante la aplicación del método de resección espacial.
La siguiente ecuación describe la transformación rígida entre el sistema de
coordenadas de la cámara y el sistema de coordenadas del objeto:

$$\begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\theta\Psi\Phi} & d_{TxTyTz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$$

en donde $\begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix}$ indica la posición espacial de la cámara 10, $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$ indica la posición espacial del objeto 11 y la matriz representa la rotación y el desplazamiento relativos desde el objeto 11 a la cámara 10. Tal como se muestra en la figura 1, θ representa el ángulo de elevación (también referido como ángulo de cabeceo o inclinación) (en inglés, pitch angle) relativo del objeto 11, Ψ representa el ángulo de desviación (también referido como ángulo de viraje) (en inglés, yaw angle) relativo del objeto 11, Φ representa el ángulo de giro (también referido como ángulo de balanceo) (en inglés, roll angle) relativo del objeto 11 y d_{TxTyTz} representa la traslación relativa T_x , T_y y T_z . En esencia, el método de resección espacial reduce al mínimo de forma iterativa la distancia plana entre los puntos de imagen observados y los que teóricamente son proyectados con el fin de determinar la posición y la orientación de la cámara 10 con 6 grados de libertad (GDL, en inglés, DOF) que se ajustan mejor a los puntos correspondientes. Se han de marcar al menos tres puntos de referencia sobre el objeto. En la figura 1, seis círculos representados sobre el objeto 11 representan unos puntos de referencia de objeto correspondientes. Cada círculo tiene una coordenada X_i , Y_i , Z_i .

No obstante, las configuraciones fotogramétricas que usan técnicas de resección espacial pueden tener limitaciones de precisión cuando se estiman los parámetros de orientación externos de una cámara con 6 GDL debido a la correlación alta entre los parámetros de orientación y de traslación de la cámara. A pesar de que, con unas configuraciones convenientes de la posición de cámara, el tamaño de objeto y el sistema de referencia (que se ha de haber

establecido previamente), se pueden lograr unas precisiones de aproximadamente 1 : 10000 del volumen de medición, son críticas las traslaciones en el eje Z y las rotaciones en torno a los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de viraje Ψ . Esto se muestra en la figura 2. La figura 2 (parte superior) representa un ejemplo de correlación baja entre los parámetros de orientación y de traslación de una cámara. La figura 2 (parte inferior) representa un ejemplo de correlación alta entre los parámetros de orientación y de traslación de una cámara. En la figura 2 (parte superior), la distribución objetivo de puntos de referencia (cómo se distribuyen los puntos de referencia sobre el objeto) genera una imagen diferente después de una traslación de cámara y una imagen diferente después de una rotación de cámara. No obstante, en la figura 2 (parte inferior) la distribución objetivo genera unas imágenes casi idénticas después de la traslación de cámara y la rotación de cámara. Como consecuencia, en el segundo escenario (parte inferior) no es posible una diferenciación precisa entre las rotaciones en torno a los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de viraje Ψ y las traslaciones T_x y T_y .

Otra técnica bien conocida de medición de ángulos es la autocolimación. La autocolimación es una configuración óptica en la que un haz colimado de rayos de luz paralelos sale de un sistema óptico y es reflejado de vuelta al mismo sistema por un espejo plano. La autocolimación se usa para medir ángulos de inclinación pequeños del espejo con una precisión alta. No obstante, la mayor parte de las técnicas de autocolimación presentan una limitación para estimar el ángulo de giro o balanceo de un espejo. Dicho de otra forma, la mayor parte de los dispositivos de autocolimación existentes son capaces de medir solo dos ángulos de inclinación (la inclinación o cabeceo y el

viraje) de un espejo. Recientemente se han desarrollado nuevos autocolimadores, que tienen una determinada capacidad de medir un ángulo de rotación en torno al eje normal del espejo basándose en una lente especial. Este es el caso, por ejemplo, de TriAngle®3D, de la empresa TRIOPTICS. No obstante, la precisión de la medición del ángulo de giro o balanceo (el ángulo de rotación) se reduce de forma significativa en comparación con la precisión de la medición de los ángulos de cabeceo o inclinación y de viraje.

Por lo tanto, existe la necesidad de un método y sistema para el seguimiento espacial y/o la supervisión precisos de un objeto, que mejore la precisión en los 6 GDL.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

El método y sistema descritos en la presente invención tienen por objeto solucionar los inconvenientes de la técnica anterior. En la presente invención, se combinan dos técnicas de medición sin contacto con el fin de mejorar la precisión que se puede lograr en la supervisión o seguimiento espacial de objetos. Las dos técnicas son (a) la fotogrametría, que se aplica con una única cámara, y (b) la autocolimación, que se emplea para la estimación de los ángulos de inclinación absolutos de una superficie especular que, con una transformación calibrada, representa los ángulos de cabeceo (inclinación) y de viraje del objeto al que se está realizando un seguimiento. En lo que respecta a la fotogrametría, el problema de la orientación y la traslación exterior de una cámara mediante una imagen única se aborda aplicando la técnica de resección espacial. En lo que respecta a la autocolimación, la orientación de la cámara (los ángulos de cabeceo (inclinación) y de viraje) se obtiene con respecto al sistema de coordenadas del objeto que se construye a partir de un

conjunto de objetivos (targets). De esta forma, la técnica de resección espacial se restringe con los valores de orientación obtenidos (los ángulos de cabeceo (inclinación) y de viraje) y los parámetros restantes (T_x T_y T_z y el ángulo de giro o balanceo Φ) se pueden estimar con una precisión más alta y una correlación
 5 más baja entre los mismos. Por lo tanto, estos se estiman con una incertidumbre mejor (más baja). Dicho de otra forma, se aplica una resección espacial restringida en lugar de una resección espacial convencional.

Un primer aspecto de la invención se refiere a un método para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad, que comprende:
 10 unir un artefacto al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación, en donde el artefacto comprende una superficie especular y un conjunto de N puntos de referencia, en donde cada punto de referencia es definido por una posición X_i , Y_i , Z_i en un sistema de coordenadas definido en el artefacto, en donde $1 < i < N$ y $N > 2$;

15 colocar una cámara orientada hacia el artefacto que está unido al objeto;
 medir los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular y, por lo tanto, del objeto, siendo realizada dicha medición mediante la aplicación de una técnica de autocolimación;

20 capturar una imagen del conjunto de puntos de referencia comprendido en el artefacto que está unido al objeto, obteniendo de este modo, en el plano del sensor de la cámara, unos puntos de imagen observados que se corresponden con dichos puntos de referencia;

25 obtener el ángulo de giro o balanceo Φ del objeto y un vector de traslación (T_x , T_y , T_z) entre la cámara y el objeto, usando dichos puntos de referencia y

dichos puntos de imagen observados que se obtienen en el sensor de la cámara, mediante la aplicación de un algoritmo de resección espacial restringido por los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ medidos, en donde T_x , T_y , T_z , Φ , θ , Ψ representan la
 5 posición y la orientación relativas entre la cámara y el objeto.

En realizaciones de la invención, los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular y, por lo tanto, del objeto, se miden tal como sigue aplicando una técnica de autocolimación:

10 emitir un haz de luz no colimado a partir de una fuente de luz que está dispuesta en la cámara;

redirigir el haz de luz emitido mediante un divisor de haz, produciendo haces de luz no colimados;

15 colimar dichos haces de luz mediante una lente de la cámara, produciendo de este modo unos haces de luz colimados;

dirigir dichos haces colimados hacia el espejo plano, en el que se reflejan los mismos, proporcionando de este modo unos haces de luz colimados reflejados;

20 enfocar dichos haces colimados reflejados en la lente de la cámara, proporcionando de este modo unos haces de luz reflejados enfocados al sensor de la cámara, siendo enfocados dichos haces de luz reflejados enfocados en una posición sobre el plano del sensor de la cámara;

calcular los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ tal como sigue:

$$\theta = \delta x' / 2f$$

$$\Psi = \delta y' / 2f$$

en donde f es la distancia focal de la cámara y $\delta x'$, $\delta y'$ representan un desplazamiento plano entre la posición medida y una posición de referencia fija sobre el plano del sensor de la cámara, representando esta referencia fija la posición (x', y') en el plano del sensor en donde los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ son iguales a 0.

En realizaciones de la invención, dicho ángulo de giro o balanceo Φ y dicho vector de traslación entre la cámara y el objeto, se obtienen mediante la implementación de una técnica de resección espacial, restringida por los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ ya obtenidos, solucionando de forma iterativa el siguiente problema de optimización:

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{Bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \end{Bmatrix} \right)^2 = 0$$

en donde N es el número de los puntos de imagen observados; (x'_i, y'_i) son los puntos de imagen observados; y (x'_{Ei}, y'_{Ei}) son los puntos de imagen estimados.

En realizaciones de la invención, los puntos de imagen estimados (x'_{Ei}, y'_{Ei}) se obtienen mediante la aplicación de un modelo de cámara estenopeica (pinhole camera) que representa la proyección (x'_{Ei}, y'_{Ei}) de cada punto de referencia en 3D sobre el plano de imagen del sensor de la cámara:

$$\begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{Bmatrix} = [A] \cdot \lambda \cdot R(\theta)R(\psi)R(\Phi) \cdot \begin{Bmatrix} X_i - T_x \\ Y_i - T_y \\ Z_i - T_z \end{Bmatrix}$$

en donde:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ 0 & -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\text{sen}(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

$$R(\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & \text{sen}(\Phi) & 0 \\ -\text{sen}(\Phi) & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

que se puede simplificar como:

$$R(\theta)R(\psi)R(\Phi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

y en donde: $A = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ es la matriz intrínseca de la cámara

y en donde λ es un factor de escala.

- 5 En realizaciones de la invención, los puntos de imagen estimados (x'_{Ei} , y'_{Ei} , 0) se calculan tal como sigue mediante la aplicación de la ecuación de proyección central en visión por computador:

$$\begin{pmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -T_z \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}$$

- 10 En realizaciones de la invención, los puntos de imagen estimados (x'_{Ei} , y'_{Ei} , 0) se calculan tal como sigue mediante la aplicación de ecuaciones de colinealidad:

$$x'_{Ei} = c_x - f \cdot \frac{r_{11}(X_i - T_x) + r_{21}(Y_i - T_y) + r_{31}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)}$$

$$y'_{Ei} = c_y - f \cdot \frac{r_{12}(X_i - T_x) + r_{22}(Y_i - T_y) + r_{32}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)}$$

- 15 En realizaciones de la invención, antes de aplicar una técnica de autocolimación para medir los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ y de capturar, con la cámara, una imagen del artefacto que está unido al objeto, se establece una relación geométrica entre el plano de la superficie especular y un sistema de coordenadas formado por el conjunto de puntos de referencia.

En realizaciones de la invención, el artefacto se ha medido en una Máquina de Medición de Coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés) con el fin de establecer dicha relación geométrica.

El método propuesto se puede implementar o bien en un único dispositivo que abarque tanto la funcionalidad de una cámara como de un autocolimador; o bien en dos dispositivos separados - una cámara y un autocolimador - que trabajan de forma conjunta.

Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad, que comprende:

unos medios para tomar mediciones de fotogrametría;

unos medios para llevar a cabo una autocolimación; y

un artefacto que está unido al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación, en donde dicho artefacto comprende una superficie especular y un conjunto de N puntos de referencia, en donde cada punto de referencia es definido por una posición en un sistema de coordenadas definido en el artefacto, en donde $1 < i < N$ y $N > 2$;

en donde los medios para llevar a cabo una autocolimación se configuran para medir los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular y, por lo tanto, del objeto;

en donde los medios para tomar mediciones de fotogrametría se configuran para:

capturar una imagen del conjunto de puntos de referencia comprendido en el artefacto que está unido al objeto, obteniendo de este modo unos puntos

de imagen observados que se corresponden con dichos puntos de referencia; y
obtener el ángulo de giro o balanceo Φ del objeto y un vector de traslación
(T_x , T_y , T_z) entre los medios para tomar mediciones de fotogrametría y el
objeto, usando dichos puntos de referencia y dichos puntos de imagen
5 observados, mediante la aplicación de un algoritmo de resección espacial
restringido por los ángulos de elevación, cabeceo o inclinación θ y de
desviación o viraje Ψ medidos.

En realizaciones de la invención, los medios para tomar mediciones
fotogramétricas y los medios para llevar a cabo una autocolimación están
10 comprendidos en una cámara.

En realizaciones de la invención, los medios para tomar mediciones
fotogramétricas están comprendidos en una cámara y los medios para llevar a
cabo una autocolimación están comprendidos en un autocolimador.

En realizaciones de la invención, los N puntos de referencia representan
15 un patrón de tablero de ajedrez, o un patrón circular, o un patrón cuadrado, o
un patrón en forma de cruz o siguen marcadores especiales.

En realizaciones de la invención, la superficie especular es un espejo
plano o cualquier superficie plana o semiplana capaz de producir una reflexión
especular de la luz.

20 En realizaciones de la invención, el sistema comprende adicionalmente
unos medios de montaje para montar una pluralidad de medios de medición
para medir la ubicación espacial y la orientación del espejo.

El dispositivo se puede materializar en al menos dos configuraciones
diferentes. En una primera realización, un único dispositivo integra las dos
25 tecnologías (cámara y autocolimador). En este caso, el dispositivo, tal como

una cámara, está compuesto por una fuente de luz - tal como una fuente de LED - y un divisor de haz. La fuente de luz y el divisor de haz se pueden montar sobre la cámara. Por lo tanto, simplemente al modificar los parámetros de adquisición de la cámara, la cámara puede actuar como un autocolimador.

- 5 En una segunda realización, el dispositivo está compuesto por una única cámara y un autocolimador en 2D separado. Esta configuración requiere una fase previa de calibración extrínseca, para recopilar datos independientes y obtener datos de salida con respecto a un mismo sistema de referencia.

Un tercer aspecto de la invención se refiere a un producto de programa informático que comprende instrucciones / código de programa informático para llevar a cabo el método divulgado.

Un cuarto aspecto de la invención se refiere a una memoria / soporte legible por ordenador que almacena instrucciones / código de programa para llevar a cabo el método divulgado.

- 15 La combinación de una cámara configurada para fotogrametría y de un autocolimador, o bien en un único dispositivo o bien en dos dispositivos separados, proporciona las siguientes ventajas: (a) Potencia la precisión de las mediciones que se pueden obtener como consecuencia de la reducción en la incertidumbre para identificar cuatro parámetros de cámara (la orientación - el giro o balanceo- y T_x T_y T_z) usando técnicas de resección espacial, gracias a su vez a la restricción de los parámetros de orientación – el cabeceo o inclinación y el viraje - mediante el autocolimador. (b) Aumenta el número de GDL en las mediciones con respecto a los autocolimadores existentes, mediante la adición de los GDL necesarios mediante las técnicas de resección espacial. (c) Potencia el rendimiento y la aplicabilidad de las técnicas de
- 20
- 25

resección espacial a las demandas de precisión alta y la aplicación gracias a la introducción de la restricción de ángulo (cabeceo o inclinación y viraje).

Algunas ventajas y características adicionales de la invención se harán evidentes a partir de la descripción en detalle que sigue y serán señaladas en particular en las reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para completar la descripción y con el fin de prever una mejor comprensión de la invención, se proporciona un conjunto de dibujos. Dichos dibujos forman una parte integrante de la descripción e ilustran una realización de la invención, lo que no se debería interpretar como que restringe el alcance de la invención, sino simplemente como un ejemplo de cómo se puede llevar a cabo la invención. Los dibujos comprenden las siguientes figuras:

La figura 1 representa la técnica de resección espacial, que es una técnica bien conocida para determinar la posición espacial y la orientación de una cámara basándose en la proyección central de la cámara.

La figura 2 muestra unas configuraciones fotogramétricas a modo de ejemplo con correlación diferente entre la traslación y la rotación de una cámara.

Las figuras 3(a) y 3(b) muestran unas vistas laterales de una cámara que se usa en realizaciones de la presente invención. Parte de la carcasa externa se ha retirado para mostrar la parte interior de la cámara. La figura 3(c) muestra una vista en despiece ordenado de la cámara que se muestra en las figuras 3(a) y 3(b).

La figura 4 muestra un artefacto de medición que se ha de unir a un objeto para llevar a cabo mediciones de seguimiento de 6 GDL, de acuerdo con

realizaciones de la presente invención. El artefacto incluye una superficie especular y un conjunto de puntos de referencia.

La figura 5 muestra un esquema de acuerdo con realizaciones de la invención, en el que se toman mediciones de autocolimación con la cámara de las figuras 3(a) - (c) y el artefacto de medición de la figura 4.

La figura 6 muestra componentes a modo de ejemplo de un dispositivo para llevar a cabo la técnica de autocolimación.

La figura 7A muestra un esquema de acuerdo con realizaciones de la invención, en el que se toman mediciones de fotogrametría con la cámara de las figuras 3(a) - (c) y el artefacto de la figura 4. La figura 7B muestra el esquema de la figura 7A, incluyendo adicionalmente los 6 parámetros que se van a medir.

La figura 8 muestra un esquema alternativo de acuerdo con algunas realizaciones de la invención, en el que la supervisión o seguimiento espacial de un objeto se logra por medio de una cámara y un autocolimador en 2D separado, más un artefacto de medición tal como se muestra en la figura 4.

DESCRIPCIÓN DE UNA FORMA DE LLEVAR A CABO LA INVENCION

Las figuras 3(a) a 3(c) muestran diferentes vistas de una cámara adecuada para llevar a cabo la supervisión o seguimiento espacial de un objeto de acuerdo con una realización de la invención. La cámara 40 integra las dos tecnologías que se requieren para mejorar la precisión en las mediciones necesarias para el seguimiento espacial de un objeto: una cámara como tal, para mediciones de fotogrametría, y un autocolimador. En las figuras 3(a) y 3(b), parte de la carcasa externa se ha retirado para mostrar la parte interior de

la cámara. La figura 3(c) muestra una vista en despiece ordenado de la cámara que se muestra en las figuras 3(a) y 3(b). Algunas de las partes más relevantes de la cámara 40 se identifican en las figuras: una lente 41 para enfocar y crear la imagen del objeto en el sensor de cámara y para colimar la luz en las mediciones de autocolimación; y un sensor 42 para capturar imágenes. Ejemplos no limitantes del sensor 42 pueden ser un CCD matricial o un sensor CMOS. La imagen proyectada por la lente objetivo se forma en el sensor. Estos elementos se encuentran, por lo general, presentes en todas las cámaras. La cámara 40 también incluye una fuente de luz 43 necesaria para implementar la funcionalidad de autocolimación. La fuente de luz 43 puede ser un diodo de emisión de luz (LED). Como alternativa, esta puede ser un emisor láser. Esto puede aumentar la potencia y, por lo tanto, el intervalo operativo, o puede posibilitar que se trabaje en entornos de iluminación. La cámara 40 también incluye un divisor de haz 44, necesario también para implementar la funcionalidad de autocolimación. El divisor de haz 44 se puede implementar, por ejemplo, como una placa o un cubo.

La cámara 40 también tiene unos elementos estructurales 45 - 50 para habilitar el montaje, el acoplamiento y/o el soporte de los componentes ópticos y/o eléctricos. El cuerpo 45 es el elemento estructural principal de la cámara 40, al que se fijan los otros elementos de la cámara. El divisor de haz es soportado por el elemento 46, lo que garantiza el contacto entre el divisor de haz y el sensor de la cámara en un lado, y entre el divisor de haz y la fuente de luz en el otro lado. La cámara 40 también comprende unos elementos separadores especiales 47, que se usan para establecer la longitud focal que depende de la lente de la cámara. El sensor de la cámara se fija por medio del

elemento estructural 48. La cámara 40 también comprende un soporte de la fuente de luz 49. Una cubierta 50 encapsula y protege todos los elementos internos. La cámara 40 también tiene unos elementos de fijación 51 - 54 para fijar y acoplar los diferentes componentes (estructurales) de montaje, ópticos y / o eléctricos.

Con el fin de realizar el seguimiento espacial de un objeto, se requiere un ensamblaje, artefacto o dispositivo adicional. Un artefacto adicional de acuerdo con una posible realización se muestra en la figura 4. El artefacto de medición 60 que se muestra en la figura 4 está compuesto por una superficie especular 55 y un conjunto o cuadrícula de puntos de referencia 56 que está adherido o unido al artefacto. En la figura 4, la superficie especular 55 se implementa como un espejo plano. Superficies especulares alternativas pueden ser cualquier superficie plana o semiplana capaz de producir una reflexión especular de la luz, tal como una pieza que tenga un buen acabado superficial.

El espejo plano 55 se usa para las mediciones mediante autocolimación. Se monta sobre un bastidor 57. El conjunto de puntos de referencia 56 son unos objetivos (targets) que se requieren para las mediciones que son llevadas a cabo por la cámara 40 usando la técnica de resección espacial. Estos objetivos pueden adoptar formas diferentes o ser de tipos diferentes, tales como siguiendo un patrón de tablero de ajedrez, circular, cuadrado, en forma de cruz o siguiendo marcadores especiales, entre otros. El conjunto de puntos de referencia 56 requiere al menos 3 puntos u objetivos. Cabe destacar que, en general, cuantos más puntos de referencia haya, menos incertidumbre habrá en las mediciones. En la figura 4, los objetivos se configuran en forma de tablero de ajedrez. Los puntos de referencia se corresponden con los lados de

cada cuadrado en el tablero de ajedrez. Dicho de otra forma, el artefacto 60 que se muestra en la figura 4 está compuesto por un espejo plano 55 y un tablero de ajedrez calibrado 56. El tablero de ajedrez está muy extendido para la calibración interna de la cámara. Las coordenadas de los puntos de referencia 56 se conocen mediante un sistema de coordenadas definido en el artefacto 60 (el espejo 55 y el conjunto de puntos de referencia 56).

En el artefacto 60, se ha de establecer la relación geométrica entre el plano del espejo plano 55 y el sistema de coordenadas formado por el conjunto de puntos de referencia 56. Dicho de otra forma, se ha de llevar a cabo una fase de caracterización del artefacto 60 (el espejo 55 y el conjunto de puntos de referencia 56), preferiblemente sin conexión u offline, antes de iniciar la fase de medición de la posición y la orientación de un objeto. Los resultados de esta caracterización se usan más adelante durante las mediciones. Esto quiere decir que se ha de definir un sistema de referencia común para el espejo plano 55 y el conjunto de puntos de referencia 56. Dicho de otra forma, el vector normal del espejo 55 y el eje Z del sistema de coordenadas que se crea a partir del conjunto de puntos de referencia 56 (por ejemplo, un tablero de ajedrez) pueden estar alineados, pero puede que los mismos no coincidan. Por lo tanto, es necesario que se midan o que se caractericen tanto el vector normal del espejo 55 como el eje Z del sistema de coordenadas que se crea a partir del conjunto de puntos de referencia 56, con el fin de compensar cualquier desalineación potencial que puedan tener los mismos. Con el fin de establecer la relación geométrica mencionada entre estos dos vectores, el artefacto 60 que se muestra en la figura 4 (el espejo 55 con el conjunto de puntos de referencia 56) se mide, por ejemplo, en una Máquina de Medición de

Coordenadas (Coordinate Measuring Machine, CMM, por sus siglas en inglés). El artefacto 60 incluye adicionalmente unos medios de montaje, tales como una pluralidad de alojamientos, para montar una pluralidad de medios de medición para medir la ubicación espacial y la orientación del artefacto 60. Por ejemplo, 5 los medios de medición pueden ser retrorreflectores, con los que la ubicación espacial y la orientación del artefacto se pueden medir mediante una tecnología de seguimiento por láser (laser-tracker) convencional, que se encuentra fuera del alcance de la presente invención.

A continuación, se explica el proceso de seguimiento espacial de un 10 objeto usando la cámara 40 y el artefacto 60. Con el fin de realizar el seguimiento espacial de un objeto, un artefacto 60 que comprende un espejo plano y un conjunto de puntos de referencia, está unido al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación (T_x , T_y , T_z , Φ , θ , Ψ), con respecto a la cámara. La cámara 40 se coloca orientada hacia el artefacto 60 que está unido 15 al objeto, por ejemplo, tal como se muestra en las figuras 5, 7A y 7B, de una forma tal que las imágenes del conjunto de puntos de referencia que está comprendido en el artefacto 60 pueden ser capturadas por la cámara 40.

En primer lugar, se miden los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de viraje Ψ , que representan la inclinación del espejo plano 55. Esto se realiza 20 mediante la aplicación de la funcionalidad de autocorrelación disponible en la cámara 40 y basándose en el espejo de tipo especular 55 (el espejo plano 55). En esta fase no se usa el conjunto de puntos de referencia 56. La figura 5 muestra un esquema para llevar a cabo mediciones de autocolimación para obtener los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ con 25 la cámara 40 y un espejo plano 55. En la figura 6, se muestran los

componentes de un dispositivo óptico, tal como una cámara, relevantes para llevar a cabo mediciones de autocolimación, más el espejo plano requerido. En la figura 6, se muestra en detalle cómo se obtiene el ángulo de cabeceo o inclinación θ .

5 En la figura 6, en una cámara, una fuente de luz 43, tal como un diodo LED, emite un haz de luz no colimado 62 que se redirige mediante un divisor de haz 44, produciendo también unos haces no colimados 63. Estos haces 63 se coliman mediante una lente de colimación 41. La longitud focal de la cámara se representa con la letra f (la distancia entre el plano de la lente de colimación y el plano del sensor o plano de imagen). Los haces colimados 65 son
10 reflejados por el espejo 55, proporcionando de este modo unos haces de luz colimados reflejados 66. Algunos de los mismos alcanzan de nuevo la lente de colimación 41, que proporciona un haz de luz reflejado enfocado 67 al sensor de la cámara 42. Esta configuración permite que se determine el ángulo de
15 inclinación del espejo 55 (la inclinación o cabeceo θ o la desviación o viraje Ψ) y, por lo tanto, del objeto que está unido al artefacto 60, pero no el ángulo de giro o balanceo Φ . De hecho, un desplazamiento plano δ del haz de luz reflejado 67 en un punto 75 en el sensor de la cámara 42 se estudia sobre el plano de imagen 61 (el plano del sensor de la cámara) con el fin de estimar la
20 variación angular (el ángulo de cabeceo o inclinación θ) basándose en la siguiente relación trigonométrica: $\theta = \delta / 2f$. El desplazamiento plano δ representa el desplazamiento entre un punto de referencia de sensor de la cámara 76 y la posición en la que se captura el haz de luz reflejado enfocado 75. El punto 75 es el punto en el plano de imagen 61 en el que se enfoca el haz
25 de luz reflejado 67. θ indica el ángulo de inclinación o cabeceo del espejo. Se

lleva a cabo un enfoque similar para obtener el ángulo de desviación o viraje Ψ .

Haciendo referencia a continuación a la figura 5, un haz de luz no colimado es emitido por la fuente de luz 43 dispuesta en la cámara 40 (que no se muestra en la figura 5, véase, por ejemplo, la figura 6). El haz de luz emitido se redirige mediante el divisor de haz 44, produciendo también unos haces no colimados (que no se muestran). Estos haces se coliman mediante la lente de cámara 41. Los haces colimados 65 se dirigen hacia el espejo plano 55. Los haces colimados 65 son reflejados por el espejo plano 55, proporcionando de este modo unos haces de luz colimados reflejados 66. Los haces colimados reflejados 66 alcanzan la lente de cámara 41, que proporciona unos haces de luz reflejados enfocados 67 al sensor de la cámara 42. El punto $(\delta x', \delta y')$ representa el desplazamiento plano entre la posición (en el sensor de la cámara 42) en la que se captura el haz de luz reflejado enfocado 67, es decir, el punto 75, y un punto de referencia fija 76 en el plano 61 del sensor de la cámara 42. Esta posición de referencia representa la posición en donde los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ son iguales a cero, normalmente la posición $x' = 0$ e $y' = 0$ en el plano del sensor de la cámara. Debido a que el punto $(\delta x', \delta y')$ es bien conocido, y la longitud focal f de la cámara 40 también es bien conocida, los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ se obtienen mediante la aplicación de la siguiente relación trigonométrica:

$$\theta = \delta x' / 2f$$

$$\Psi = \delta y' / 2f$$

Una vez que se han calculado los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ , unos puntos de imagen 72 que se corresponden con

unos puntos de referencia 71 en el sistema de coordenadas del objeto (que no se muestra, pero que está unido al artefacto de medición 60), se miden y se identifican usando la cámara. Esto se realiza mediante la aplicación de técnicas de visión de la cámara. La figura 7A muestra un esquema para llevar a cabo mediciones de fotogrametría con la cámara 40 y el conjunto de puntos de referencia 56 que está comprendido en el artefacto 60 y que está unido al objeto - que no se muestra - al que se va a realizar un seguimiento (en la figura 7A, se hace referencia a los puntos de referencia como 71). Por lo tanto, estos puntos 71 son unos puntos de referencia en el sistema de coordenadas en 3D del objeto cuya posición y orientación se está sometiendo a seguimiento. Las coordenadas de los puntos de referencia 71 se conocen mediante un sistema de coordenadas definido en el artefacto 60. En la figura 7A, se ilustran cinco puntos de referencia 71, expresado cada uno de los mismos como (X_i, Y_i, Z_i) , en donde $1 < i < N$, siendo N un número natural mayor que 2 (en la figura 7A, $N = 5$).

La cámara 40 captura una imagen del objeto - en general, el artefacto - que tiene unido el conjunto de puntos de referencia 71 que están ubicados en unas posiciones (X_i, Y_i, Z_i) . En el plano 61 del sensor de imagen 42, se obtienen unos puntos de imagen 72 que se corresponden con unos respectivos puntos de referencia 71. Los puntos de imagen 72, a los que se hace referencia en lo sucesivo en el presente documento como puntos de imagen observados, definen la proyección de los puntos de referencia en 3D 71 en el plano 61 del sensor. Debido a que el sensor de la cámara 52 define un plano en 2D, la componente Z se establece a 0. Los puntos de imagen observados se expresan como $(x'_i, y'_i, 0)$. En la figura 7A, se muestran cinco puntos de imagen

observados $(x'_1, y'_1, 0)$, $(x'_2, y'_2, 0)$, $(x'_3, y'_3, 0)$, $(x'_4, y'_4, 0)$, $(x'_5, y'_5, 0)$, que se corresponden con unos respectivos puntos de referencia (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , (X_3, Y_3, Z_3) , (X_4, Y_4, Z_4) , (X_5, Y_5, Z_5) . Debido a que las coordenadas de los puntos de imágenes son en 2D, también se hace referencia a las mismas como

5 (x'_1, y'_1) , (x'_2, y'_2) , (x'_3, y'_3) , (x'_4, y'_4) , (x'_5, y'_5) . La posición de los puntos de imagen observados en el plano de sensor es conocida. Por ejemplo, con el fin de obtener dicha posición, se puede aplicar un procesamiento computacional de imágenes, tal como operadores y / o filtros, para identificar el centro de las características (features) de interés (tal como los puntos de borde intersecados,

10 los centros de las elipses, etc.). Por ejemplo, se puede aplicar una función de detección de contorno de superficie con el fin de obtener la posición de los puntos de imagen observados en el plano de sensor.

A continuación, con el fin de obtener los 6 parámetros - que se representan en la figura 7B - que definen la posición y la orientación del objeto

15 con 6 GDL, se aplica un algoritmo de resección espacial, restringido por los ángulos de orientación ya conocidos (los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ). Por lo tanto, estos dos ángulos se introducen como parámetros conocidos en el algoritmo de resección espacial, que se simplifica de este modo. En resumen, mediante la aplicación de un algoritmo de

20 resección espacial restringido por los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ , se obtiene el ángulo de giro Φ del artefacto 60, que está unido al objeto que se va a medir (que no se muestra) y un vector de traslación (T_x, T_y, T_z) entre la cámara 40 y el objeto. Este vector de traslación se corresponde con la posición del objeto.

25 El algoritmo de resección espacial restringida se aplica preferiblemente tal

como sigue:

Se implementa el siguiente problema de optimización, en el que es necesario que se minimice la diferencia entre los puntos de imagen observados $(x'_i, y'_i, 0)$, a los que también se hace referencia como (x'_i, y'_i) y los puntos de imagen estimados $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$, a los que también se hace referencia como (x'_{Ei}, y'_{Ei}) :

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{Bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \end{Bmatrix} \right)^2 = 0 \quad (\text{ecuación 1})$$

en donde N es el número de los puntos de imagen observados 72 (y, por lo tanto, el número de puntos de referencia 71). La diferencia entre los puntos de imagen observados y los puntos de imagen estimados se minimiza repetidamente hasta que se obtiene un determinado umbral de precisión.

Los puntos de imagen estimados $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$ se obtienen mediante la aplicación del modelo de cámara estenopeica (pinhole camera) que representa la proyección de un punto en 3D (X_i, Y_i, Z_i) sobre un plano de imagen (un sensor de cámara) (x'_{Ei}, y'_{Ei}) :

$$\begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{Bmatrix} = [A] \cdot \lambda \cdot R(\theta)R(\psi)R(\phi) \cdot \begin{Bmatrix} X_i - T_x \\ Y_i - T_y \\ Z_i - T_z \end{Bmatrix} \quad (\text{ecuación 2})$$

15 en donde:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ 0 & -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\text{sen}(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \text{sen}(\phi) & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y:

$$A = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Matriz de la cámara}$$

Simplificando:

$$R(\theta)R(\psi)R(\phi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, hay dos formas de calcular los puntos de imagen estimados

5 $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$, a los que también se hace referencia como (x'_{Ei}, y'_{Ei}) :

1. Aplicar la ecuación de proyección en visión por computador, en donde los puntos de imagen estimados $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$ se calculan tal como

sigue:

$$\begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -T_z \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix} \quad (\text{ecuación 3})$$

Mediante la sustitución de los puntos de imagen estimados de la ecuación

10 1 con los que se obtienen en la ecuación 3, el problema de minimización da como resultado lo siguiente:

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{Bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 0 \end{Bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -T_z \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix} \right) \right)^2 = 0 \quad (\text{ecuación 4})$$

2. Aplicar las ecuaciones de colinealidad, en donde los puntos de imagen estimados (x'_{Ei}, y'_{Ei}) se calculan tal como sigue:

$$x'_{Ei} = c_x - f \cdot \frac{r_{11}(X_i - T_x) + r_{21}(Y_i - T_y) + r_{31}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)} \quad (\text{ecuación 5})$$

$$y'_{Ei} = c_y - f \cdot \frac{r_{12}(X_i - T_x) + r_{22}(Y_i - T_y) + r_{32}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)}$$

Mediante la sustitución de los puntos de imagen estimados de la ecuación

15 1 con los que se obtienen en la ecuación 5, el problema de minimización da como resultado lo siguiente:

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{matrix} \{x'_i\} \\ \{y'_i\} \end{matrix} - \begin{matrix} c_x - f \cdot \frac{r_{11}(X_i - T_x) + r_{21}(Y_i - T_y) + r_{31}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)} \\ c_y - f \cdot \frac{r_{12}(X_i - T_x) + r_{22}(Y_i - T_y) + r_{32}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)} \end{matrix} \right)^2 = 0 \quad (\text{ecuación 6})$$

En las ecuaciones anteriores, son parámetros de entrada bien conocidos: para cada i , los puntos de imagen observados $\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 0 \end{pmatrix}$ en el sensor de la cámara; la posición de los puntos de referencia en el sistema de coordenadas del objeto $\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}$; un factor de escala λ , que representa un factor de conversión

5 entre los puntos de referencia en el objeto y los puntos de imagen observados en el sensor de cámara; y la matriz intrínseca de cámara $[A]$, que es una matriz que contiene las diferentes características internas de la cámara (la distancia focal (f), el punto central principal (c_x, c_y), el factor de oblicuidad, entre otros). No se requiere el factor de escala λ si se aplica previamente un proceso de
10 normalización. La matriz intrínseca de la cámara $[A]$ se puede obtener, por ejemplo, mediante la aplicación de un proceso de calibración.

El algoritmo divulgado se puede implementar o bien teniendo en cuenta la distorsión de la imagen producida por la lente de la cámara o bien sin considerar esta distorsión. Esta distorsión se puede considerar usando errores
15 de distorsión tangencial y radial bien conocidos en aplicaciones fotogramétricas.

En la ecuación anterior, son parámetros de restricción de entrada que se obtienen después de aplicar la técnica de autocolimación: la matriz de rotación de cabeceo o inclinación $R(\theta)$ obtenida a partir del ángulo de cabeceo o
20 inclinación θ ; y la matriz de rotación de desviación o viraje $R(\Psi)$ obtenida a partir del ángulo de desviación o viraje Ψ .

Y los parámetros de salida, estimados mediante la aplicación del algoritmo de resección espacial, son: la matriz de rotación de giro o balanceo $R(\Phi)$ (en general, el ángulo de giro o balanceo Φ) y el vector de traslación (T_X T_Y T_Z) entre el sistema de coordenadas de la cámara y el sistema de coordenadas del objeto, que se corresponde con la posición del objeto. Dicho de otra forma, T_X T_Y T_Z , Φ , θ , Ψ representan la posición y la orientación relativas entre la cámara 40 y el objeto.

La figura 8 muestra un esquema alternativo para implementar el método para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad. En este caso, el seguimiento espacial del objeto se realiza por medio de dos dispositivos separados: una cámara y un autocolimador en 2D, más el artefacto de la figura 4. Dicho de otra forma, la cámara 40 de las figuras 3(a - c) se sustituye por la cámara 140 y el autocolimador en 2D 150 de la figura 8. En la figura 8, la cámara 140 y el autocolimador 150 se disponen sobre un soporte 160. T_A^C representa una transformación de calibración extrínseca entre el autocolimador y la cámara. Estos están orientados hacia el artefacto 60 que está unido al objeto (que no se muestra), de una forma tal que las imágenes del conjunto de puntos de referencia que está comprendido en el artefacto pueden ser capturadas por la cámara 140. Aparte de esta diferencia relacionada con los componentes (cámara y autocolimador en dispositivos separados), el procedimiento de medición es el mismo que en el caso previo. Dicho de otra forma: en primer lugar, los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ , que representan la inclinación del espejo plano (en general, una superficie especular) que está unido al artefacto y, por lo tanto, la inclinación del objeto que se está sometiendo a seguimiento, se miden al llevar a cabo

mediciones de autocolimación con el autocolimador 150. A continuación, los puntos de imagen observados (x'_1, y'_1) , (x'_2, y'_2) , (x'_3, y'_3) , (x'_4, y'_4) , (x'_5, y'_5) que se corresponden con unos respectivos (al menos 3) puntos de referencia (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , (X_3, Y_3, Z_3) , (X_4, Y_4, Z_4) , (X_5, Y_5, Z_5) en el sistema de coordenadas del objeto (que no se muestra, pero que está unido al artefacto de medición 60), son obtenidos por la cámara 140, que captura una imagen del objeto - en general, el artefacto - que tiene unido el conjunto de puntos de referencia que están ubicados en unas posiciones (X_i, Y_i, Z_i) . En el plano del sensor de imagen de cámara, se obtienen los puntos de imagen observados (x'_1, y'_1) , (x'_2, y'_2) , (x'_3, y'_3) , (x'_4, y'_4) , (x'_5, y'_5) . A continuación, con el fin de obtener los 6 parámetros $(T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi)$ que definen la posición y la orientación del objeto con respecto a la cámara, con 6 GDL, se aplica el algoritmo de resección espacial, restringido por los ángulos de orientación ya conocidos (los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ), como se ha divulgado previamente.

El algoritmo de resección espacial divulgado se puede implementar y ejecutar en unos medios de procesamiento, tales como un procesador, y unos medios de almacenamiento de datos, tales como una memoria. Los medios de procesamiento se pueden incorporar en la cámara 40, 140, por ejemplo en los medios de procesamiento, por lo general comprendidos en o asociados a un sensor de cámara. Como alternativa, los medios de procesamiento pueden estar ubicados en un dispositivo diferente con respecto a la cámara 40, 140, por ejemplo en un sistema informático o un dispositivo informático, tal como un ordenador personal. En este caso, el algoritmo se puede ejecutar sin conexión (offline).

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (tales como "comprendiendo / que comprende", etc.) no se debería entender en un sentido excluyente, es decir, estos términos no se deberían interpretar como que excluyen la posibilidad de que lo que se describe y se define pueda incluir
5 elementos, etapas, etc., adicionales.

La invención no se limita, obviamente, a la realización o realizaciones específicas descritas en el presente documento, sino que también abarca cualquier variación que pueda ser considerada por cualquier experto en la materia (por ejemplo, en lo que respecta a la elección de materiales,
10 dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro del alcance general de la invención tal como se define en las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi$), que comprende:

5 unir un artefacto (60) al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi$), en donde dicho artefacto (60) comprende una superficie especular (55) y un conjunto de N puntos de referencia (71), en donde cada punto de referencia es definido por una posición (X_i, Y_i, Z_i) en un sistema de coordenadas definido en el artefacto (60), en donde $1 < i < N$ y

10 $N > 2$;

colocar una cámara (40) orientada hacia el artefacto (60) que está unido al objeto;

medir los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular (55) y, por lo tanto, del

15 objeto, siendo realizada dicha medición mediante la aplicación de una técnica de autocolimación;

capturar una imagen del conjunto de puntos de referencia ($71; (X_i, Y_i, Z_i)$) comprendido en el artefacto (60) que está unido al objeto, obteniendo de este modo en el plano (61) del sensor (42) de la cámara unos puntos de imagen

20 observados ($72; (x'_i, y'_i)$) que se corresponden con dichos puntos de referencia ($71; (X_i, Y_i, Z_i)$);

obtener el ángulo de giro o balanceo Φ del objeto y un vector de traslación (T_x, T_y, T_z) entre la cámara (40) y el objeto, usando dichos puntos de referencia ($71; (X_i, Y_i, Z_i)$) y dichos puntos de imagen observados ($72; (x'_i, y'_i)$) obtenidos

25 en el sensor (42) de la cámara, mediante la aplicación de un algoritmo de

resección espacial restringido por los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ medidos, en donde $(T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi)$ representan la posición y la orientación relativas entre la cámara (40) y el objeto.

- 5 2. El método de la reivindicación 1, en el que los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular (55) y, por lo tanto, del objeto, se miden tal como sigue aplicando una técnica de autocolimación:
- emitir un haz de luz no colimado (62) a partir de una fuente de luz (43)
- 10 que está dispuesta en la cámara (40);
- redirigir el haz de luz emitido (62) mediante un divisor de haz (44), produciendo haces de luz no colimados (63);
- colimar dichos haces de luz (63) mediante una lente de cámara (41), produciendo de este modo unos haces de luz colimados (65);
- 15 dirigir dichos haces colimados (65) hacia el espejo plano (55), en el que se reflejan los haces colimados, proporcionando de este modo unos haces de luz colimados reflejados (66);
- enfocar dichos haces colimados reflejados (66) en la lente (41) de la cámara, proporcionando de este modo unos haces de luz reflejados enfocados
- 20 (67) al sensor (42) de la cámara, siendo enfocados dichos haces de luz reflejados enfocados (67) en una posición (75) en el plano (61) del sensor (42) de la cámara;
- calcular los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ tal como sigue:

$$\theta = \delta x' / 2f$$

$$\Psi = \delta y' / 2f$$

en donde f es la distancia focal de la cámara (40) y $\delta x'$, $\delta y'$ representan un desplazamiento plano entre la posición medida (75) y una posición de referencia fija sobre el plano (61) del sensor de cámara (42), representando esta referencia fija la posición (x' , y') en el plano del sensor (61) en donde los
5 ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ son iguales a 0.

3. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 2, en el que dicho ángulo de giro o balanceo Φ y dicho vector de traslación (X, Y, Z) entre la cámara (40) y el objeto, se obtienen mediante la implementación de una
10 técnica de resección espacial, restringida por los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ ya obtenidos, solucionando de forma iterativa el siguiente problema de optimización:

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{Bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \end{Bmatrix} \right)^2 = 0$$

en donde N es el número de los puntos de imagen observados; (x'_i , y'_i) son los puntos de imagen observados; y (x'_{Ei} , y'_{Ei}) son los puntos de imagen estimados.
15

4. El método de la reivindicación 3, en el que los puntos de imagen estimados (x'_{Ei} , y'_{Ei}) se obtienen mediante la aplicación de un modelo de cámara estenopeica que representa la proyección (x'_{Ei} , y'_{Ei}) de cada punto de referencia en 3D (X_i , Y_i , Z_i) sobre el plano de imagen (61) del sensor (42) de la
20 cámara:

$$\begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{Bmatrix} = [A] \cdot \lambda \cdot R(\theta)R(\psi)R(\Phi) \cdot \begin{Bmatrix} X_i - T_x \\ Y_i - T_y \\ Z_i - T_z \end{Bmatrix}$$

en donde:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ 0 & -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\text{sen}(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \text{sen}(\phi) & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5 que se puede simplificar como:

$$R(\theta)R(\psi)R(\phi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

y en donde: $A = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ es la matriz intrínseca de la cámara

y en donde λ es un factor de escala.

5. El método de la reivindicación 4, en el que los puntos de imagen
10 estimados $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$ se calculan tal como sigue mediante la aplicación de la ecuación de proyección central en la visión por ordenador:

$$\begin{Bmatrix} x'_{Ei} \\ y'_{Ei} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -T_z \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix}$$

6. El método de la reivindicación 4, en el que los puntos de imagen
15 estimados $(x'_{Ei}, y'_{Ei}, 0)$ se calculan tal como sigue mediante la aplicación de ecuaciones de colinealidad:

$$x'_{Ei} = c_x - f \cdot \frac{r_{11}(X_i - T_x) + r_{21}(Y_i - T_y) + r_{31}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)}$$

$$y'_{Ei} = c_y - f \cdot \frac{r_{12}(X_i - T_x) + r_{22}(Y_i - T_y) + r_{32}(Z_i - T_z)}{r_{13}(X_i - T_x) + r_{23}(Y_i - T_y) + r_{33}(Z_i - T_z)}$$

7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 6, en el que antes de aplicar una técnica de autocolimación para medir los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ y de capturar con la cámara una imagen del artefacto que está unido al objeto (40), se establece una relación geométrica entre el plano de la superficie especular (55) y un sistema de coordenadas formado por el conjunto de puntos de referencia (71).
8. El método de la reivindicación 7, en el que el artefacto (60) se ha medido en una Máquina de Medición de Coordenadas (CMM) con el fin de establecer dicha relación geométrica.
9. Un sistema para estimar la posición y la orientación de un objeto con 6 grados de libertad ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi$), que comprende:
- unos medios para tomar mediciones de fotogrametría;
 - unos medios para llevar a cabo una autocolimación; y
 - un artefacto (60) que está unido al objeto del cual se va a estimar la posición y la orientación ($T_x, T_y, T_z, \Phi, \theta, \Psi$), en donde dicho artefacto (60) comprende una superficie especular (55) y un conjunto de N puntos de referencia (71), en donde cada punto de referencia es definido por una posición (X_i, Y_i, Z_i) en un sistema de coordenadas definido en el artefacto (60), en donde $1 < i < N$ y $N > 2$;
- en el que los medios para llevar a cabo una autocolimación se configuran para medir los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ que representan la inclinación de la superficie especular (55) y, por lo tanto, del

objeto;

en donde los medios para tomar mediciones de fotogrametría se configuran para:

capturar una imagen del conjunto de puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i))
 5 comprendido en el artefacto (60) unido al objeto, obteniendo de este modo unos puntos de imagen observados (72; (x'_i, y'_i)) que se corresponden con dichos puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i)); y

obtener el ángulo de giro o balanceo Φ del objeto y un vector de traslación (T_x, T_y, T_z) entre los medios para tomar mediciones de fotogrametría y el
 10 objeto, usando dichos puntos de referencia (71; (X_i, Y_i, Z_i)) y dichos puntos de imagen observados (72; (x'_i, y'_i)), mediante la aplicación de un algoritmo de resección espacial restringido por los ángulos de cabeceo o inclinación θ y de desviación o viraje Ψ medidos.

15 10. El sistema de la reivindicación 9, en el que dichos medios para tomar mediciones fotogramétricas y dichos medios para llevar a cabo una autocolimación están comprendidos en una cámara (40).

11. El sistema de la reivindicación 9, en el que dichos medios para tomar
 20 mediciones fotogramétricas están comprendidos en una cámara (140) y dichos medios para llevar a cabo una autocolimación están comprendidos en un autocolimador (150).

12. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 9 - 11, en el que los
 25 N puntos de referencia representan un patrón de tablero de ajedrez, o un

patrón circular, o un patrón cuadrado, o un patrón en forma de cruz o siguen marcadores especiales.

13. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 9 - 12, en el que la
5 superficie especular (55) es un espejo plano o cualquier superficie plana o semiplana capaz de producir una reflexión especular de la luz.

14. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 9 - 13, que
comprende adicionalmente unos medios de montaje para montar una pluralidad
10 de medios de medición para medir la ubicación espacial y la orientación del espejo (55).

15. Un producto de programa informático que comprende
instrucciones / código de programa informático para llevar a cabo el método de
15 acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 8, o una memoria / soporte legible por ordenador que almacena instrucciones / código de programa para llevar a cabo el método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 8.

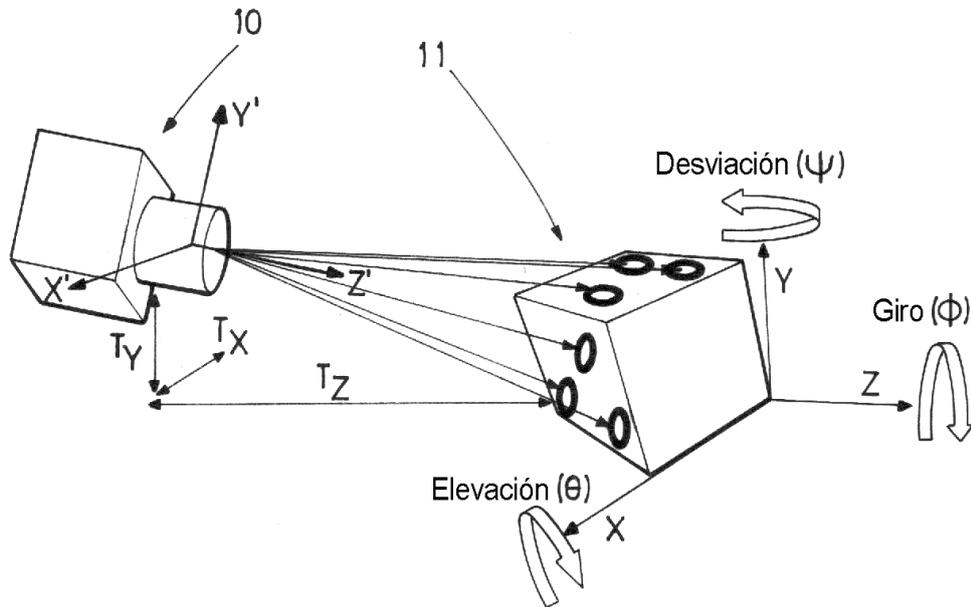


FIG.1
ESTADO DE LA TÉCNICA

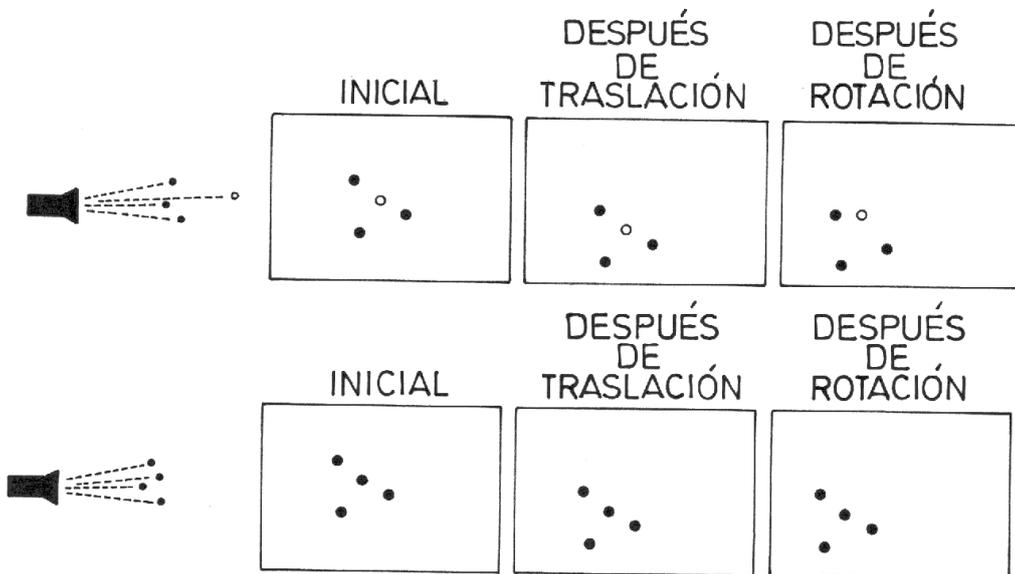


FIG.2

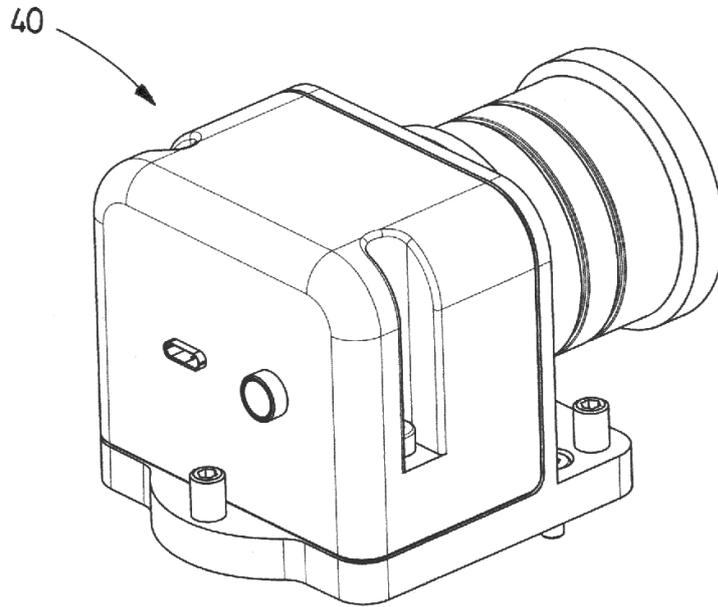


FIG. 3a

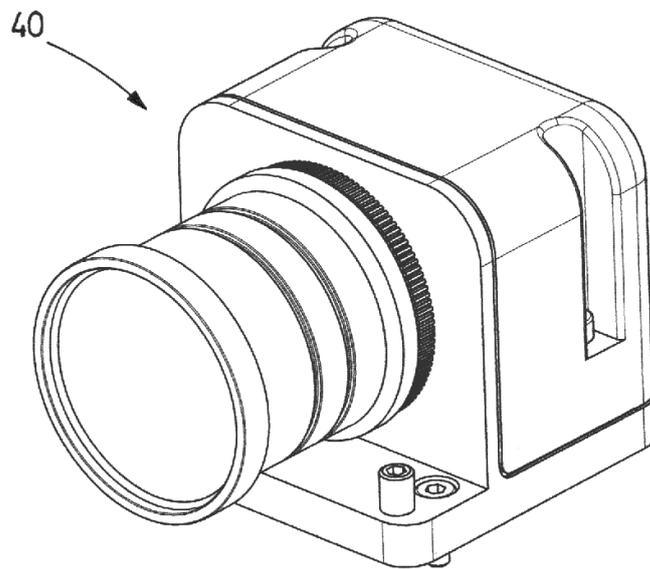


FIG. 3b

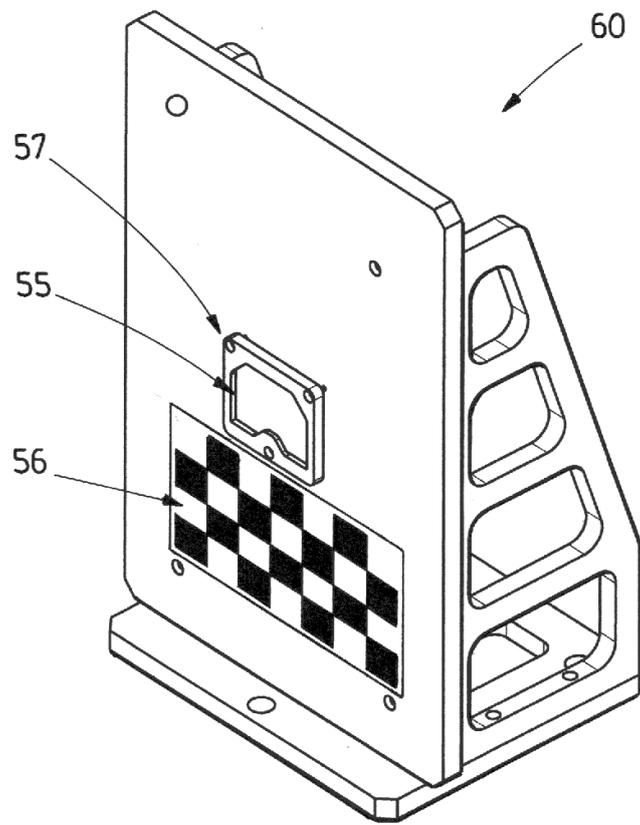


FIG.4

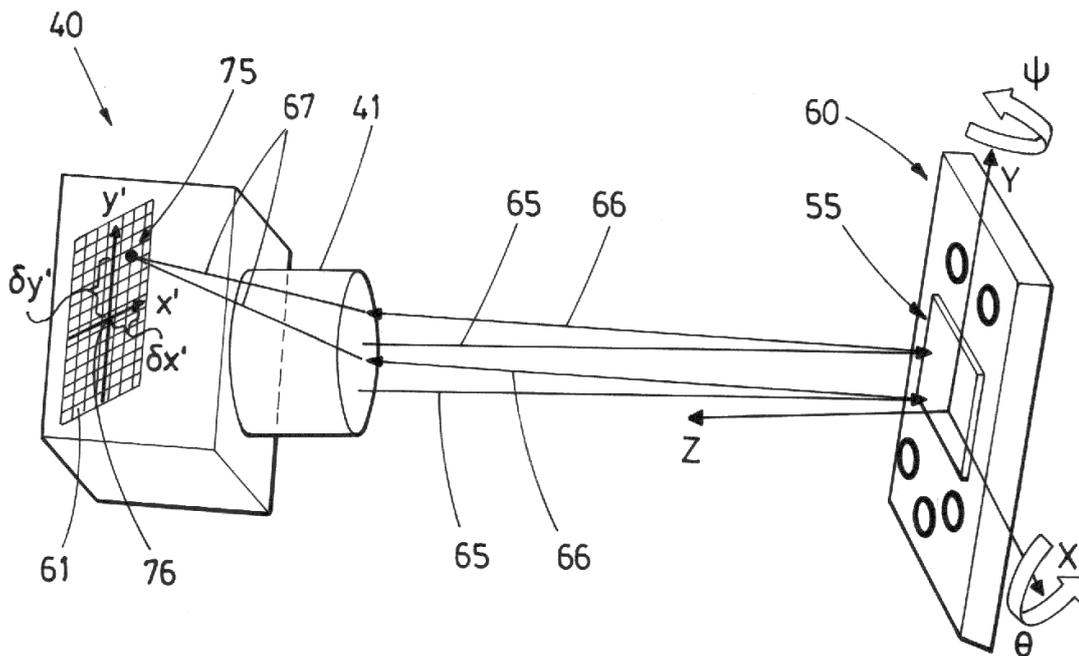


FIG.5

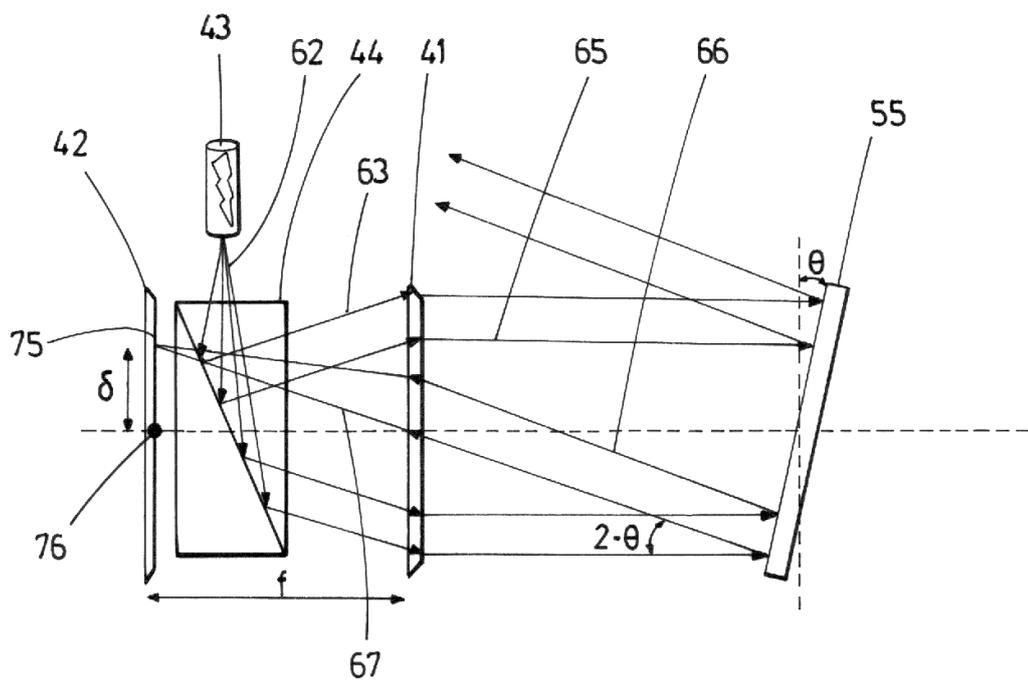


FIG.6

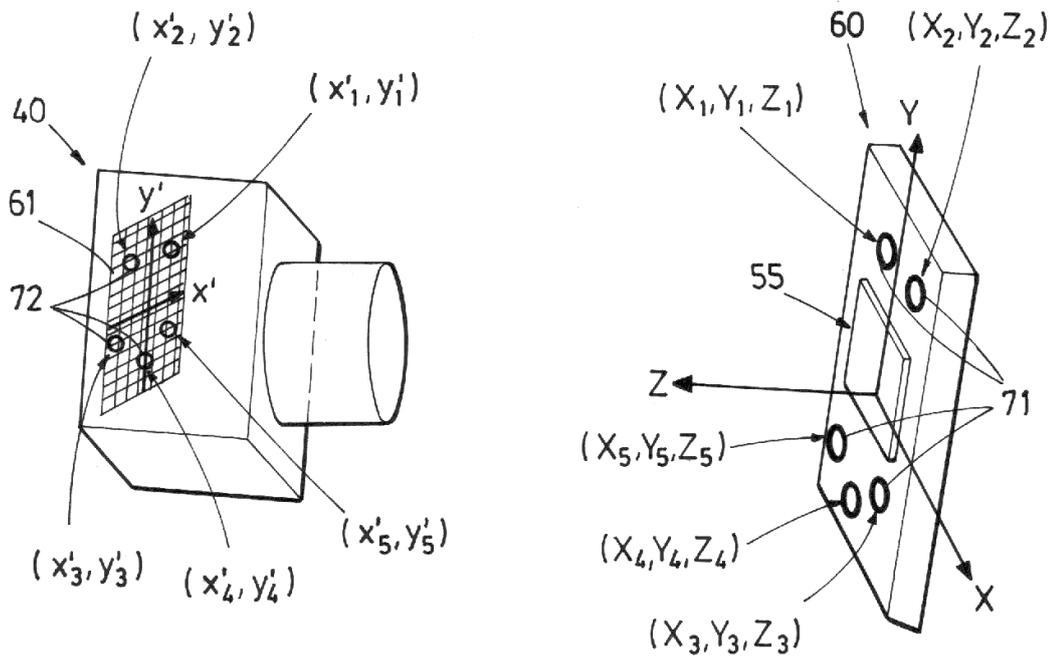


FIG. 7A

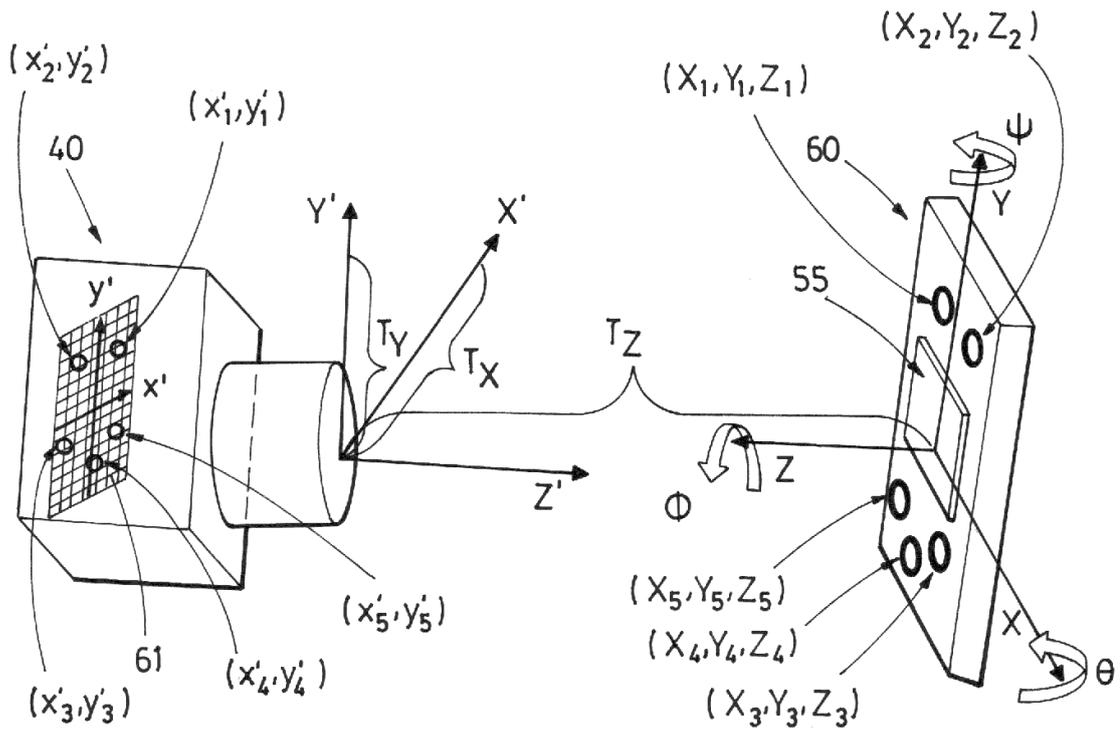


FIG. 7B

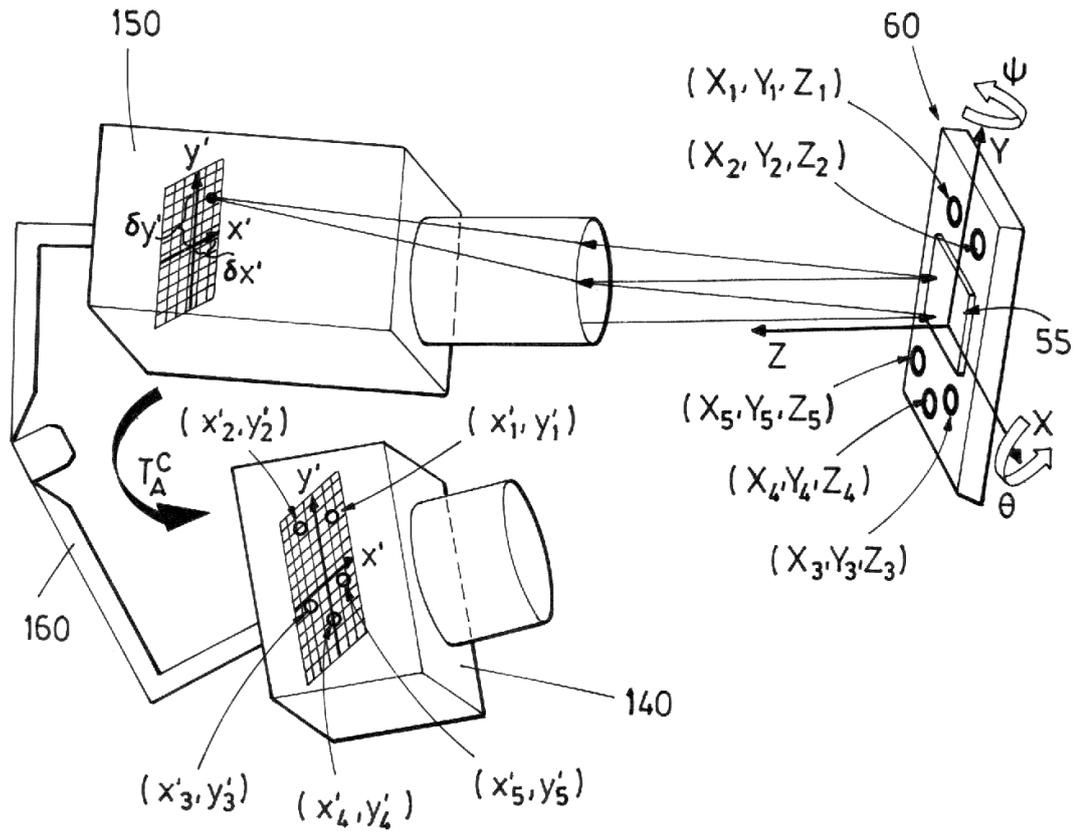


FIG.8



②¹ N.º solicitud: 201930991

②² Fecha de presentación de la solicitud: 13.11.2019

③² Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤¹ Int. Cl.: **G01S17/42** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ ⁶ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 4714339 A (LAU, K. et al.) 22/12/1987, Todo el documento.	1-15
A	US 2003/0206285 A1 (LAU, K.) 06/11/2003, Todo el documento.	1-15
A	US 2012/0262550 A1 (BRIDGES, R.) 18/10/2012, Todo el documento.	1-15
A	WO 2019/006289 A1 (KAARTA, INC.) 03/01/2019, Todo el documento.	1-15
A	US 2017/0201738 A1 (LACAZE, A. et al.) 13/07/2017.	-

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe
07.10.2020

Examinador
Ó. González Peñalba

Página
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01S, F24J, B64G, G06T

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC