

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 669 243**

51 Int. Cl.:

**B25J 17/02** (2006.01)

**B25J 9/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.12.2014 PCT/EP2014/076795**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.06.2015 WO15082713**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.12.2014 E 14818900 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018 EP 3077162**

54 Título: **Dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante**

30 Prioridad:

**06.12.2013 GB 201321539**

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

**24.05.2018**

73 Titular/es:

**HUBER DIFFRAKTIONSTECHNIK GMBH & CO.  
KG (100.0%)  
Sommerstr. 4  
83253 Rimsting, DE**

72 Inventor/es:

**OLEA, GHEORGHE DR.**

74 Agente/Representante:

**TORNER LASALLE, Elisabet**

ES 2 669 243 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

Dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante

La presente invención versa sobre un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante. Más específicamente, la presente invención versa sobre un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante para un posicionamiento preciso de muestras, instrumentos y/o aparatos de gran peso; por ejemplo, en los campos y el uso de máquinas de difracción para instalaciones de sincrotrones.

Hace tiempo que se conocen en la técnica anterior sistemas y dispositivos de posicionamiento para el posicionamiento de muestras con distintos fines.

Algunas investigaciones sobre materiales nuevos o existentes implican máquinas sincrotrónicas de instrumentos de rayos X y difracción (Dm) para investigar las propiedades físicas y/o químicas. Para descubrir las estructuras intrínsecas moleculares y/o atómicas y su comportamiento en diferentes condiciones ambientales, las mediciones en estas grandes máquinas (microscopios) se basan en técnicas de difracción. Para simular las condiciones reales o virtuales (por ejemplo, presión, temperatura, etc.) para una muestra, a veces son necesarios instrumentos y/o aparatos adicionales. Estos podrían pesar varias decenas o cientos de kilogramos y tener un tamaño apreciable, y los conjuntos (muestra e instrumentos/aparatos) deben ser manipulados en la posición correcta hacia el haz de rayos X entrante. Un proceso experimental estándar incluye varias operaciones (y/o fases): configuraciones, alineaciones, calibraciones rápidas, ir a la posición exacta requerida, mantener la posición un tiempo relativamente prolongado (por ejemplo, horas o días); luego, reiniciar todo el ciclo para otra investigación. Después de esto, un dispositivo de posicionamiento requerido debería poder realizar movimientos tanto sencillos como complejos con suficiente precisión y velocidad, teniendo al mismo tiempo la potencia para soportar la carga relativamente pesada y mantenerla un tiempo relativamente prolongado. Especialmente, debe poder realizar movimientos esféricos alrededor de un punto fijo arbitrario elegido, denominado centro de rotación C (o punto de pivote P) con respecto al centro de la muestra, ubicado a una distancia ( $d_c$ ) de la base del instrumento.

Recientemente, se viene investigando cada vez más el principio de la cinemática paralela (CP) como concepto de posicionamiento en función de algunas ventajas frente al principio estándar en serie (apilado). La topología más común de 6gdl, denominada hexápodo, se deriva de trabajos de GOUGH [V. E. Gough, Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance, *Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, 1956-1957] y STEWART [D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, *Proc. Institution of Mechanical Eng.* (Reino Unido), 1965-1966]. El mecanismo de la plataforma GOUGH-STEWART fue aplicado por vez primera como simulador de movimiento [C. L. Klaus, *Motion manipulator*, US 3295224, 3 de enero de 1967] y luego como posicionamiento de herramientas en la industria de las máquinas herramienta [P. C. Sheldon, *Six-axis machine tool*, US4988244, 29 de enero de 1991]. Las estructuras reales de hexápodos para posicionamiento (por ejemplo, 6-SPS) son mecanismos cinemáticos completamente paralelos (MCP) compuestos de estructuras simétricas con seis accionadores de longitudes variables llamados tirantes dispuestos entre dos formas hexagonales (o discoidales) aproximadas —base y partes móviles de la plataforma, respectivamente—. La posición (y la orientación) de la plataforma es resultado de una combinación de movimientos muy acoplados de barras telescópicas accionadas linealmente. Los beneficios están relacionados con el aumento de la carga útil, de la precisión y de la dinámica, debido a su estructura piramidal intrínsecamente más rígida. La clase distintiva diseñada para el posicionamiento de precisión es denominada hexápodos de precisión.

Hay varias soluciones propuestas, algunas de ellas como productos disponibles. Sin embargo, cuando se pretende usar dentro de difractómetros (por ejemplo, Dm5021 / I07 / DLS, HUBER GmbH Co & KG, DLS-Diamond Light Source, línea I07-Beam), presentan algunos inconvenientes en relación con la manipulación requerida (por ejemplo, carga > 50 kg,  $d_c = 170$  mm, repetibilidad =  $\pm 2$   $\mu$ m, velocidad = 3 mm/s) y con los parámetros de espacio de trabajo Dm disponible ( $D \times A = 400 \times 420$  mm, diámetro D, altura A): a) la carga máxima manipulada no es suficiente (para los que satisfacen  $D \times A$  o  $d_c$ ), b) la distancia del punto central de rotación ( $d_c$ ) no está dentro de  $D \times A$  (para todas las que soportan una mayor carga) y c) el espacio de trabajo es relativamente pequeño (para los dos casos anteriores). Sucintamente, el volumen de los hexápodos, especialmente las alturas, es demasiado grande (o demasiado pequeño) en comparación con las prestaciones que ofrecen para el espacio Dm asignado. Además, la superficie de montaje de la plataforma para grandes instrumentos no siempre está bien preparada (por ejemplo, gran abertura para la gestión de cables).

Esto se debe a que los diseñadores se enfrentan con: a) la necesidad de embalar “dentro” de los tirantes de accionamiento (barras telescópicas) un número apreciable de componentes (por ejemplo, motor, reductor armónico, guías, sensores, etc.), b) el hecho de que la forma del espacio de trabajo resulta compleja, debido al número y al tamaño de los accionadores que se cruzan; c) los efectos dinámicos no deseados para mover las patas motorizadas, a veces apreciables, que afectan a la velocidad máxima. Y, las singularidades (y las colisiones) producidas deben ser detectadas y evitadas para tareas de precisión; sin embargo, ello es difícil de llevar a cabo, ya que está directamente relacionado con el número de articulaciones y de componentes. Por último, los movimientos simples (la traslación —X, Y, Z— [y las rotaciones —Rx,Ry,Rz—]) son difíciles de predecir por parte de personal no experto en

cinemática paralela, cuando se deben realizar operaciones de alineación simples y rápidas en las salas experimentales.

A lo largo del tiempo, se han investigado otras arquitecturas para tareas de posicionamiento de precisión con 6gdl.

5 La solicitud de patente estadounidense US 5.301.566 versa sobre un (mini)manipulador paralelo con seis grados de libertad que tiene tres miembros inextensibles para manipular una plataforma fijada mediante tres articulaciones universales no colineales y motores paralelos con dos grados de libertad. Usando el número mínimo de puntos accionados y de apoyo, y motores planarios bidireccionales se han reivindicado un espacio de trabajo, una rigidez y una precisión mayores que con el mecanismo de Stewart/Gough, además de otras ventajas (por ejemplo, cinemática directa, pocos componentes, etc.). Sin embargo, las características estáticas y dinámicas dependen en gran medida del número de componentes (tres) que están dispuestos simétricamente con respecto a únicamente un eje.

10 Hay también varias propuestas para mecanismos de CP que funcionan como dispositivos de mesa de posicionamiento. La solicitud de patente internacional WO07/055339A1 describe una mesa de posicionamiento tridimensional (de forma rectangular) que tiene la capacidad de realizar movimientos de alta precisión, como resultado de acciones combinadas principalmente de dos dispositivos separados de posicionamiento. Unos dispositivos elevadores (Z) y de placa de mesa (XYRz/MCP) están conectados ambos mediante una placa de soporte por rodamientos planarios y tres guías lineales verticales. El dispositivo de elevación incluye un sistema por etapas de dos cuñas guiadas que, en sus movimientos relativos contra un soporte fijo, producen la elevación o el descenso de la plataforma. Sin embargo, estas estructuras híbridas combinadas en paralelo-serie no pueden proporcionar todo el espectro de prestaciones de movimiento (6gdl). La solicitud de patente japonesa JP201251054

15 A describe una tabla de posicionamiento que usa tres soportes móviles, cada uno de los cuales proporciona un movimiento de elevación/descenso mediante una combinación de tres partes lineales guiadas en la primera de las cuales está fijado el motor, y, en la segunda, un rodamiento esférico. Con esta arquitectura de trípede, una carga se sitúa en el espacio (3gdl) mediante varias partes móviles y medios de guiado, lo que supone afectar a la rigidez general.

20 La redundancia es un concepto relativamente nuevo aplicado a mecanismos cinemáticos paralelos. Aumenta las prestaciones de los mecanismos de rigidez, espacio de trabajo, precisión y velocidad para estructuras tanto planarias como espaciales. Hasta ahora se han estudiado dos conceptos: la redundancia cinemática (añadir una cadena/pata) y la redundancia de accionamiento (añadir una articulación activa), respectivamente. La redundancia también tiene la ventaja de evitar singularidades y de trabajar en condiciones difíciles cuando fallan uno o más accionadores. Sin embargo, hasta la fecha se han puesto en circulación pocos productos de manipulación y/o posicionamiento.

25 La solicitud de patente japonesa JP2010264526 A versa sobre un mecanismo paralelo espacial redundante que usa cuatro pares de dos accionadores cada uno de los cuales tiene un gdl. La arquitectura es similar a las de hexápodos basados en accionadores de tirante, pero con articulaciones interconectadas especialmente diseñadas en el extremo superior. Para realizar la tarea de movimiento requerido, la función de control debe tener en cuenta solo seis puntos activos seleccionados adecuados. La altura resultante (alto) del dispositivo, relacionada con las longitudes de los accionadores, es similar a la del caso de los hexápodos.

30 La solicitud de patente francesa FR2965207A1 describe un robot paralelo redundante que tiene seis grados de libertad. Puede verse que el mecanismo comprende cuatro cadenas cerradas cinemáticas articuladas, cada una con un accionamiento con dos gdl desde la base. Una cadena principal en serie está soportada por otra mediante una articulación giratoria y luego está conectada a la plataforma mediante articulaciones rotatorias separadas, incluyendo una pivotante. Los pares de accionadores están situados a lo largo de una forma cuadrilateral que mueve la plataforma y que actúa alrededor de las esquinas. Se evitan las singularidades de tipo paralelo. Y, mediante el uso de motores rotativos y brazos (barras), se pueden acometer grandes áreas de trabajo y tareas de manipulación de destreza, pero no junto con precisión, porque la rigidez no es la mejor. Quizá se obtengan valores mejorados en la realización utilizando accionadores lineales verticales (FR2964337 A1), pero se supone que el tamaño de la plataforma es mucho más pequeño que la base.

35 La solicitud de patente china CN1730235 versa sobre un mecanismo paralelo redundante con seis grados de libertad usado como estructura para una máquina herramienta para aumentar su rigidez axial y el espacio de trabajo, usando cuatro patas telescópicas, cada una de las cuales se mueve en torno a una base anular mediante pares giratorios como parte de sus bloques deslizantes. Las guías circulares efectúan una gran gama de movimientos de rotación y aumentan el espacio de actitud, pero las articulaciones activas están interpuestas entre las pasivas, disminuyendo la rigidez máxima.

40 La publicación "Motion planning for 6-DOF assembly part positioning and alignment adjustment" de J. Hong y otros, publicada en *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 37, nº 2, 2013, da a conocer un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante en el que las cuatro patas de apoyo tienen una cadena cinemática de tipo <sup>PPPS</sup>S.

La publicación "Singularity Analysis of a Six-dof Parallel Manipulator using Grassmann-Cayley Algebra and Gröbner Bases", de S. Caro y otros, publicada en *Proceedings of an International Symposium on the Occasion of the 25th anniversary of the McGill University Centre for Intelligent Machines*, Montreal, Canadá (2010) da a conocer un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo en el que las tres patas de apoyo tienen una cadena de tipo ( $^{PB}$ )PS.

- 5 La publicación "A new macro-micro drive parallel robot for chromosome dissection", de J. Feng y otros, publicada en *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (1) (2012) da a conocer un macromanipulador accionado por patas cuyas cadenas cinemáticas comprenden módulos de posicionamiento de elevación inclinada.

10 Todos estos dispositivos, descritos en lo que antecede, tienen la capacidad de poner un cuerpo en el espacio parcial (con menos de 6 grados de libertad) o completamente (con 6 grados de libertad) usando estructuras no redundantes (por ejemplo, paralelas o híbridas) o redundantes (por ejemplo, paralelas). Sin embargo, ninguno de los dispositivos anteriores es perfectamente adecuado para las aplicaciones difractivas específicas relacionadas con sincrotrones.

15 Por lo tanto, un objeto de la presente invención es proporcionar un dispositivo de posicionamiento 6 gdl (con 6 grados de libertad) con rendimientos y prestaciones superiores, al estar más adaptado al alcance que los resultados y los logros reales existentes.

20 Un primer objeto de la presente invención es proporcionar una mesa de posicionamiento con una superficie de apoyo y fijación de mayor tamaño (incluyendo la abertura) y forma adecuada (plana) para soportar las cargas específicas de los difractómetros. Un segundo objeto de la presente invención es proporcionar una mesa que es adecuada para caber en los requisitos de espacio reducido más exigentes (por ejemplo, perfil más bajo). Un tercer objeto de la presente invención es proporcionar una mesa de posicionamiento de mayor precisión (incluyendo estabilidad). Un cuarto objeto de la presente invención es proporcionar un concepto para aumentar la velocidad. Un quinto objeto de la presente invención es proporcionar un procedimiento para efectuar intuitivamente de manera automática (o manual) movimientos cartesianos simples (por ejemplo, traslaciones y/o rotaciones) de configuración.

25 El inventor de la presente invención ha descubierto sorprendentemente que los dispositivos según los siguientes aspectos de la presente invención proporcionan una solución a los objetos de la presente invención anteriormente descritos y que, además, proporcionan efectos técnicos y ventajas que eran inesperadas y sorprendentes en vista de la técnica anterior. Estos efectos técnicos y ventajas serán explicados y resultan evidentes por los ejemplos que acompañan a esta divulgación.

30 En un primer aspecto, se proporciona un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo (Rd-PPT) que comprende una base estacionaria (B) y una mesa amovible (T). El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo es una mesa de dispositivo de posicionamiento paralelo redundante. La mesa amovible puede ser movida con respecto a la base estacionaria en los seis grados de libertad (6gdl). La mesa amovible tiene una superficie de fijación ( $\Sigma_T$ ). La superficie de fijación es una superficie de fijación en la que pueden montarse una muestra ( $S_p$ ) o cuerpos relacionados ( $B_o$ ) para investigaciones. Hay al menos un conjunto de cuatro patas de apoyo que están dispuestas simétricamente y en parejas alrededor del centro de la base conectados con un extremo a la base estacionaria y con el otro extremo a la mesa amovible. Una de las patas de apoyo es redundante. Todas las patas de apoyo son cadenas cinemáticas (K)  $\geq 13$ . Dentro del contexto de la presente divulgación, redundante se refiere a cualquier dispositivo de mesa de posicionamiento que tenga al menos un conjunto de cuatro patas de apoyo, siendo al menos una pata de apoyo redundante en vista de las otras patas.

40 En una realización preferente de la presente invención, el dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo puede ser modular. Dentro del contexto de la presente divulgación, modular significa que el dispositivo de mesa comprende la base estacionaria, la mesa amovible y las patas de apoyo de manera modular. Las patas de apoyo pueden ser proporcionadas como módulos de posicionamiento (Pm). Los módulos de posicionamiento pueden estar dispuestos en paralelo verticalmente con respecto a un eje de simetría (Z) y ortogonalmente con respecto a un segundo eje de simetría (X / Y), preferentemente como columnas activas con 2gdl.

45 Cada uno de los módulos de posicionamiento puede ser una combinación apilada de una unidad de posicionamiento activa  $A_c$ —accionada de forma planaria—, y dos unidades de posicionamiento ( $P_u$ ) no activas,  $E_i$  —de elevación inclinada— y  $G_u$  —de guiado esférico—, de las cuales los dos primeras ( $A_c$ ,  $E_i$ ) pueden ser bloques paralelepípedicos compactos con la misma forma y el mismo tamaño de la base.

50 Además, una unidad de posicionamiento activa  $A_c$  puede ser una unidad  $\underline{A}$  de accionamiento en paralelo con 2gdl. La unidad (A) de accionamiento puede comprender cuatro ejes ortogonales de movimiento, a lo largo de los cuales dos de ellos, adyacentes, accionan un conjunto de dos partes lineales de accionamiento ( $\underline{A}_{11}$ ,  $\underline{A}_{12}$ ), siendo otro redundante ( $\underline{A}'_{11}$ ,  $\underline{A}'_{12}$ ), perpendicularmente a los lados de un motor común (M) con superficie planaria de guiado ( $\Sigma_1$ ).

55 En una implementación preferente, la unidad de posicionamiento ( $E_i$ ) de elevación del dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo puede comprender un par de cuñas paralelas (W) con superficies de guiado inclinadas ajustables ( $\Sigma_{21}$ ,  $\Sigma_{22}$ ) en V. La parte inferior ( $W_1$ ) de las superficies de guiado ( $\Sigma_{21}$ ,  $\Sigma_{22}$ ) puede estar fijada en el

accionador (A) y la parte superior (W2) puede soportar las unidades esféricas (S) de posicionamiento, creando una forma de V con la pata opuesta de una unidad de posicionamiento (E1).

5 Una unidad de posicionamiento de guiado (Gu) puede ser una articulación esférica compacta (S). La articulación esférica compacta (S) puede tener formas esféricas cóncavas-convexas en contacto con superficies ajustables ( $\Sigma_{31}$ ,  $\Sigma_{32}$ ). Una primera parte puede ser una columna cónica truncada p con una esfera (S) con calibrado de precisión en un extremo; otra, montada perpendicularmente en la cara superior de la elevación (Pu) que aloja las partes interconectadas (H1, H2) integradas en la cara inferior de la mesa.

10 En una implementación preferente, las cuatro articulaciones planarias 2P pueden estar montadas en parejas (2 x 2P) sobre la base estacionaria, teniendo ejes mutuamente ortogonales (P1P3/ P2P4) y sustancialmente paralelos a la superficie de la base estacionaria ( $\Sigma_B$ ) formando un módulo de accionamiento coplanario (Am), como parte de un mecanismo cinemático paralelo 6-4-(2P)PS, con solo articulaciones lineales y esféricas, respectivamente, y articulaciones pasivas (P), estando todas inclinadas el mismo ángulo  $\alpha$ .

Los módulos de posicionamiento (Pm) pueden estar situados en los lados centrales, o en las esquinas del cuadrado de la base estacionaria y/o de la mesa amovible en términos de una abertura central (D).

15 En otro aspecto de la invención, se proporciona un uso de la mesa de posicionamiento paralelo redundante según el primer aspecto de la divulgación para generar movimientos espaciales cartesianos simples: traslaciones —TX o TY o TZ— y rotaciones —RX o RY o RZ— y desplazamientos lineales —X o Y o Z— y angulares — $\alpha X$  o  $\alpha Y$  o  $\alpha Z$ —, como implicación directa de movimientos con desplazamientos iguales o equivalentes, usando la totalidad o solo algunos de los movimientos (tx,ty) y desplazamientos (X,Y) lineales de los correspondientes ejes activos.

20 En un tercer aspecto, la presente invención versa sobre un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante puede comprender una base estacionaria y una mesa amovible. La mesa amovible puede ser movida con respecto a la base estacionaria en los seis grados de libertad. La mesa amovible puede tener una superficie de fijación sobre la cual pueden montarse una muestra o instrumentos relacionados para investigaciones. Preferentemente, hay al menos un conjunto de cuatro patas de apoyo dispuestas simétricamente alrededor del centro de la base conectadas con un extremo a la base y con el otro extremo a la mesa amovible.

Idealmente, el dispositivo de posicionamiento de la mesa puede estar concebido para que sea modular y tiene las patas de apoyo como módulos de posicionamiento dispuestos en paralelo verticalmente con respecto a un eje de simetría y ortogonalmente en parejas con respecto a otro de sus ejes de simetría.

30 Cada uno de los módulos de posicionamiento puede ser una combinación predeterminada de una unidad de posicionamiento activa y de dos no activas.

El dispositivo de posicionamiento de mesa puede comprender, además, componentes de accionamiento en paralelo con dos grados de libertad con al menos dos ejes ortogonales de movimiento y una superficie planaria de guiado.

35 En una implementación preferente, el dispositivo de posicionamiento de mesa comprende, además, un componente de elevación basado en una superficie inclinada de guiado de la cual la primera parte inferior referida está fijada en el accionador y la segunda parte superior referida soporta la unidad de guiado creando una forma de V con el componente opuesto de un par.

40 El dispositivo de posicionamiento de mesa puede comprender, además, un componente de guiado con una superficie cóncava-convexa que conecta la cara superior del componente de elevación con la cara inferior de la mesa.

Todas las unidades de posicionamiento activas pueden estar montadas en una base planaria y en parejas, siendo ortogonales entre sí y ambas sustancialmente paralelas a la superficie de la base.

45 En cada una de las unidades de elevación pueden montarse perpendicularmente unidades de posicionamiento de guiado capaces de permitir movimientos de orientación y desplazamientos para los módulos de posicionamiento y, mediante su acción combinada, que se traslade y/u oriente todo el dispositivo de mesa.

Escogiendo solo parte de los ejes de accionamiento, también puede crearse un dispositivo de posicionamiento de menos de seis gdl.

50 En un cuarto aspecto de la presente invención se proporciona una metodología básica para generar movimiento y desplazamientos espaciales, como secuencias de combinaciones de la totalidad o de algunos de los movimientos y/o desplazamientos de traslación activos generados por el dispositivo de posicionamiento de mesa según el tercer aspecto de la presente invención.

La invención será ilustrada ahora adicionalmente mediante ejemplos operativos. Ha de entenderse que estos ejemplos operativos no limitarán el alcance de la protección de la presente invención y que están pensados y son presentados únicamente con fines ilustrativos.

**Ejemplos**

5 En el contexto real de la invención, la precisión está relacionada con pocos micrómetros (o segundos de arco) (menos de 10), y se refiere a precisión, repetibilidad, resolución y estabilidad (varios micrómetros o segundos de arco/hora).

Con fines de ilustración de la invención, se incluyen los siguientes dibujos:

10 La Fig. 1 representa el concepto topológico 6-4-2<sub>13</sub> del dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante,

la Fig. 2 representa el modelo cinemático general 6-4-(**PI**)<sub>2</sub>XS para el dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante,

15 la Fig. 3 representa el modelo cinemático del mecanismo 6-4-(2**P**)PS para el dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante,

la Fig. 4 es una vista tridimensional del concepto de diseño del dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante,

20 la Fig. 5 es un ejemplo de un módulo de posicionamiento (Pm) y de dos realizaciones de montaje,

la Fig. 6 describe el principio operativo básico para el dispositivo de mesa de posicionamiento.

Se han usado las notaciones siguientes:

Tipo	Cinemática/geometría	Tipo	Diseño/dibujos
A <sub>i</sub> , A	Guiado, Puntos centrales de la plataforma	Ac (A)	Accionadores
B <sub>i</sub> , B <sub>0</sub>	Accionamiento, Puntos fijos de base	B, (B <sub>0</sub> )	Base, Cuerpo (por ejemplo, instrumento)
C <sub>i</sub> , C	Puntos de deslizamiento, Centro de rotación	EI	Unidad de elevación
a <sub>i</sub> , b <sub>i</sub>	Guiado, Distancia de los puntos de accionamiento	F	Medio de fijación (por ejemplo, tornillo)
q <sub>i</sub>	Coordenadas generalizadas (accionadas)	Gu, g	Unidad de guiado, Medio
J	Articulación	H	Alojamiento
Gdl (f)	Grados de libertad (articulaciones)	L, l	Longitudes
K	Cadena cinemática	M (m)	Motor
P, (PI) <sub>2</sub> , S	Articulaciones prismáticas, planarias (2gdl), esféricas	Pm (Pu)	Módulo (unidad) de posicionamiento
R(R <sub>x</sub> ,R <sub>y</sub> ,R <sub>z</sub> )	Movimiento de rotación	p	Columna
T(XYZ)	Movimiento de traslación (desplazamiento)	r, D	Radio, Diámetro
(Σ), (C)	Superficie, Curva	S, s	(Articulación) esférica, Esfera
d	Distancia	Sp	Muestra
I	Uniones	T	Mesa
I, ..., IV	Niveles cinemáticos	W	Cuña
1,2,3,4	Movimiento de articulaciones accionadas	α,β,γ,ψ,φ,θ	Ángulo/movimiento angular (desplazamientos)
i,j=1, ..., 4	Índice (número de puntos, cadenas, etc.)	□,	(Ejes) perpendiculares, paralelos

25 La arquitectura de un dispositivo de posicionamiento es un factor importante en cuanto a sus prestaciones. La estructura elegida, la cinemática, la geometría y el óptimo diseño afectan a los parámetros finales requeridos estáticos, cinemáticos y dinámicos.

30 En la Fig. 1 se propone una representación gráfica de una estructura que funciona como dispositivo de mesa de posicionamiento. El concepto cinemático topológico se basa fundamentalmente en dos cuerpos (o elementos) rígidos: un primer elemento (1) denominado base (B), generalmente fijado al suelo, y un segundo elemento (2), que se supone que se mueve, denominado plataforma, o mesa (T). Ambos están conectados con cuatro cadenas cinemáticas o patas idénticas (K<sub>i</sub>), i=1, ..., 4 una sucesión de pares de uniones rígidas móviles (l<sub>i,1</sub>, l<sub>i,2</sub>) y ternas de articulaciones (J<sub>i,j</sub>) dispuestas en tres niveles (I, ..., III) en la misma sucesión relativa a los gdl (f<sub>ij</sub>=213) de las articulaciones partiendo del elemento primario (1). Todas las articulaciones del primer nivel (I), situado en la base, denominadas articulaciones accionadas (activas) (**J<sub>1i</sub>**) son accionadas (destacadas en negrita y subrayado), mientras que las restantes, situadas en los niveles dos (II) y tres (III) son articulaciones no accionadas, denominadas pasivas,

( $J_{iii}$ ,  $J_{iiii}$ ). Mediante esta disposición estructural simétrica, el grado total de libertad o movilidad ( $M$ ) del mecanismo, calculado con la fórmula de Kuzbach-Grubler,  $M = 6n - \sum_i^j (6 - f_i)$ , para mecanismos espaciales es igual a seis ( $M=6$ ), porque las partes móviles  $n=9$ , el número de articulaciones  $j=12$  y sus grados de libertad  $f_i=2, 1$  y  $3$ , ( $j=1...4, 5...8, 9...12$ ). El resultado es certificar que el mecanismo cinético (6-4-213) tiene plena movilidad espacial, obtenida, sin embargo, al precio de la redundancia. El grado de redundancia proviene de la adición de una cadena ( $Rd_k=1$ ) y del número de accionadores ( $Rd_A=2$ ). De hecho, el anterior gráfico representa no solo un tipo de la topología de los mecanismos, sino toda una familia de PM redundantes de QUATTROPOD (QP) con 6gdl. Cada uno de los miembros depende de la elección particular de articulaciones; por ejemplo, 1-P (prismática), 2-PR (R-de rotación) 3-S (esférica). Estos miembros particulares, muy simétricos, accionados en demasía y limitados en demasía, son propensos a efectuar movimientos estables con cargas pesadas con mayores prestaciones estáticas y dinámicas, debido al mayor número de puntos de contacto/accionamiento y a la mayor potencia en comparación con tres (un trípode) que son, a la vez, más versátiles que las estructuras de seis puntos (hexápodos).

Un modelo cinemático general contribuye a definir un mecanismo particular basado en el catálogo real existente (o en desarrollo) de articulaciones cinemáticas y de sus disposiciones recíprocas generales. También resulta útil formular la metodología de establecimiento de las ecuaciones de entrada/salida (cierre). El anterior gráfico 6-4-213 permite elegir libremente el tipo accionado y no accionado de articulaciones como: 1gdl-lineales (P), de rotación (R), helicoidales (H), 2gdl-(PP), (PR), (RR) y 3gdl-esféricas (S), (UR), (RRR). Podría usarse un par de articulaciones activas con 2gdl basadas en el principio superficie/motor teniendo superficies fijas planarias ( $\Sigma_p$ ), esféricas ( $\Sigma_s$ ), cilíndricas ( $\Sigma_c$ ) o toroidales ( $\Sigma_t$ ), sobre las cuales se efectúan en consecuencia los movimientos (1,...,8) de trayectoria lineal o curvilínea de las correderas, según se muestra en la Fig. 2, que representa las articulaciones motrices 2P, 2R<sub>s</sub>, PR y 2R<sub>t</sub>. Mediante sus acciones combinadas simultáneas o separadas, cada uno de los motores ( $m_1, \dots, m_4$ ) de superficie o puntos de accionamiento  $B_i$  ( $X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) definido por un par de coordenadas generalizadas curvilíneas ( $q_i, q_{i+1}$ ),  $i=1, \dots, 4$  de los mecanismos cambia las posiciones centrales  $A_i$  ( $X_i, Y_i, Z_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) de las articulaciones esféricas (S), que, a su vez, mueven la muestra fijada ( $S_p$ ) y el cuerpo del instrumento (Bo) generalmente en tres direcciones espaciales de traslación y/o rotación (3T/3R). En otras palabras, esto quiere decir que los puntos  $A_i$  se mueven en curvas ( $C_i$ ),  $i=1, \dots, 4$ , cada una de las cuales tiene 2gdl (coordenada  $l_i$ -curvilínea variable; véase también la Fig.3). Tras esto, la posición resultante —los valores de las posiciones (XYZ) y de la orientación ( $\psi, \phi, \theta$ ), respectivamente— de los objetos manipulados depende de: a) los desplazamientos ( $q_i$ ,  $i=1, \dots, 8$ ) de accionamiento y b) valores de parámetros geométricos ( $a_i, b_i, l_i, d_i, L, l, R, r$ ) para un caso general de un mecanismo 6-4-(P)<sub>2</sub>XS (articulaciones X indefinidas con 1gdl, planarias curvilíneas generalizadas (P)<sub>2</sub> con 2gdl). A las articulaciones esféricas compactas (S) se les da una simplificación para formular y resolver la ecuación de movimiento (posición). En este contexto, ( $C_i$ ) y  $A_i$  son denominados, respectivamente, curvas de guiado y puntos guiados. Las ecuaciones de cierre pueden ser fácilmente deducidas expresando sus coordenadas en sistemas cartesianos tanto fijos (B-XYZ) como móviles (A-xyz); los parámetros de entrada (o de salida) (X,Y,Z, $\psi, \phi, \theta$  y  $q_i$ ) están incluidos de manera implícita.

Un esquema cinemático contribuye a entender el comportamiento operativo de un mecanismo y a formular las ecuaciones de movimiento. Los problemas relacionados de posicionamiento (directos/inversos) son resueltos entonces en función de los desplazamientos de entrada/salida y de los parámetros geométricos. En la Fig. 3 se representa una cinemática de mecanismos paralelos para una mesa de posicionamiento basada en el anterior modelo 6-4-(P)<sub>2</sub>XS. Consiste en una disposición simétrica, en parejas, de cuatro cadenas cinemáticas abiertas idénticas (P)<sub>2</sub>XS,  $i=1, \dots, 4$ , cada una de las cuales comprende una articulación accionada planaria (2P) y dos articulaciones —prismática (P) y esférica (S)— que unen una mesa (T) de tipo plataforma de cuatro lados con la base (B) de la misma forma. Las articulaciones (2P) proporcionan 2 gdl en un plano que está situado sobre una superficie base sustancialmente planaria ( $\Sigma_B$ ). Estando las articulaciones accionadas opuestas (2P<sub>1</sub>, 2P<sub>3</sub>/2P<sub>2</sub>, 2P<sub>4</sub>) simétricamente dispuestas, todas tienen su eje de movimiento lineal mutuamente ortogonal unas con otras (por ejemplo,  $P_{11}^0 P_{12}^0$ , etc.) y, subsiguientemente, ortogonal con el eje de otras articulaciones ( $P_{11}^0 P_{22}^0 P_{33}^0 P_{44}^0$ ). Esta combinación simétrica de ejes accionados forma un módulo general de accionamiento ( $A_m$ ) planario 4x2P que proporciona una forma simple y directa de mover la mesa a lo largo de cada uno de los ejes planarios cartesianos horizontales —X ( $X_1, X_2, X_3, X_4$ ) e Y ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ), respectivamente—. Los pares de articulaciones prismáticas opuestas no accionadas (P<sub>13</sub>P<sub>33</sub>/P<sub>23</sub>P<sub>43</sub>) tienen todos idénticos ángulos de inclinación ( $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) con respecto a uno de los ejes accionados. Mediante los dos conjuntos de movimiento de accionadores emparejados, a través de desplazamientos simultáneos y concurrentes, la plataforma se mueve en una dirección ortogonal (Z) con respecto a las anteriores (X e Y) en función de un principio cinemático en V. Los ángulos inclinados pueden ser cualesquiera entre 0 y  $\pi$  radianes (excepto  $\pi/2$ ); en la figura  $\alpha < \pi/2$ . Mediante movimientos simultáneos de un par de articulaciones accionadas en direcciones no relacionadas con el eje de rotación, o, en otras palabras, ortogonalmente con la ubicación del eje de rotación, el resultado es las rotaciones en torno a uno de los ejes ortogonales planarios (por ejemplo,  $-X_1, X_3/Ry$ ), aplicándose el mismo procedimiento para  $Rx(-Y_2, Y_4)$ . El tercer movimiento de rotación (Rz) se obtiene por la acción de las cuatro articulaciones (2P) en la misma dirección de rotación (y al mismo tiempo); por ejemplo,  $Rz/(-X_1, Y_1/-X_2, Y_2/ X_3, -Y_3/(X_4, -Y_4)$ . Mediante esta disposición específica 6-4-(2P)<sub>2</sub>PS (o 6-4-(PP)<sub>2</sub>PS), un dispositivo puede realizar algunos de los movimientos simples de traslación o de rotación a lo largo o alrededor de direcciones triortogonales muy fácilmente y de manera intuitiva mediante movimientos de motor desacoplados, lo que simplifica enormemente su control. Como se afirma fundamentalmente

en todas partes, es suficiente que el número de puntos mínimos para posicionar un cuerpo en el espacio sea tres (3); sin embargo, en este mecanismo paralelo limitado en demasía, pero accionado en demasía, el cuarto accionador (4) actúa como un medio para aumentar las prestaciones cinemáticas (velocidad/aceleración) y/o dinámicas (inercia), además de una evidente estabilidad estática fundamental. Además, si se produce de alguna manera un daño en un eje de movimiento, los restantes podrían soportar el trabajo hasta que se repare al menos un eje motorizado (o pata) (o dos). Nota: Toda la cinemática del mecanismo está basada en el uso de articulaciones de dos tipos únicamente: lineales y esféricas. Esta pequeña diversidad podría reducir los costes totales de fabricación.

Una buena manera de materializar el principio cinemático es un factor clave para satisfacer los rendimientos estáticos, cinemáticos y/o dinámicos requeridos. En la Fig. 4, se propone un concepto general de diseño basado en un modelo cinemático de mecanismo 6-4-(2P)PS. El diseño de la mesa de posicionamiento paralelo redundante (Rd-PPT) consiste en un conjunto de cuatro módulos activos de posicionamiento ( $Pm_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) dispuestos sobre una superficie básica ( $\Sigma_B$ ) sustancialmente planaria y que soportan una mesa (T) de tipo plataforma, teniendo ambas formas poligonales (de cuatro lados). Cada uno de los ( $Pm$ ) comprende dos tipos de unidades de posicionamiento ( $Pu_i$ ,  $i=1, 2$ ) con respecto a su participación en el movimiento general; las primeras son denominadas accionadas y las segundas no accionadas (pasivas). Las  $Pu$  de accionamiento ( $A_{C_i}$ ),  $i=1, \dots, 4$  son medios motrices que proporcionan un movimiento planario con 2gdl activado por cualquiera de los accionadores motorizados bidireccionales lineales existentes o en desarrollo, como, por ejemplo, motores planarios de transmisión directa (DD), procedentes de cada uno de los efectos paso a paso, magnético o piezoeléctrico, o de su combinación, o incluyendo principios de accionamiento electromecánico en paralelo, en serie o híbrido (paralelo-serie/serie-paralelo), o una solución estándar (motor-reductor-tornillo de transmisión-guías). La última, en el caso de una etapa XY, proporciona gran estabilidad de movimiento en el tiempo; sin embargo, no tiene mucho a su favor para ser preferida, debido a dificultades en la gestión de cables y de los errores recíprocos resultantes (por ejemplo, perpendicularidad, etc.) con su efecto directo en la precisión. (Nota: DD significa mover la carga directamente sin ningún mecanismo de transmisión, tales como poleas, correas de distribución, tornillos de bola y engranajes que permiten un posicionamiento tanto de gran precisión como de alta velocidad. Para carreras grandes, tienen que valer de una tecnología de servomotores avanzada para garantizar una estabilidad elevada).

Los segundos tipos de  $Pu$  incluyen medios de elevación (EI) y guiado (Gu), respectivamente.

Las unidades (EI) se basan en un principio de movimiento de cuña planaria consistente en dos partes —inferior, fija en ( $A_{C_i}$ ), y superior, de apoyo ( $Gu_i$ )— que tienen superficies planarias recíprocamente inclinadas de movimiento y medios auxiliares de guiado ( $g_i$ ). Por su movimiento relativo, y siguiendo el resultado de los movimientos combinados de la o las unidades accionadas, la parte superior se moverá ascendente y descendentemente limitada por la distancia de dos ( $Pm_i$ ) opuestos. Para cargas pesadas y movimientos de precisión, la manera simple de materializarlos es que tengan superficies deslizantes planas. Sin embargo, también pueden tenerse en consideración otras superficies de contacto, como (raíles) de rodadura/rodados o principios a base de fluidos (aire, líquido) si se adecuan a los rendimientos finales requeridos.

Las  $Pu$  de guiado ( $Gu_i$ ) están basadas en un principio de movimiento esférico y consisten en al menos dos partes: inferior, fija en la parte superior de ( $Ei_i$ ), y superior, que soporta la mesa (T) y le da ocasión de que sea orientada en tres dimensiones. El movimiento relativo de las partes anteriores involucra a una superficie esférica de guiado para que la mesa (T) realice los movimientos de rotación requeridos. El tipo puede ser cualquier diseño entre articulaciones compactas de rotación simple (RRR) —de principio de articulaciones rodantes, deslizantes esféricas (S) o incluso separadas— y una combinación de las mismas (UR/RU). Dependiendo de las aplicaciones, puede contemplarse otro principio funcional, dado que también puede tenerse en consideración aire o cualquier fluido.

El óptimo diseño, que incluye el tamaño y el tipo de los componentes, afecta no solo a los rendimientos finales, sino a todas las características y a la vida útil del dispositivo. En la Fig. 5, se muestran una realización de módulo de posicionamiento ( $Pm$ ) y dos disposiciones particulares para todos los dispositivos. El ( $Pm$ ) está basado en una combinación apilada de tres unidades básicas de posicionamiento ( $Pu_i$ ,  $i=1, 2, 3$ ): a) un primer tipo activo/acccionado (A) ( $Pu_1$ ), y b) tipos de articulación inactivos (pasivos) de cuña (W) y esférico (S) segundo ( $Pu_2$ ) y tercero ( $Pu_3$ ), respectivamente.

La  $Pu$  (A) está basada en el principio de accionamiento en paralelo, consistente, en principio, en una base (b) de forma cuadrada sobre la cual un par de dos unidades similares ( $A_{11}, A_{12}$ ) de accionamiento lineal, siendo cada uno de los ejes de movimiento ( $t_1, t_2$ ) ortogonales entre sí, mueve, en principio, un motor rectangular que es solidario con una mesa (t), en principio de la misma forma que (b) y fijado por varios medios (al menos cuatro) de fijación ( $f_1$ ) y de centrado (por ejemplo, al menos un pasador). Además, la (t) tiene, en principio, una superficie plana que soporta la siguiente  $Pu$  (W). Cada una de las unidades individuales de accionamiento ( $A_{11}$ ) y ( $A_{12}$ ) comprende, preferentemente, un motor lineal accionado ( $m_{11}$ ) y ( $m_{12}$ ) con una parte fijada a la base y otra (empujador) moviéndose libre y teniendo un conjunto ( $g_1, g_2$ ) de guiado perpendicular y coplanario en un extremo con una parte (preferentemente, el rail) fijada en (M). Empujando (o traccionando) ( $A_{11}$ ) o ( $A_{12}$ ), el (M) es forzado a moverse en direcciones ortogonales ( $t_{11}$  o  $t_{12}$ ) y a lo largo de cada una de las mismas, pero, de forma más específica, en un movimiento planario (general) ( $t_1$ ) mediante su acción combinada. Esta unidad de accionamiento (A) ortogonal podría desarrollarse más, reforzando su potencia mediante la adición de otra unidad de accionamiento  $A'$  ( $A'_{11}, A'_{12}$ ),

preferentemente ortogonal. Así, cada una de las unidades principales simples de accionamiento funciona en tándem con las adicionales ( $A_{11}, A'_{11} / A_{12}, A'_{12}$ ) para realizar ciclos de movimientos intensivos mediante la plena operación de los cuatro (4) accionadores o contribuyendo como una operación parcial —por ejemplo, en el caso de operar solo tres (3)—. Esta unidad de accionamiento (A,A') completamente nueva se adecua aún mejor a la forma cuadrada de la base (b) y de la mesa (t), formando, si es necesario, una unidad alimentada muy equilibrada fuerte y compacta. No hay ninguna limitación particular en los usos específicos de varios accionadores lineales en paralelo adicionales, en número, por ejemplo, de tres, cinco, etc., ni, en consonancia, en la forma poligonal correspondiente de la base/mesa; sin embargo, dos es el mínimo. En principio, los medios de guiado ( $g_{11}, g_{12}$ ) son, preferentemente, del principio deslizante, pero también podrían ser de cualquier otro; por ejemplo, rodante, magnético, etc. Esta solución de accionamiento en paralelo en la base, además de la ventaja de poder proporcionar una solución sin cables móviles, con efecto directo en la mayor precisión, puede usar medios específicos de guiado para cargas pesadas para el motor (M); por ejemplo, rodamientos planarios ( $\Sigma_1$ ) con 2gdl. Y, en el caso de más de dos accionadores, abre el camino a escoger motores y componentes de menos tamaño para un módulo de accionamiento más compacto de bajo perfil dentro de los mismos parámetros de potencia que dos unidades. En todos los casos, pueden aplicarse sensores para un movimiento más preciso.

La unidad  $Pu_2$  consiste en un conjunto de cuña (W) —una parte inferior fija ( $W_{21}$ ) y una parte superior amovible ( $W_{22}$ )— que, en principio, tiene la misma superficie con forma de apoyo, de forma similar a la de la unidad A de la mesa (t).

Mediante el movimiento relativo de este par, a través de los medios específicos de guiado ( $g_{21}, g_{22}$ ) con superficies ( $\Sigma_{21}, \Sigma_{22}$ ) con perfil de surco en V, la parte superior puede ser regulada con precisión para un movimiento uniforme y preciso contra la inferior mediante una nervadura flexible (n) cortada a lo largo de una de las guías ( $g_{21}, g_{22}$ ) de deslizamiento y fijada entonces con varios (al menos dos) medios de fijación ( $f'_2$ ); por ejemplo, tornillos. Las guías ( $g_{21}, g_{22}$ ) podrían tener cualquier otra forma que se adecue al alcance —por ejemplo, angular— o incluso otros medios para llevar a cabo el movimiento resultante de traslación ( $t_2$ ), basado en un principio de rodadura —por ejemplo, bolas, raíles de rodillos transversales y soportes—; o, para requisitos de movimiento más preciso, las guías de aire.

La  $Pu_3$  es la unidad de posicionamiento de articulación esférica (S) que comprende, preferentemente, una esfera (s) —por ejemplo, una bola de calibración fabricada con fines metrológicos con pequeños errores de esfericidad— encapsulada (pero móvil) en dos alojamientos ( $H_1, H_2$ ) con superficies cóncavas recíprocas ( $\Sigma_{31}, \Sigma_{32}$ ), y soportada por una columna cónica truncada (p). ( $H_1$ ) contiene ( $H_2$ ) y tiene una superficie externa de guiado (g) para un montaje preciso y uniforme con la mesa (T) usando varios (al menos cuatro) medios de fijación ( $f_3$ ) de tipo tornillo. Los ( $H_1$ ) y ( $H_2$ ) son regulables para permitir la rotación uniforme de las esferas convexas-cóncavas con centro sustancialmente coaxial; el eje de soporte de la columna cónica está montado perpendicularmente, en principio, sobre la superficie planaria de soporte de la cuña superior ( $W_{22}$ ). Entre los movimientos relativos de las tres superficies, es preferible que exista el principio de un contacto deslizante.

En la Fig. 5b se materializan dos realizaciones preferentes que usan los anteriores ( $Pm_i$ ) como partes de conjuntos enteros de dispositivos de posicionamiento de mesa paralelo. Las realizaciones consisten en usar los cuatro preferentemente idénticos de los anteriores módulos (Pm) acoplados en parejas ( $Pm_1, Pm_3 / Pm_2, Pm_4$ ) que están dispuestos de manera circunferencial y equidistante alrededor de un eje vertical común de simetría tanto de la base como de la mesa con el mismo tamaño de formas cuadradas ( $a=b$ ). Los ejes de simetría de las patas de accionamiento/apoyo cruzan: a) los puntos centrales, Fig. 5b1 y b) las esquinas, Fig. 5b2, del cuadrado de accionamiento (b)/soporte (a), respectivamente. Se espera que, en ambos casos, la base rígida (B) sea una superficie (placa) plana unida directamente a una superficie más generalmente plana de la estructura básica de la máquina (difractor); o, a través de un dispositivo adicional (por ejemplo, gonioetapas). Obsérvese que la base y la mesa plana también podrían tener diversas formas poligonales planarias además de la cuadrada; por ejemplo, octagonal. En ambas realizaciones, las articulaciones esféricas están preferentemente fijadas mediante tornillos a la mesa a través de agujeros parcialmente pasantes ( $h_i$ ) mecanizados en la superficie inferior de la mesa y de superficies de guiado ( $g_3$ ) fabricadas con precisión. El diagrama operativo de obtención de movimientos simples —por ejemplo, traslaciones X e Y— es igual en ambas variantes. Pero, para las restantes, es como sigue: 1) el movimiento se produce como a) cuatro (4) ejes y b) ocho (8) ejes y 2)  $R_x$  y  $R_y$  como a) dos (2) ejes y b) ocho (8) ejes trabajando conjuntamente (Fig. 5.b1) con influencia directa en los parámetros de posicionamiento y, subsiguientemente, en los rendimientos. Además, la distancia (d) entre módulos es diferente: a)  $d_a$  y b)  $d_b$  ( $d_a < d_b$ ), respectivamente. Esto quiere decir que el dispositivo en el caso b) puede ser diseñado con menor espacio de ocupación (compacidad) o con una mayor abertura central (D) para el mismo espacio de ocupación para una gestión más fácil de los cables, como es necesario muy a menudo en entornos de difractor. Por el anterior diseño, tanto del componente (Pm) como de todo el conjunto, la mesa de posicionamiento paralelo presenta un alto grado de modularización y de reconfigurabilidad; y con un producto de rentabilidad aceptable, porque hay implicadas relativamente pocas partes y son simples.

La manera de producir los movimientos de salida en función de los movimientos (o desplazamientos) aferentes de entrada es una etapa necesaria para entender el comportamiento operativo y para evaluar las prestaciones de un nuevo dispositivo. En la Fig. 6 se describe el procedimiento del principio operativo básico. Se supone que el

dispositivo Rd-PPT tiene transmisión directa (motores planarios) en la posición nominal (Pn). Esto quiere decir una orientación nula ( $R_x=R_y=R_z=0$ ) y desplazamientos para el centro de la mesa ( $A$ ;  $X=Y=0$ ,  $Z=h$ ) que corresponden a desplazamientos nulos en las unidades de accionamiento  $\underline{Ac}_i$  ( $B_i$ ;  $\underline{X}_1=\underline{Y}_1=0$ ;  $\underline{X}_2=\underline{Y}_2=0$ ;  $\underline{X}_3=\underline{Y}_3=0$ ,  $\underline{X}_4=\underline{Y}_4=0$ ). Las secuencias básicas de movimiento —a) X, Y o Rz y b) Rx, Ry y Z— impuestas a la mesa son vistas en relación con los cambios en los módulos de accionamiento ( $\underline{Ac}_i$ ). La posición final (Pf) es marcada como una línea de puntos y rayas.

Los movimientos de traslación de avance y de retroceso a lo largo del eje X ( $T_x$ ) se realizan por un movimiento sincronizado de todos los accionadores a lo largo del eje especificado y en la misma dirección ( $t_{i1}$ ,  $i=1, \dots, 4$ ); estando inactivados (o libres) los restantes movimientos a lo largo del eje Y ( $t_{i2}$ ,  $i=1, \dots, 4$ ), Fig.6,a1. Suponiendo un desplazamiento positivo (X) del punto (A) de la posición inicial a la final (A'), todos los motores relacionados con el mismo eje deben ser activados y ser movidos en la misma dirección con los mismos valores ( $X=\underline{X}_1=\underline{X}_2=\underline{X}_3=\underline{X}_4$ ); o al menos tres de ellos (el cuarto podría estar inactivado en esta dirección). Por ejemplo, si se mueven  $\underline{Ac}_1(\underline{X}_1)$ ,  $\underline{Ac}_2(\underline{X}_2)$  y  $\underline{Ac}_3(\underline{X}_3)$ , entonces  $\underline{Ac}_4(\underline{X}_4)$  podría estar completamente libre. Existen las relaciones siguientes:  $X=\underline{X}_1=\underline{X}_2=\underline{X}_3(=\underline{X}_4)$ ;  $\underline{Y}_1=\underline{Y}_2=\underline{Y}_3=\underline{Y}_4=0$ .

Se aplica el mismo procedimiento al segundo eje ortogonal y coplanario (Y), Fig. 6,a2. Los movimientos de traslación de avance y de retroceso a lo largo del eje Y ( $T_y$ ) se realizan por un movimiento sincronizado de todos los accionadores a lo largo del eje especificado ( $t_{i2}$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) y en la misma dirección. Suponiendo un desplazamiento lineal a lo largo del eje Y del punto A(Y), los movimientos sincronizados de todas las unidades de accionamiento ( $\underline{Ac}_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) relacionadas con el eje Y deben ser activadas y ser movidas en la misma dirección ( $Y=\underline{Y}_1=\underline{Y}_2=\underline{Y}_3=\underline{Y}_4$ ); o al menos tres de ellas. Eso quiere decir, por ejemplo, si  $\underline{Ac}_1(\underline{Y}_1)$ ,  $\underline{Ac}_2(\underline{Y}_2)$  y  $\underline{Ac}_3(\underline{Y}_3)$  están activadas y se mueven,  $\underline{Ac}_4(\underline{Y}_4)$  puede estar inactivada:  $Y=\underline{Y}_1=\underline{Y}_2=\underline{Y}_3(=\underline{Y}_4)$ ;  $\underline{X}_1=\underline{X}_2=\underline{X}_3=\underline{X}_4=0$ .

Los movimientos de traslación verticales de la mesa de avance y de retroceso ( $T_z$ ) pueden realizarse mediante movimientos simultáneamente concurrentes de todas las unidades de accionamiento ( $\underline{Ac}_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ), Fig.6,b3 o al menos tres de ellas. Suponiendo el desplazamiento del punto A a lo largo del eje Z (Z), entonces se activan todas las unidades de accionamiento ( $\underline{Ac}$ ) y los pares se mueven juntos concurrentemente en la dirección opuesta hacia el eje Z,  $Z=\text{tg}\alpha\underline{X}_1=\text{tg}\alpha\underline{Y}_2=\text{tg}\alpha\underline{X}_3(=\text{tg}\alpha\underline{Y}_4)$  o hacia el punto (B) —el centro de la base—; o al menos tres de ellas (estando inactivada la cuarta correspondiente). Eso quiere decir, por ejemplo, que  $\underline{Ac}_1(-\underline{X}_1)$ ,  $\underline{Ac}_2(\underline{Y}_2)$  y  $\underline{Ac}_3(\underline{X}_3)$  están activadas y se mueven, y  $\underline{Ac}_4(\underline{Y}_4)$  no.

Las rotaciones simétricas alrededor del eje X o del Y ( $R_x$  o  $R_y$ ) se logran mediante movimientos lineales de avance y de retroceso combinados ( $t_{i1(2)}$ ,  $i=1, 2$ ) de un par de dos accionadores  $\underline{Ac}_i$  ( $i=1, 2$ ), o al menos de uno no colineal con el eje de rotación, Fig.6,b1 y b2. Para obtener un desplazamiento angular positivo  $\alpha(\beta)$ , deben llevarse a cabo simultáneamente acciones de desplazamientos lineales en direcciones opuestas a lo largo de los correspondientes ejes ortogonales. Por ejemplo, para  $R_x(\alpha)$  se impone que  $\underline{Ac}_2(-\underline{Y}_2)$  y/o  $\underline{Ac}_4(-\underline{Y}_4)$  funcionen, y para  $R_y(\beta)$  se impone que lo hagan  $\underline{Ac}_1(\underline{X}_1)$  y  $\underline{Ac}_3(\underline{X}_3)$ , para lo cual  $\alpha(\beta)=\arctg(Z_i/a_i)$ , siendo  $Z_i=\underline{X}_i(\underline{Y}_i)\arctg(\alpha_i)$ . Las rotaciones simétricas alrededor del eje Z ( $R_z$ ) se logran mediante movimientos lineales de avance y de retroceso combinados ( $t_{i12}$ ,  $i=1, \dots, 4$ ) de todo el conjunto de cuatro accionadores  $\underline{Ac}_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ), o al menos tres de ellos, Fig.6,b3. Para obtener un desplazamiento angular positivo  $\gamma$ , deben llevarse a cabo simultáneamente acciones de desplazamientos lineales en la misma dirección alrededor del eje Z. Por ejemplo, para  $R_z(\gamma)$  se impone que  $\underline{Ac}_1(-\underline{X}_1, \underline{Y}_2)$ ,  $\underline{Ac}_2(-\underline{X}_2, -\underline{Y}_2)$  y  $\underline{Ac}_3(\underline{X}_3, -\underline{Y}_3)$  funcionen, para lo cual  $\gamma = \arctg(Y_i/X_i)$ .

En consecuencia de lo anterior, escogiendo varios puntos de accionamiento y apoyo de cuatro patas como un número intermedio entre los tres puntos necesarios para una estabilidad mínima y el máximo de seis impuesto para prestaciones de movilidad total, y usando accionadores lineales bidireccionales compactos, esta mesa de posicionamiento paralelo proporciona una solución de compromiso entre una precisión, una velocidad y una estabilidad mayores y la pericia, pudiendo acometer trayectorias de posicionamiento tridimensional de gran potencia y de gran rendimiento energético.

El anterior concepto de mesa de posicionamiento paralelo redundante (Rd-PPT) puede ser aplicado para aplicaciones automatizadas precisas, de alta velocidad de tipo mesa o impulsadas manualmente, como, por ejemplo: alineamiento, simulación, mecanizado, montaje, medición, control o ensayo o cualquier otra operación, de procesos mecánicos, ópticos, de semiconductores (litografía, LCD, obleas, impresión, etc.) en los campos de la fabricación, de la aviación, médico o biotecnológico, incluyendo su uso en entornos extremos (de vacío, criogénicos, magnéticos, etc.).

Los ejemplos anteriormente descritos proporcionan un dispositivo y un procedimiento para poner un cuerpo o varios cuerpos pesados automáticamente (o manualmente) en el espacio con la precisión, la velocidad y la estabilidad requeridas. El dispositivo de mesa de posicionamiento está basado en un mecanismo cinemático paralelo espacial simétrico redundante con seis grados de libertad, miembro de la familia QUATTROPOD. Cada pie (pata) está construido como un módulo de posicionamiento de apoyo vertical accionado por una unidad motorizada con dos grados de libertad en paralelo con motores situados en la base y que soporta dos no motorizadas: las unidades de posicionamiento de elevación y de guiado, respectivamente. Las unidades de elevación consisten en dos sistemas opuestos de cuñas dispuestos en parejas tras las unidades de posicionamiento de guiado con tipos de rodamientos

esféricos. Mediante sus acciones combinadas, una mesa de tipo plataforma puede ser movida de forma fácil e intuitiva en direcciones cartesianas lineales y rotacionales. Para manipular cargas pesadas, como suelen serlo en aplicaciones de sincrotrones, el dispositivo tiene características de tamaño compacto, perfil bajo y estructura simple, que proporcionan rigidez, precisión y prestaciones de posicionamiento rápido mayores en comparación con la técnica anterior.

5

## REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante (Rd-PPT) que comprende:  
 una base estacionaria (B); una mesa amovible (T) que es capaz de moverse con respecto a la base estacionaria en los seis grados de libertad (6gdl),  
 5 en el que la mesa amovible tiene una superficie de fijación ( $\Sigma_T$ ) sobre la cual pueden montarse una muestra (Sp) o cuerpos relacionados (Bo) para investigaciones;
- al menos un conjunto de cuatro patas de apoyo, siendo una redundante, como cadenas cinemáticas (K)  $\geq 13$ , dispuestas simétricamente y en parejas alrededor del centro de la base conectadas con un extremo a la base estacionaria y con el otro extremo a la mesa amovible.
2. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según la reivindicación 1 en el que el dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo es modular y tiene las patas de apoyo como módulos de posicionamiento (Pm), dispuestos verticalmente en paralelo con respecto a un eje de simetría (Z) y ortogonales con respecto a un segundo eje de simetría (X / Y), como columnas activas con 2gdl.
3. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según la reivindicación 1 o 2 en el que cada uno de los módulos de posicionamiento es una combinación apilada de una unidad de posicionamiento activa Ac — accionada de forma planaria—, y dos unidades de posicionamiento (Pu) no activas, Ei —de elevación inclinada— y Gu —de guiado esférico—, de las cuales las dos primeras (Ac, Ei) son bloques paralelepípedicos compactos con la misma forma y el mismo tamaño de la base.
- 20 4. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según la reivindicación 3 en el que, además, la unidad de posicionamiento activa Ac puede ser una unidad  $\underline{A}$  de accionamiento en paralelo con 2gdl que comprende cuatro ejes ortogonales de movimiento, a lo largo de los cuales, dos de ellos, adyacentes, accionan un conjunto de dos partes lineales de accionamiento ( $\underline{A}11$ ,  $\underline{A}12$ ), siendo otro redundante ( $\underline{A}'11$ ,  $\underline{A}'12$ ), perpendicularmente a los lados de un motor común (M) con superficie planaria de guiado ( $\Sigma_1$ ).
- 25 5. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según la reivindicación 3 o 4 en el que la unidad de posicionamiento (Ei) de elevación del dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo comprende un par de cuñas paralelas (W) con superficies de guiado inclinadas ajustables ( $\Sigma_{21}$ ,  $\Sigma_{22}$ ) en V de las cuales la parte inferior (W1) está fijada en el accionador (A) y la parte superior (W2) soporta las unidades esféricas S de posicionamiento, creando una forma de V con la pata opuesta de una unidad de posicionamiento Ei.
- 30 6. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5 en el que una unidad de posicionamiento de guiado (Gu) es una articulación esférica compacta (S) que tiene formas esféricas cóncavas-convexas en contacto con superficies ajustables ( $\Sigma_{31}$ ,  $\Sigma_{32}$ ), en el que una primera parte es una columna cónica truncada (p) con una esfera (S) con calibrado de precisión en un extremo, y otra montada perpendicularmente en la cara superior de la elevación (Pu) que aloja las partes interconectadas (H1, H2) integradas en la cara inferior de la mesa.
- 35 7. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en el que las cuatro articulaciones planarias  $2P$  están montadas en parejas ( $2 \times 2P$ ) sobre la base estacionaria, teniendo ejes mutuamente ortogonales ( $P1P3/P2P4$ ) y sustancialmente paralelos a la superficie de la base estacionaria ( $\Sigma_B$ ) formando un módulo de accionamiento coplanario (Am), como parte de un mecanismo cinemático paralelo 6-4-( $2P$ )PS, con solo articulaciones lineales y esféricas, respectivamente, y articulaciones pasivas (P), estando todas inclinadas el mismo ángulo  $\alpha$ .
- 40 8. El dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según las reivindicaciones 2 a 7 en el que los módulos de posicionamiento (Pm) están situados en los lados centrales, o en las esquinas del cuadrado de la base estacionaria y/o de la mesa amovible en términos de una abertura central (D).
- 45 9. El uso de una mesa de posicionamiento paralelo redundante según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 para generar movimientos espaciales cartesianos simples: traslaciones —TX o TY o TZ— y rotaciones —RX o RY o RZ— y desplazamientos lineales —X o Y o Z— y angulares — $\alpha X$  o  $\alpha Y$  o  $\alpha Z$ —, como implicación directa de movimientos con desplazamientos iguales o equivalentes, usando la totalidad o solo algunos de los movimientos ( $t11, t12, \dots, t41, t42$ ) y desplazamientos ( $X1, Y1, \dots, X4, Y4$ ) lineales de los correspondientes ejes activos.
- 50 10. Un dispositivo de mesa de posicionamiento paralelo redundante según la reivindicación 1 en el que cada una de las patas  $\geq 13$  comprende una articulación de accionamiento planario generalizado ( $\underline{P}$ ) $_2$  con 2 gdl, como un par compuesto de un motor m y una parte de superficie fija curvilínea esférica  $\Sigma_S$ , o toroidal  $\Sigma_T$  o cilíndrica  $\Sigma_C$ , pudiendo m deslizarse en dos direcciones ortogonales ( $q1, q2$ ) como parte de mecanismos paralelos generales 6-4-( $\underline{P}$ ) $_2$ XS, estando las articulaciones esféricas (S) siempre en el último nivel, y siendo X una articulación no especificada (P, R, H) con 1 gdl.
- 55

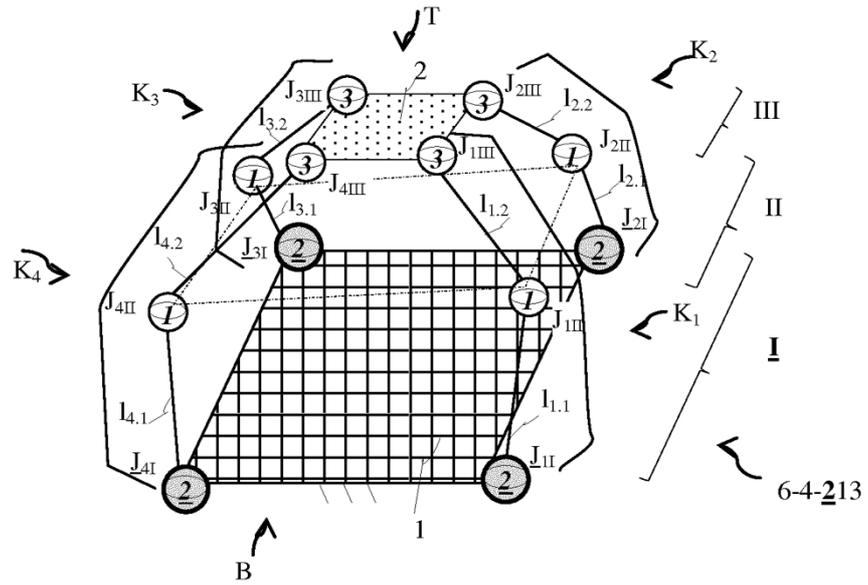


Fig. 1

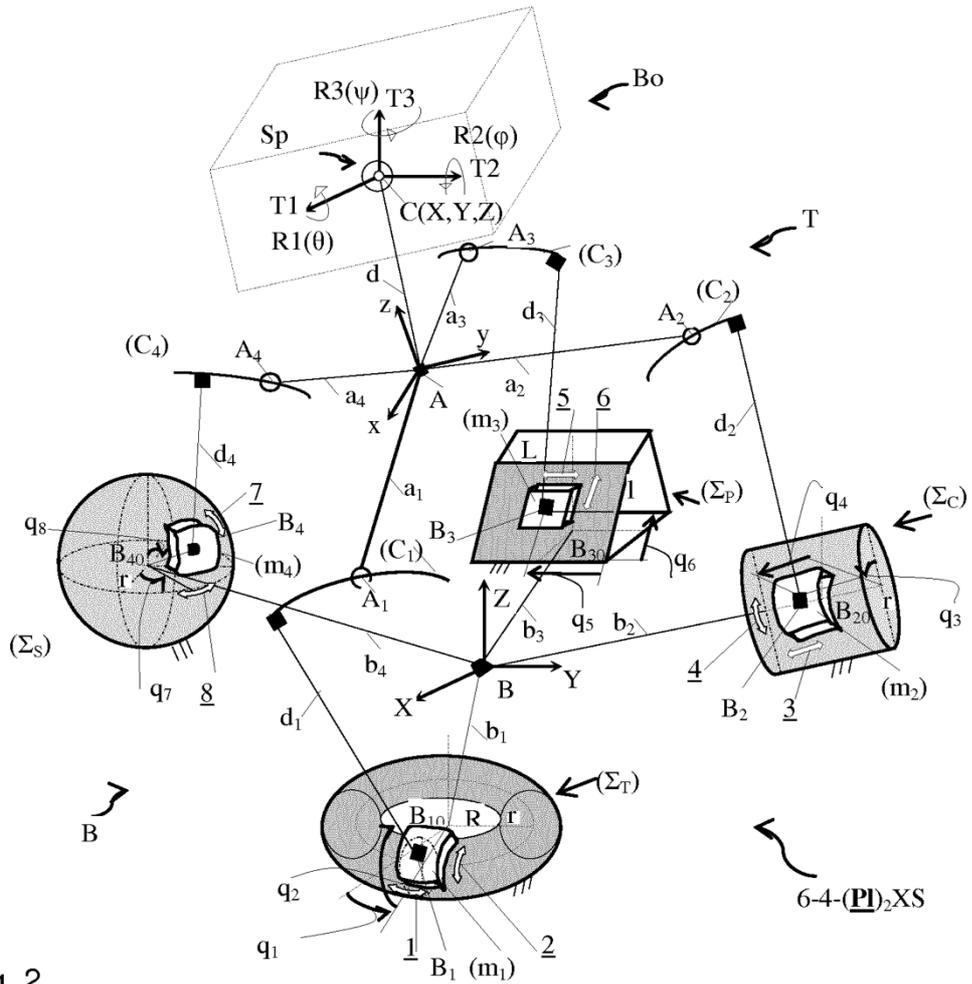


Fig. 2

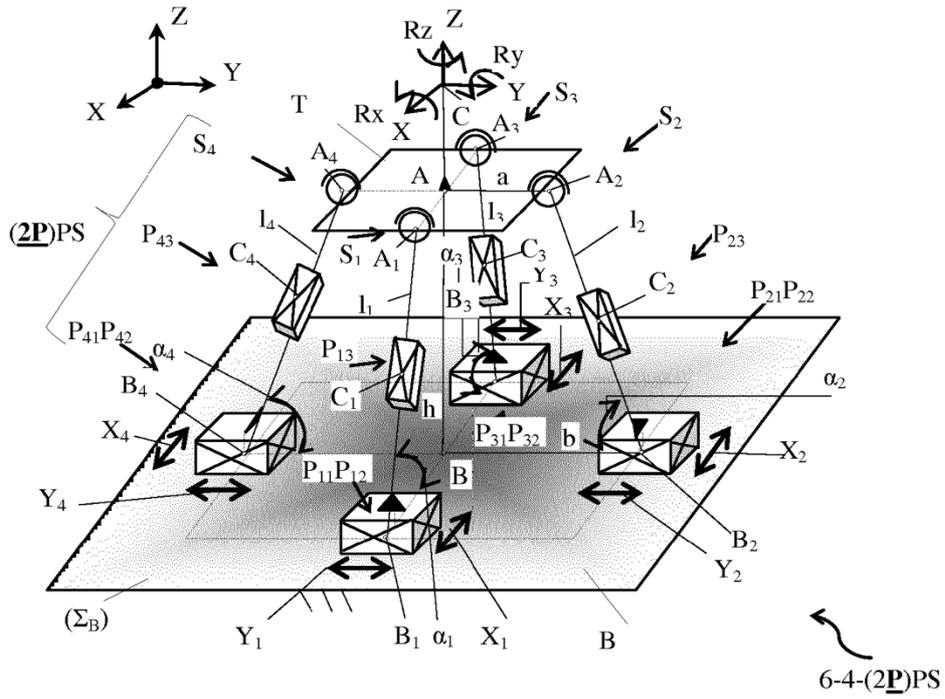


Fig. 3

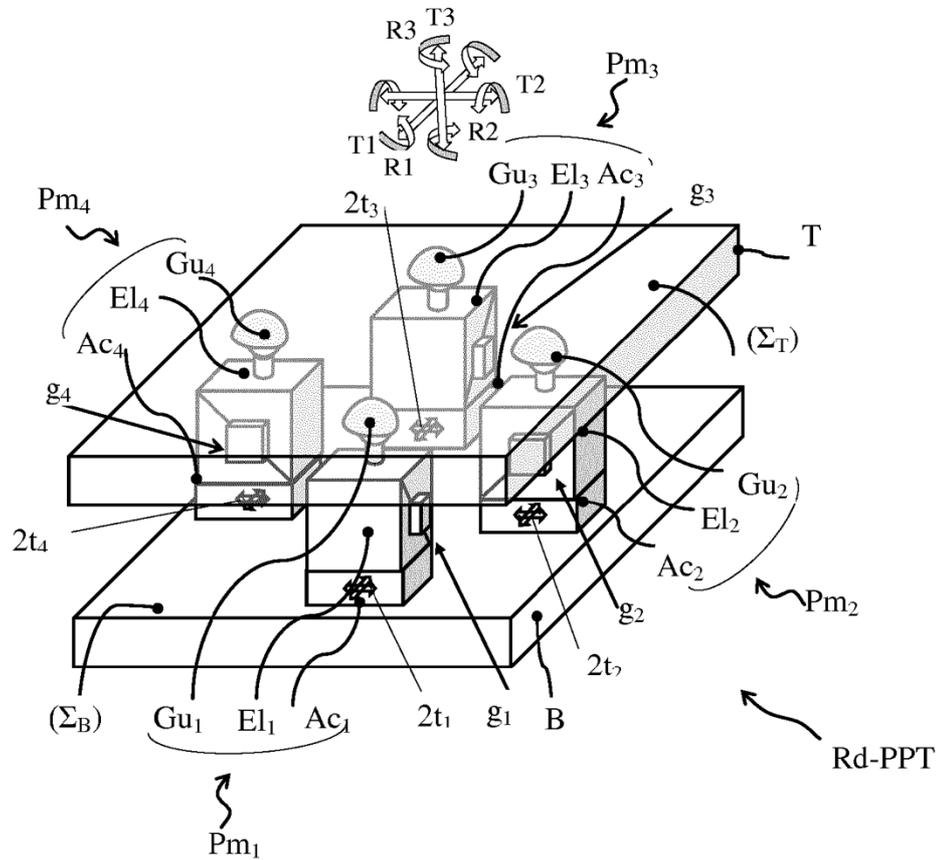
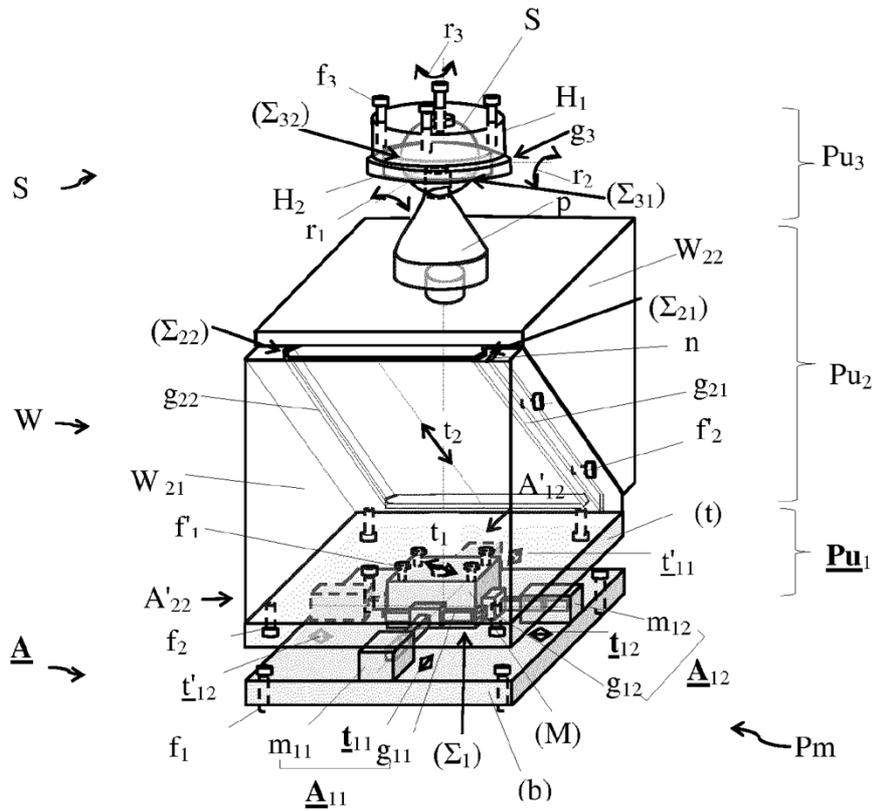
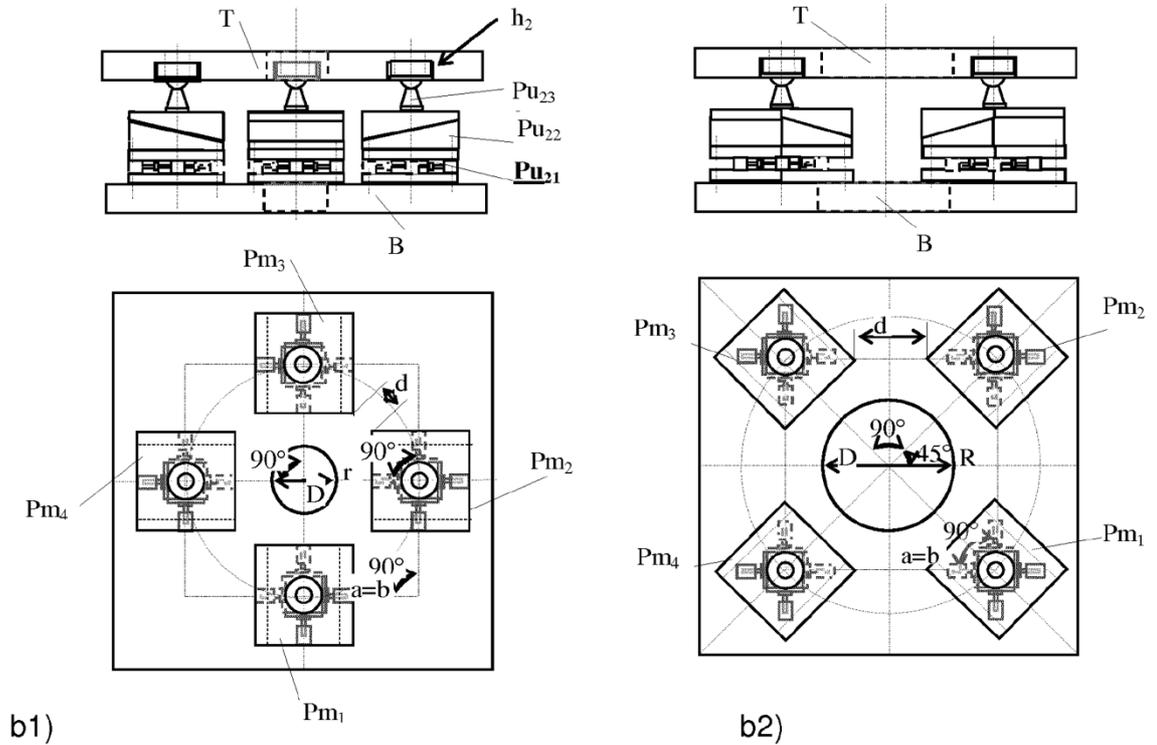


Fig. 4



a)



b1)

b2)

Fig. 5

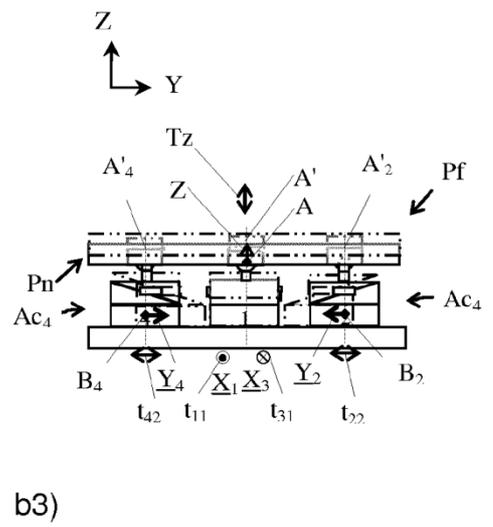
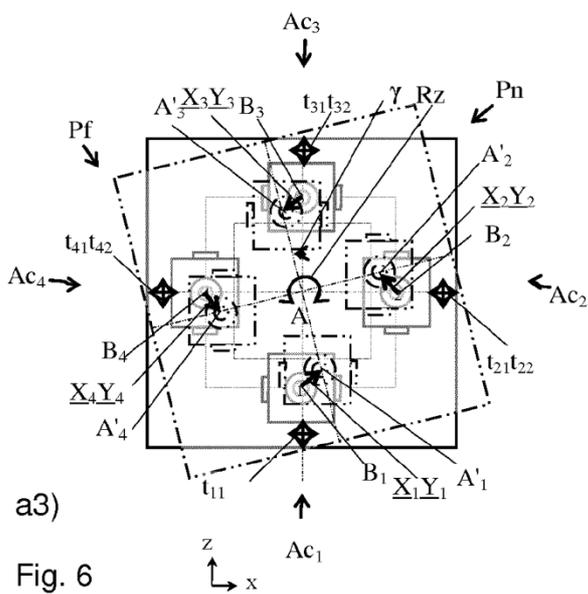
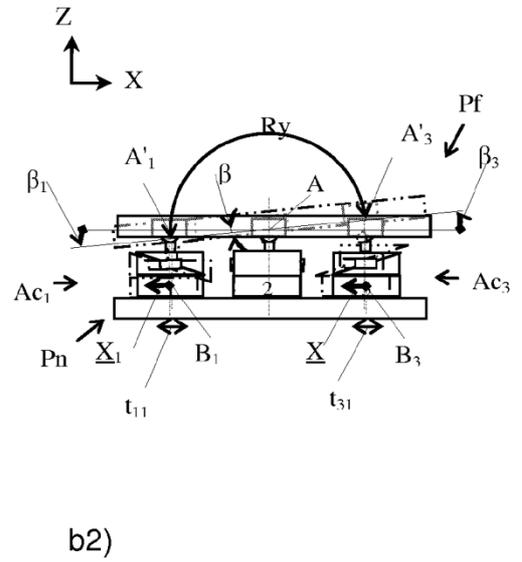
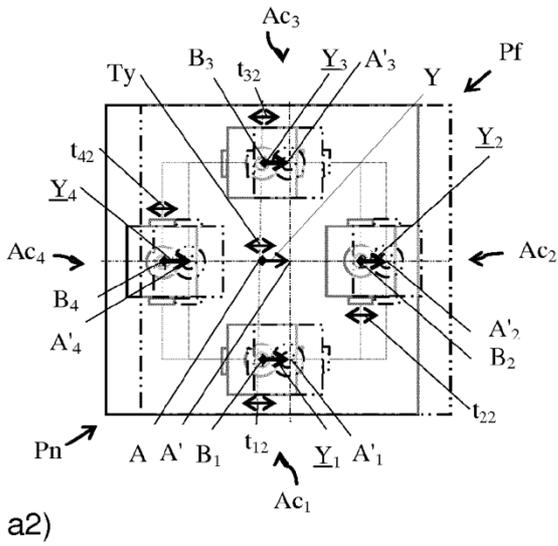
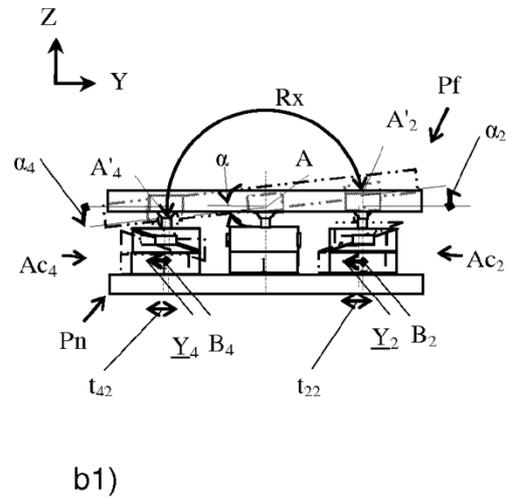
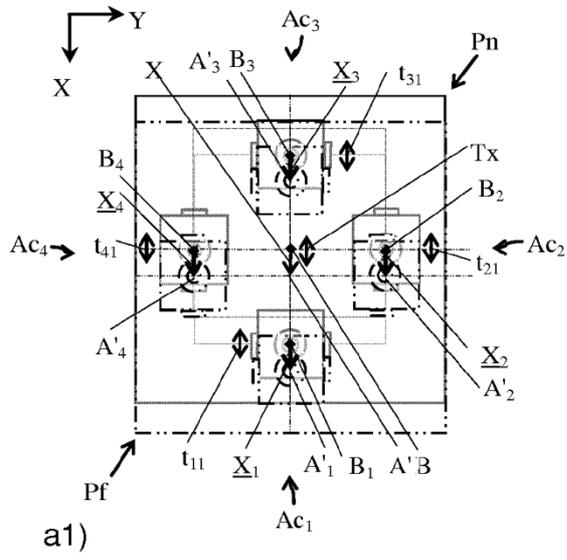


Fig. 6