

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 689 093**

51 Int. Cl.:

B25J 9/04 (2006.01)

A61B 34/00 (2006.01)

A61B 34/30 (2006.01)

A61B 34/37 (2006.01)

A61B 90/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.02.2007 PCT/EP2007/051044**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.08.2007 WO07088206**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.02.2007 E 07704331 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.07.2018 EP 1984150**

54 Título: **Sistema robótico médico con brazo manipulador del tipo de coordenadas cilíndricas**

30 Prioridad:

03.02.2006 EP 06101250

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

08.11.2018

73 Titular/es:

**THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY
(EURATOM), REPRESENTED BY THE EUROPEAN
COMMISSION (100.0%)
200, rue de la Loi
1049 Brussels , BE**

72 Inventor/es:

RUIZ MORALES, EMILIO

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 689 093 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

Sistema robótico médico con brazo manipulador del tipo de coordenadas cilíndricas

Campo de la invención

5 La invención reivindicada se refiere al campo del equipamiento médico y, más particularmente, a un sistema robótico médico para llevar a cabo procedimientos médicos, en particular procedimientos quirúrgicos tales como procedimientos mínimamente invasivos.

Antecedentes de la invención

10 Es bien sabido que, a diferencia de la laparotomía, los procedimientos médicos mínimamente invasivos tienen la ventaja de reducir la cantidad de tejido extraño que se daña durante los procedimientos diagnósticos o quirúrgicos. Esto da como resultado un tiempo de recuperación del paciente más corto, menos molestias y efectos secundarios nocivos, y menores costes de la estancia hospitalaria. Hoy en día, en las especialidades de cirugía general, urología, ginecología y cardiología, se produce un aumento de la cantidad de operaciones quirúrgicas realizadas mediante técnicas mínimamente invasivas, tales como las técnicas laparoscópicas.

15 Sin embargo, las técnicas mínimamente invasivas, en general, y la laparoscopia, en particular, establecen requisitos más estrictos para el cirujano que realiza la operación. El cirujano opera en una postura incómoda y agotadora, con un campo de visión limitado, libertad de movimiento reducida y mala percepción táctil. A estos problemas se suma el hecho de que los cirujanos a menudo tienen que llevar a cabo varias intervenciones consecutivas por día, durando cada intervención, por ejemplo, de 30 minutos a varias horas. A pesar de estas dificultades, la tendencia a procedimientos mínimamente invasivos probablemente aumentará de manera importante en los próximos años, debido al envejecimiento de la población y a la presión de los costes en el sector médico.

20 En laparoscopia, obviamente es necesario que el cirujano sea tan preciso en sus movimientos como en laparotomía. La manipulación de instrumentos de eje largo con una destreza de movimiento reducida a cuatro grados de libertad alrededor de un fulcro en el orificio de acceso del instrumento, es decir, en la incisión en el cuerpo del paciente, no está aliviando esta tarea. Las complicaciones surgen, entre otras cosas, por el hecho de que la postura requerida es bastante agotadora y reduce la ya limitada percepción de las fuerzas que interactúan entre el instrumento y los tejidos. Por ejemplo, cuando el cirujano permanece de pie al lado del paciente, debe levantar y mantener estirado uno de sus brazos para sostener el instrumento introducido en el lado opuesto del paciente. Como resultado, las capacidades motrices del cirujano se reducen, normalmente, después de 20 a 30 minutos, de modo que, entre otros, se producen temblores, pérdida de precisión y pérdida de sensibilidad táctil, con los riesgos resultantes para el paciente. Por lo tanto, están apareciendo las nuevas tecnologías, tales como la laparoscopia asistida por robot, que se dirigen a mejorar la eficiencia, la calidad y la seguridad de las intervenciones.

25 En vista de lo anterior, la laparoscopia asistida por robot ha conocido un importante desarrollo desde principios de los noventa. Dos sistemas representativos de la cirugía robótica comercializados son el sistema de cirugía conocido por la marca registrada 'DA VINCI', desarrollado por Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, California, y el sistema de cirugía conocido por la marca registrada 'ZEUS', desarrollada originalmente por Computer Motion Inc., Goleta, California. El sistema de cirugía conocido con el nombre 'DA VINCI' está descrito entre otros por Moll et al. en los documentos US 6.659.939; US 6.837.883 y en otros documentos de patente del mismo cesionario. El sistema de cirugía conocido con el nombre 'ZEUS' está descrito, entre otros, por Wang et al. en los documentos US 6.102.850; US 5.855.583; US 5,762,458; US 5.515.478 y en otros documentos de patente asignados a Computer Motion Inc., Goleta, California.

35 Estos sistemas robóticos accionados remotamente permiten controlar las intervenciones quirúrgicas ya sea directamente desde el quirófano o desde un lugar remoto, utilizando retroalimentación visual en una consola. En cualquier caso, se elimina la postura agotadora del cirujano.

40 Aparte de los elevados costes de adquisición y mantenimiento de estos sistemas robóticos, su difusión y aceptación en la comunidad médica es limitada, entre otras razones, debido a una falta de versatilidad. Ambos sistemas fueron diseñados específicamente para la cirugía cardiológica, en la que la anatomía topológica es constante, el espacio de trabajo es pequeño y, por lo tanto, el movimiento preciso del instrumento y la destreza son necesarios solo en un espacio limitado. Por consiguiente, el diseño mecánico de estos sistemas no es fácilmente adecuado para su utilización en otros tipos de cirugía (incluidos ginecología, urología y cirugía general), en los que el espacio de trabajo operativo es mayor que en cardiología, la topología anatómica es variable (incluso a veces impredecible) y las propiedades mecánicas de los tejidos y órganos son diversas.

45 Con independencia de estos dos sistemas específicos, el diseño mecánico de manipuladores en los sistemas de cirugía robótica en la actualidad presenta un importante margen de mejora en diversos aspectos, entre los cuales la versatilidad del sistema es solo uno de muchos.

55 El documento US 5.351.676 describe un soporte pasivo, accionado manualmente por el cirujano, basado en una cadena cinemática PRR (SCARA).

El siguiente artículo de revisión considera que el PRR - SCARA es la mejor opción para un sistema de cirugía robótica: A. Faraz y Sh. Payandeh, "A Robotic Case Study: Optimal Design For Laparoscopic Positioning Stands"; Actas de la 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation; abril de 1997.

5 El documento WO 00/30557 describe un diseño de robot complejo basado en una disposición paralela de las articulaciones para controlar el pivotamiento del instrumento.

Objetivo de la invención

De acuerdo con esto, un objetivo de la invención reivindicada en este documento es proporcionar un sistema robótico médico para llevar a cabo procedimientos médicos que comprende un manipulador de robot que tiene una configuración cinemática mejorada.

10 Descripción general de la invención

Para alcanzar este objetivo, en la reivindicación 1 se propone un sistema robótico médico para llevar a cabo procedimientos médicos, en particular procedimientos laparoscópicos.

Se propone el sistema robótico médico que comprende un manipulador de robot para el manejo asistido por robot de un instrumento médico, en particular un instrumento quirúrgico laparoscópico, tal como se describe más adelante. De acuerdo con un aspecto de la invención, el manipulador de robot comprende una base; un brazo de manipulador, que tiene una parte esencialmente vertical soportada por la base y una parte esencialmente horizontal soportada por la parte vertical; una muñeca de manipulador, soportada por el brazo del manipulador; y una unidad efectora, soportada por la muñeca de manipulador y configurada para sostener un instrumento médico. De acuerdo con otro aspecto de la invención, el brazo del manipulador tiene una configuración cinemática PRP cilíndrica para posicionar la muñeca de manipulador. Más particularmente, la configuración cinemática PRP propuesta incluye en secuencia las tres articulaciones siguientes: una primera articulación (P) prismática, para variar la altura de la parte vertical, que proporciona un grado de libertad de traslación a lo largo de un eje esencialmente vertical, una segunda articulación (R) giratoria, para variar el ángulo de rotación entre la parte vertical y la parte horizontal, que proporciona un grado de libertad de rotación alrededor de un eje esencialmente vertical, y una tercera articulación (P) prismática, para variar el alcance de la parte horizontal, que proporciona un grado de libertad de traslación a lo largo de un eje esencialmente horizontal.

Entre otras ventajas descritas a continuación en el presente documento, esta configuración cinemática específica del brazo del manipulador permite:

- 30 - reducir el espacio necesario por encima del paciente mediante un único brazo de manipulador que permite, entre otros, la utilización de un mayor número de brazos de manipulador separados en una intervención dada;
- posicionar la base del manipulador a cierta distancia del paciente de tal manera que situar el manipulador de robot en una posición separada en caso de emergencia simplemente requiere situar la parte horizontal del brazo en una posición no obstructiva;
- 35 - facilitar el acceso del personal al paciente y también a la región del instrumento quirúrgico, por ejemplo, para intercambiar instrumentos;
- facilitar la prevención de colisiones entre brazos;
- utilizar un mínimo de articulaciones en el propio brazo del manipulador, es decir, solo 3 articulaciones para proporcionar 3 DOF (Grado de libertad – Degree Of Freedom, en inglés) para posicionar la muñeca, por lo que se eliminan las articulaciones redundantes en articulaciones pasivas específicas.

40 Se comprenderá que son posibles diferentes disposiciones de eje de una configuración PRP. La disposición de eje indicada anteriormente se considera que es la configuración cinemática más adecuada para la aplicación dada a conocer en el presente documento. Se comprenderá además que, entre otros en términos de cinemática, requisitos del accionador y control del robot, una configuración de robot cilíndrica PRP es fundamentalmente diferente, por ejemplo, de una configuración PRR tal como la descrita, por ejemplo, en el documento US 5.351.676 o una configuración RPP tal como la descrita en el documento US 6.120.433.

Resultará además evidente para el experto en la materia que la configuración cinemática propuesta en el presente documento desafía la creencia establecida de que SCARA, es decir, un cierto tipo de configuración PRR, es considerada la más apropiada para aplicaciones laparoscópicas. Esta creencia establecida desde hace mucho tiempo se confirma en la literatura científica y de patentes, por ejemplo, en la publicación "A Robotic Case Study: Optimal Design For Laparoscopic Positioning Stands"; A. Faraz y Sh. Payandeh; Actas de la 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation; abril de 1997; (véase en particular el párrafo 2.2).

Además, la configuración cinemática propuesta contribuye a una mayor versatilidad del sistema. En otras palabras, este diseño del manipulador de robot hace que el sistema sea adecuado para una variedad de aplicaciones,

especialmente para cirugía mínimamente invasiva, pero también para intervenciones ortopédicas o de biopsia, para terapia percutánea, para obtención de piel, para diagnóstico por ultrasonidos, etc.

Tal como se apreciará, el sistema robótico dado a conocer rompe con el paradigma según el cual las configuraciones cinemáticas de SCARA representan la opción más apropiada en el caso específico de un sistema de cirugía robótica. Un ejemplo representativo de un sistema robótico médico que utiliza manipuladores con configuración SCARA es el sistema anteriormente mencionado conocido por la marca comercial "ZEUS", descrito, por ejemplo, en los documentos US 6.102.850; US 5.855.583; US 5.762.458 y US 5.515.478.

En cuanto a la versatilidad del sistema robótico médico, los sistemas robóticos médicos existentes están diseñados, en general, para un tipo específico de intervención. Los sistemas "DA VINCI" y el "ZEUS", por ejemplo, fueron diseñados para la cirugía cardiovascular. Por lo tanto, tal como se ha mencionado anteriormente, estos sistemas están diseñados para instrumentos articulados especiales. Además, debido al limitado espacio de trabajo en las intervenciones cardiológicas, el movimiento del instrumento normalmente está reducido por las órdenes del cirujano en la interfaz háptica en estos sistemas. En la cirugía laparoscópica general (incluidas ginecología, urología y cirugía general) el espacio de trabajo operativo es mayor que en cardiología, la topología anatómica es variable (incluso a veces impredecible) y las propiedades mecánicas de los tejidos y órganos son diversas. Un mayor espacio de trabajo implica una mayor envolvente del movimiento del instrumento y la necesidad de una escala del movimiento de 1:1. Como resultado, en laparoscopia general, se necesitan mayores dinámicas del movimiento con el fin de seguir de manera precisa el movimiento de la mano del cirujano. A partir de pruebas experimentales se ha encontrado que la mano del cirujano produce elevadas velocidades en un espacio de trabajo pequeño y, por lo tanto, una aceleración muy elevada. La velocidad puede alcanzar hasta 100 %/s a lo largo del eje de pivotamiento y de los ejes de guiñada, y 200 mm/s en la dirección de penetración. En una escala de movimiento de 1:1 y en las condiciones mencionadas, los sistemas anteriores presentan vibraciones, oscilaciones y pérdida de precisión. El manipulador de robot, descrito con más detalle a continuación en este documento, está diseñado para reducir dichos problemas y, por ello, para ser adecuado para una variedad de intervenciones de cirugía laparoscópica general.

Además, muchos sistemas existentes tienen, aparte de un manipulador para el endoscopio, solo dos manipuladores para instrumentos quirúrgicos per se. Esto da como resultado un aumento del tiempo de intervención debido a procedimientos de intercambio de instrumentos frecuentes y complejos. En una intervención típica, el cirujano utiliza de cinco a siete tipos diferentes de instrumentos y, a menudo, necesita intercambiarlos varias decenas de veces. Habitualmente, el intercambio de instrumentos lleva de 5 a 10 segundos, dependiendo de la habilidad del asistente del cirujano, y estas operaciones de intercambio contribuyen sustancialmente al tiempo de intervención total (aproximadamente del 10% al 20%). Muchos sistemas robóticos existentes no son fácilmente adecuados para intervenciones típicas que requieren de tres o cuatro orificios de acceso para instrumentos. Otros sistemas están restringidos a intervenciones de diagnóstico que, normalmente, son de corta duración (aproximadamente 20 minutos) y, a menudo, no justifican el coste de un sistema robótico. Idealmente, un sistema de cirugía robótica debería ser modular y tener la capacidad de administrar hasta cuatro orificios de acceso de instrumentos y un orificio de acceso de endoscopio. Una limitación importante relacionada con el diseño de manipuladores adecuados es que algunos orificios de acceso pueden estar separados solo algunos centímetros, y es posible que los instrumentos respectivos deban ser posicionados casi paralelos o uno encima del otro. Además, es deseable que los manipuladores no limiten excesivamente la vista del cirujano sobre el cuerpo del paciente y los orificios de acceso. El sistema robótico médico, especialmente en virtud de la configuración cinemática del brazo del manipulador, pero también debido a diversas características adicionales que se describen a continuación en este documento y consideradas de la invención per se, entre otros aborda los problemas anteriores y facilita la utilización simultánea de una pluralidad de manipuladores de robot.

Otra limitación relevante de los sistemas existentes se refiere a la falta de medios fiables y seguros para evitar colisiones entre diferentes manipuladores, entre manipuladores y personal en el quirófano, y entre los instrumentos y el endoscopio. Sin embargo, cualquier colisión potencial representa un riesgo grave para la salud del paciente y posiblemente la del personal operativo y, por lo tanto, la prevención eficiente de colisiones en los sistemas de cirugía robótica es de gran importancia. Obviamente, este problema se vuelve aún más crítico con un número cada vez mayor de manipuladores de robot utilizados durante una intervención dada. En virtud de la configuración cinemática PRP, por un lado, los posibles riesgos de colisión se reducen, debido a una menor obstrucción por el propio brazo del manipulador y, por otro lado, se simplifican los métodos para la detección y la prevención de colisiones.

Resultará evidente que el sistema proporciona la maniobrabilidad requerida con un número mínimo de articulaciones, es decir, con 6 DOF con solo 6 articulaciones. No se proporcionan más articulaciones redundantes. En particular, no se requieren instrumentos especiales con extremos distales articulados del instrumento. Además, todas las articulaciones están accionadas, es decir, no hay articulaciones pasivas o de rotación libre en el manipulador de robot, por lo que el control robótico se mejora significativamente. La extracción de articulaciones pasivas redundantes, que se utilizan comúnmente en los sistemas conocidos para evitar el estrés del trócar, se logra, entre otros, proporcionando el conjunto del sensor en la interfaz entre la sexta articulación y el accionador del instrumento laparoscópico. Esta disposición del conjunto del sensor permite la medición de la fuerza y la limitación de la restricción no solo al nivel de la punta del instrumento sino también al nivel del trócar. Se debe ver otra particularidad en el hecho de que las articulaciones de la unidad de muñeca y efectora son todas rotatorias, es decir, no se proporcionan articulaciones prismáticas en estas piezas.

5 En una realización ventajosa que, entre otras cosas, aumenta la rigidez del manipulador, la primera articulación (P) tiene una guía lineal vertical y un primer accionador lineal, preferiblemente un eje de husillo de bolas lineal, para accionar la primera articulación (P). De forma similar, la tercera articulación (P) tiene, ventajosamente, una guía lineal horizontal y un segundo accionador lineal, preferiblemente un eje de husillo de bolas lineal, para accionar la tercera articulación (P). Además, tanto la primera como la tercera articulaciones tienen preferiblemente un freno y un sensor de posición absoluta, respectivamente asociados a las mismas.

10 Para proteger los componentes de la parte vertical y para minimizar las dimensiones de la porción más delantera de la parte vertical sobre el paciente, se prefiere que la parte horizontal comprenda una cubierta alargada que aloja la guía lineal horizontal y el segundo accionador lineal, comprendiendo la parte horizontal un brazo que se desplaza de manera telescópica con respecto a la cubierta en un lado, y soporta la muñeca en el otro lado.

Ventajosamente, la segunda articulación (R) tiene un engranaje, preferiblemente un engranaje de accionamiento armónico, un motor, preferiblemente un servomotor sin escobillas, acoplado a la etapa de entrada del engranaje, y un sensor de posición absoluta acoplado a la etapa de salida del engranaje. Con ello se consigue una construcción compacta que permite detectar un fallo del mecanismo de accionamiento en la segunda articulación (R).

15 La muñeca de manipulador comprende una cuarta articulación (R) giratoria y una quinta articulación (R) giratoria para orientar la unidad efectora. En consecuencia, el brazo del manipulador y la muñeca del manipulador proporcionan juntos exactamente cinco grados de libertad controlables.

20 Para garantizar una cierta distancia con respecto al paciente, que facilite el acceso para el personal, por ejemplo, en el caso de una emergencia, la parte horizontal del brazo tiene preferiblemente una separación mínima de conexión de 800 mm, es decir, una cierta distancia mínima entre los ejes de rotación de la segunda y la cuarta articulaciones (R). Cabe señalar que el espacio ocupado por la base debe ser tenido en cuenta al calcular la separación necesaria para el paso sin obstáculos del personal.

25 Los ejes de rotación de la cuarta articulación (R) y la segunda articulación (R) son paralelos. Además, se prefiere que el eje de rotación de la cuarta articulación (R) sea coplanario con el plano formado por el eje de rotación de la segunda articulación (R) y por el eje de traslación de la tercera articulación (P).

30 Más particularmente, en una configuración preferida, la cuarta articulación (R) proporciona un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje esencialmente vertical para ajustar el ángulo de guiñada de la unidad efectora, y en el que la quinta articulación (R) proporciona un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje horizontal para establecer el ángulo de inclinación de la unidad efectora. Por supuesto, el ángulo de guiñada depende también de la configuración real de la segunda articulación (R). Por lo tanto, esta última se tiene en cuenta para establecer el ángulo de guiñada por medio de la cuarta articulación (R). En combinación con la configuración cinemática del brazo del manipulador, esta configuración evita las singularidades del manipulador, tal como será más evidente a continuación en este documento. Una cinemática inversa simplificada y una mayor maniobrabilidad se logran en una realización preferida, en la que la muñeca comprende una placa de soporte conectada a la parte horizontal del brazo y a un elemento de soporte sustancialmente en forma de L, uniendo la cuarta articulación (R) una primera porción horizontal del elemento de soporte a la placa de soporte, y uniendo la quinta articulación (R) de una segunda porción vertical del elemento de soporte a un medio de conexión para la unidad efectora, configurando la muñeca de modo que los ejes de rotación de la cuarta articulación (R) y la quinta articulación (R) tienen un punto de intersección.

40 Para la manipulación asistida por robot de instrumentos laparoscópicos, la unidad efectora comprende preferiblemente un accionador de instrumento laparoscópico que tiene medios para montar un instrumento quirúrgico en el manipulador y un mecanismo de accionamiento lineal para accionar un instrumento quirúrgico montado. En la última configuración para instrumentos laparoscópicos se prefiere que la unidad efectora comprenda un bastidor de soporte principal para conectar la unidad efectora a la muñeca y una sexta articulación (R) giratoria que une el accionador del instrumento laparoscópico al bastidor de soporte principal, proporcionando la sexta articulación (R) un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje que coincide con el eje longitudinal de un instrumento quirúrgico montado en el accionador de instrumento laparoscópico para ajustar el ángulo de balanceo del instrumento quirúrgico montado. En la última realización, se prefiere que los ejes de rotación de la sexta articulación (R) y la quinta articulación (R) sean perpendiculares. Sin embargo, también se puede considerar, por ejemplo, en aplicaciones del sistema robótico distintas de la cirugía mínimamente invasiva, que estos ejes pueden ser oblicuos, por ejemplo, para evitar singularidades debido a la posible alineación de la sexta y la cuarta articulación (R).

55 Preferiblemente, la muñeca del manipulador está configurada de tal manera que los ejes de rotación de la sexta articulación (R) y la cuarta articulación (R) están separados una distancia que corresponde aproximadamente al diámetro del accionador del instrumento laparoscópico en su sección transversal más grande. Esta realización permite que dos manipuladores de robot trabajen en incisiones cercanas con un riesgo de colisión reducido.

Para permitir la retroalimentación de la fuerza en una interfaz háptica de un cirujano, la unidad efectora comprende ventajosamente un conjunto de sensor que comprende un sensor de fuerza / par de 6 grados de libertad (DOF) y un acelerómetro de 6 DOF, conectando el conjunto el accionador del instrumento laparoscópico a la sexta articulación

(R). Este conjunto de sensor permite medir la aceleración y la inclinación lineal y angular del accionador del instrumento laparoscópico y cualquier fuerza o torsión ejercida por un instrumento montado sobre el cuerpo del paciente. El acelerómetro lineal y angular se utiliza para compensar la influencia de la gravedad y la aceleración en el sensor de fuerza - par.

5 Muchos sistemas robóticos médicos existentes carecen de retroalimentación de fuerza y, por lo tanto, impiden al cirujano percibir las fuerzas ejercidas sobre los tejidos del paciente. Por lo tanto, el cirujano solo puede confiar en la retroalimentación visual de sus movimientos para limitar la interacción del instrumento con los tejidos. De hecho, la retroalimentación de fuerza contribuye significativamente a la seguridad en la utilización de la robótica para la laparoscopia quirúrgica. Además, la detección táctil es relevante para palpar órganos, para sostener órganos
10 viscosos con un instrumento que no se encuentra en el campo de visión del endoscopio, para aplicar una tensión adecuada a las suturas y evitar la ruptura del cable, para detectar fuerzas excesivas aplicadas a órganos y, por consiguiente, detener o limitar el movimiento, para limitar las fuerzas aplicadas en la incisión del trocar, etc. En la publicación "*Development of actuated and sensor integrated forceps for minimally invasive robotic surgery*" por B. Kibler, U. Seibold, y G. Hirzinger - Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte
15 Chirurgie (CURAC), 8 - 9 de octubre de 2004, Munich, Alemania; se ha presentado un sensor de fuerza / par de 6 DOF miniaturizado instalado en la punta del instrumento. Este concepto tiene varios inconvenientes, entre los que se destacan el mayor coste del instrumento, la falta de robustez con respecto a la esterilización y los problemas de apantallamiento EMI cuando se utilizan con instrumentos eléctricos.

20 Con respecto a la construcción del accionador, la cuarta articulación (R), la quinta articulación (R) y/o la sexta articulación (R) tienen ventajosamente un motor, preferiblemente un servomotor sin escobillas, un engranaje que tiene una etapa de entrada acoplada al eje del motor, una transmisión por correa acoplada a la etapa de salida del engranaje para transmitir la velocidad a la articulación asociada, y un sensor de posición absoluta acoplado a la transmisión por correa. Este diseño permite la detección de fallos de las articulaciones al final de la cadena de transmisión.

25 Para detectar la entrada de personal en el área de trabajo del manipulador, la base de cada manipulador de robot comprende preferiblemente un escáner de rango láser.

Breve descripción de las figuras

Los aspectos anteriores, así como otros aspectos de la invención y objetivos de la presente invención serán más evidentes a partir de la siguiente descripción de una realización no limitativa con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 30 la figura 1: es una vista, en perspectiva, de un sistema robótico médico para laparoscopia quirúrgica genérica en un quirófano con tres manipuladores de robot colocados alrededor de una mesa de operaciones en la que se encuentra un paciente;
- 35 la figura 2: es una vista, en perspectiva, de un sistema robótico médico para laparoscopia quirúrgica genérica con cinco manipuladores de robot;
- la figura 3: es una vista, en perspectiva, de un manipulador de robot del sistema robótico médico de la figura 1 y la figura 2 que muestra sistemas de coordenadas principales;
- la figura 4: es una vista, en perspectiva, del manipulador de robot de la figura 3 parcialmente desmontado en sus piezas principales;
- 40 la figura 5: es un diagrama esquemático de la configuración cinemática del manipulador de robot de la figura 3, que incluye las articulaciones J1 a J6;
- la figura 6: es una vista superior de un sistema de cirugía robótica con cinco manipuladores de robot, que ilustra carcasas de detección de colisiones 2D que envuelven los componentes del manipulador;
- la figura 7: es una vista, en perspectiva, de la base del manipulador de robot de la figura 3;
- 45 la figura 8: es una vista superior de un sistema robótico médico que muestra una detección basada en láser 2D para detectar la proximidad de un asistente del cirujano con respecto a un manipulador de robot;
- la figura 9: es una vista, en perspectiva, de los componentes internos de las articulaciones J1, J2 y J3 del manipulador de robot de la figura 3;
- 50 la figura 10: es una perspectiva de los componentes internos de la articulación J2 del manipulador de robot de la figura 3;
- la figura 11: es una primera vista, en perspectiva, de los componentes internos de la muñeca de manipulador que incluye las articulaciones J4 y J5;

- la figura 12: es una segunda vista, en perspectiva, de los componentes internos de la muñeca de manipulador que incluye las articulaciones J4 y J5;
- la figura 13: es una tercera vista, en perspectiva, de los componentes internos de la muñeca de manipulador que incluye las articulaciones J4 y J5;
- 5 la figura 14: es una vista, en perspectiva, que muestra una unidad efectora del manipulador de robot de la figura 3 y un instrumento adaptado para ser conectado a la unidad efectora;
- la figura 15: es una vista, en perspectiva, de los componentes internos principales de la unidad efectora de la figura 14;
- la figura 16: es una vista, en perspectiva, de un marco de referencia del fulcro;
- 10 la figura 17: es una vista, en perspectiva, de un adaptador de vástago de instrumento (ISA – Instrument Stem Adaptor, en inglés) y de un vástago de instrumento correspondiente;
- la figura 18: es una vista, en perspectiva, ampliada, de un accionador de instrumento laparoscópico (LIA – Laparoscopic Instrument Actuator, en inglés), tal como el mostrado en la figura 14;
- la figura 19: es una vista, en perspectiva, de un conjunto de accionamiento en el LIA de la figura 18;
- 15 la figura 20: es una vista, en perspectiva, inferior, que muestra componentes internos adicionales del LIA mostrado en la figura 18;
- la figura 21: es una vista, en perspectiva, superior, que muestra componentes internos adicionales del LIA mostrado en la figura 18;
- 20 la figura 22: es una vista, en perspectiva, que muestra un mecanismo de acoplamiento utilizado en el LIA mostrado en la figura 18;
- la figura 23: es una vista, en perspectiva, de un manipulador de robot de acuerdo con la figura 3 que tiene una muñeca de manipulador modificada;
- la figura 24: es una vista, en perspectiva, de un sistema robótico médico para laparoscopia quirúrgica genérica con cuatro manipuladores de robot de acuerdo con la figura 23 y un manipulador de robot de acuerdo con la figura 3;
- 25 la figura 25: es una vista, en perspectiva, de una realización alternativa de un accionador de instrumento laparoscópico (LIA) para su utilización en la unidad efectora mostrada en la figura 14;
- la figura 26: es una vista, en perspectiva, del LIA de la figura 24 con una realización alternativa de un adaptador de vástago de instrumento (ISA) conectado al LIA;
- 30 la figura 27: es una vista en perspectiva de un conjunto de accionamiento alternativo utilizado en el LIA de la figura 24;
- la figura 28: es otra vista, en perspectiva, del ISA mostrado en la figura 26;
- la figura 29: es una vista, en perspectiva, parcialmente cortada, del ISA mostrado en la figura 26 y la figura 28;
- 35 la figura 30: es otra vista, en perspectiva, parcialmente cortada, del ISA mostrado en la figura 26 y la figura 28 con diferentes instrumentos conectados al adaptador.

En estos dibujos se utilizan números de referencia idénticos para identificar piezas idénticas en todos ellos.

Descripción detallada con respecto a las figuras

La figura 1 muestra un sistema robótico médico para laparoscopia quirúrgica genérica, identificado en general con el número de referencia 10. Un paciente P cubierto por una sábana estéril está colocado sobre una mesa de operaciones 12 alrededor de la cual están dispuestos una pluralidad de manipuladores de robot 14. En el ejemplo de la figura 1, el sistema robótico médico 10 está configurado para una intervención en el área pélvica. Un cirujano S opera una consola principal 15 quirúrgica y un asistente de cirujano A está colocado de pie cerca de la mesa de operaciones 12 y cerca de una bandeja 16 con un conjunto de instrumentos 18 laparoscópicos adaptados. Los manipuladores de robot 14 están diseñados para posicionar y orientar una unidad efectora que soporta y posiblemente acciona varios tipos de instrumentos 18 laparoscópicos. Durante la operación, los manipuladores de robot 14 son accionados remotamente por uno o más cirujanos S a través de una o más consolas principales 15 quirúrgicas que están conectadas a una unidad de control (no mostrada). Tal como se apreciará, el sistema robótico médico 10 es modular y configurable de acuerdo con el tipo de intervención quirúrgica, en general con hasta 5 manipuladores y normalmente una configuración mínima de 2 manipuladores. Una configuración de un sistema

robótico médico 10' con 5 de manipuladores 14 se muestra, por ejemplo, en la figura 2. El sistema 10 mostrado en la figura 1 está equipado con escáneres 22 de rango láser situados en la base de cada manipulador de robot 14. Los escáneres 22 de rango láser se utilizan para la seguridad del personal asistente quirúrgico en el quirófano. La figura 3 es una vista tridimensional de un manipulador de robot 14 que forma una unidad mecánica del sistema de cirugía robótica 10. El manipulador de robot 14 está montado sobre una base 24, que se puede fijar al suelo del quirófano y es móvil cuando no está fijada. En la figura 3 se muestran asimismo tres sistemas de coordenadas, es decir, el sistema de coordenadas de la base, de la brida de la herramienta (TF – Tool Flange, en inglés) y de la punta del instrumento laparoscópico (LIT – Laparoscopic Instrument Tip, en inglés). Tal como se ve en la figura 3, el manipulador de robot 14 comprende un brazo 26 de manipulador y una muñeca 28 de manipulador. En la figura 4, se muestran las partes principales del manipulador de robot 14. El brazo 26 tiene una parte esencialmente vertical 27 y una parte esencialmente horizontal 29. El primer extremo del brazo 26 en la parte vertical 27 debe fijarse a la base 24, mientras que la muñeca 28 debe fijarse al segundo extremo del brazo 26, es decir, la extremidad de la parte horizontal 29. Una unidad efectora 30 para instrumentos 18 laparoscópicos adaptados debe conectarse a una brida de herramienta 32 de la muñeca 28. Tal como se indica mediante flechas en la figura 3, el brazo 26 tiene tres grados de libertad (DOF) y la muñeca 28 tiene dos DOF. En consecuencia, el manipulador de robot 14 es básicamente un manipulador de robot de 5 DOF. La unidad efectora 30 proporciona un DOF auxiliar para hacer girar el instrumento 18 laparoscópico montado en la unidad efectora 30 alrededor de su eje longitudinal. La disposición del DOF del manipulador de robot 14 y de la unidad efectora 30 se hará más evidente a partir de la siguiente descripción de la figura 5.

Tal como se ve mejor en el modelo geométrico de la figura 5, el brazo 26 está unido a la base 24 por medio de una primera articulación J1 que es una articulación deslizante (P) prismática (o articulación de traslación rectilínea). La primera articulación J1 está conectada a la base 24 por medio de un eslabón L0 de base y proporciona un DOF de traslación a lo largo de un eje esencialmente vertical. La primera articulación J1, por ello, permite el posicionamiento vertical del primer eslabón L1 esencialmente vertical y de los componentes subsiguientes fijados a este último con respecto a la base 24 y al eslabón L0. En otras palabras, la articulación J1 define la altura de la parte vertical 27. Una segunda articulación J2, que es una articulación (R) giratoria, conecta el primer eslabón L1 con un segundo eslabón L2 esencialmente horizontal del brazo 26. El eje de rotación de la articulación J2 giratoria es esencialmente vertical. La articulación J2 permite establecer el ángulo relativo entre el eslabón L2 y su posición angular inicial en un plano horizontal. Una tercera articulación J3 deslizante prismática (P) conecta el eslabón L2 con un tercer eslabón L3 esencialmente horizontal. La articulación (P) J3 proporciona un grado de libertad en traslación a lo largo de un eje esencialmente horizontal, y permite establecer el alcance o la extensión del brazo 26, más precisamente, la parte horizontal 29, mediante la separación horizontal del eslabón L3 con respecto al eslabón L2. Los eslabones L2 y L3 junto con la articulación (P) J3 forman una pluma extensible esencialmente horizontal o pluma del manipulador de robot 14.

Con dos articulaciones (P) y una articulación (R) dispuestas tal como se ve en la figura 5, el brazo 26 tiene un DOF en rotación alrededor de un eje esencialmente vertical, y asociados al mismo dos DOF en traslación a lo largo de dos ejes perpendiculares. Por consiguiente, el brazo 26 del manipulador de robot 14 tiene una configuración cilíndrica, es decir, la configuración cinemática del manipulador 14 pertenece a la clase de robots cilíndricos de tipo PRP (Prismático – Giratorio - Prismático). De manera más precisa, cada articulación entre las tres primeras J1, J2, J3 corresponde respectivamente a una coordenada cilíndrica (z, ,r): siendo z la coordenada de elevación (o altura), siendo la coordenada de rotación (o acimut) y siendo r la coordenada de elongación radial (o radio).

Tal como se ve adicionalmente en la figura 5, la muñeca 28 comprende dos articulaciones giratorias J4, J5 y la unidad efectora 30 incluye una articulación J6 giratoria. Las articulaciones J2, J4, J5, J6 giratorias definen respectivamente la orientación de un instrumento 18 laparoscópico adaptado fijado a la unidad efectora 30. La articulación J4 giratoria conecta el eslabón L3 a un eslabón L4 y permite girar el eslabón L4 con las partes subsiguientes, sobre un eje esencialmente vertical que es paralelo al eje de rotación de la articulación J2. Por ello, la articulación J4 giratoria permite establecer el ángulo de guiñada de la unidad efectora 30, en combinación con el ajuste real de la articulación J2. Se debe observar que el eje de rotación de la articulación J4 giratoria es coplanario con el plano formado por el eje de rotación de la articulación J2 giratoria y por el eje de traslación de la articulación J3 prismática. La articulación J5 giratoria conecta el eslabón L4 con la brida 32 de herramienta y permite girar la brida 32 de herramienta con las partes subsiguientes a lo largo de un eje esencialmente horizontal perpendicular al eje de rotación de la articulación J4. Por ello, la articulación J5 giratoria permite establecer el ángulo de inclinación de la unidad efectora 30. La unidad efectora 30 está conectada a la brida 32 de la herramienta a través de un eslabón L5. El eje de rotación de la articulación J6 giratoria es sustancialmente perpendicular al eje de rotación de la articulación J5 y conecta el eslabón L5 con un eslabón L6. El eje de rotación de la articulación J6 giratoria está alineado con el eslabón L6 y define el ángulo relativo del eslabón L6 con respecto a su posición angular inicial. Un instrumento 18 laparoscópico adaptado está conectado al eslabón L6. El instrumento 18, representado por el eslabón L7, está alineado con el eslabón L6. El punto extremo del eslabón L7 representa la punta 17 del instrumento.

La configuración cinemática PRP cilíndrica 26 del manipulador tiene diversas ventajas, entre las cuales:

- un espacio contenido relativamente pequeño ocupado por la estructura del manipulador sobre la mesa de operaciones;

- el hecho de que la base del manipulador está a suficiente distancia (debido a una separación mínima de conexión de la parte horizontal 29 de 800 mm) desde la mesa de operaciones para facilitar el acceso del cirujano a la mesa de operaciones y la transferencia del paciente desde / hacia la mesa de operaciones;
- cálculos sencillos y rápidos de detección de colisiones entre de manipuladores.

5 Estos y otros aspectos serán más evidentes a partir de los siguientes párrafos.

Una ventaja resultante de la configuración cinemática PRP elegida del brazo 26 del manipulador del robot es la simplificación del cálculo de detección de colisiones entre una pluralidad de manipuladores 14 dispuestos con espacios de trabajo que se cruzan alrededor de la mesa de operaciones 12 (figuras 1 y 2). Debido a la configuración cilíndrica, el manipulador de robot 14 puede ser aproximado con características geométricas planas simples en un plano horizontal bidimensional (2-D). Tal como se ve mejor en la figura 6, los eslabones mecánicos del brazo 26 pueden estar envueltos por un rectángulo de longitud y orientación variables que corresponden respectivamente a (J3 + L2 + L3) y a J2; el ancho de la envolvente del rectángulo viene dado por la geometría del eslabón mecánico más un margen que depende, por ejemplo, del espacio necesario para frenar al robot desde la velocidad máxima hasta su detención, más un umbral de seguridad. El margen de cada lado de las envolventes rectangulares se puede dimensionar dinámicamente según la dirección y la velocidad de movimiento, por ejemplo, cuanto mayor es la velocidad en la dirección de un lado de la envolvente, mayor es el margen para este lado de la envolvente. La muñeca 28 es aproximada por un rectángulo que envuelve el cuerpo del eslabón L4 y parte del eslabón L5 y con una orientación plana variable definida por la posición angular actual de la articulación J4. De manera similar, la unidad efectora 30 puede ser aproximada mediante un rectángulo que envuelve su proyección sobre el plano horizontal bidimensional donde el ángulo de proyección corresponde a la posición angular actual de la articulación J5. El mismo principio se aplica al vástago del instrumento 18 conectado a la unidad efectora 30. Estas características geométricas bidimensionales simples permiten establecer algoritmos simples y eficientes para la detección de colisiones basadas en la intersección de sus líneas. En una primera etapa, el método de detección de colisión consiste en verificar una colisión en la proyección horizontal 2-D. Solo si alguna de estas figuras en 2-D colisiona con una figura de un manipulador de robot 14 diferente, a continuación, se verifica un riesgo efectivo de colisión real que incluye la tercera dimensión. Por lo tanto, tal como se apreciará, cálculos 3-D se deben llevar a cabo solo para los lados de intersección de las partes correspondientes de los manipuladores de robot 14. En este cálculo 3-D simplificado, las partes afectadas están envueltas, por ejemplo, con un modelo triangular. Como resultado, se pueden implementar fácilmente algoritmos rápidos de detección de intersección, por ejemplo, los propuestos en "A Fast Triangle-Triangle Intersection Test" por Moller, Journal of Graphics Tools, 2(2), 1997. En la práctica, la detección de colisión entre los vástagos de los instrumentos 18 es relevante especialmente para proteger el endoscopio de los instrumentos alimentados.

Para un resultado preciso de la detección de colisión entre manipuladores de robot 14, la posición y orientación de todos los manipuladores de robot 14 con respecto a un sistema de coordenadas de referencia común se determina mediante un procedimiento de calibración después de la colocación de los manipuladores 14 en el quirófano. Desde el punto de vista funcional, tras la detección de un riesgo de colisión, el sistema de control debe detener a los manipuladores 14 afectados y advertir al cirujano S a través de una información de visualización apropiada y/o una retroalimentación de la fuerza de repulsión en la consola principal 15. A continuación, el cirujano puede, simplemente, lograr la recuperación accionando remotamente uno de los manipuladores en una dirección segura. En una mejora adicional, se implementan varios niveles de seguridad de colisión utilizando al menos dos envolventes con diferentes márgenes para cada uno de los conjuntos de piezas, por ejemplo, el brazo 26, la muñeca 28, la unidad efectora 30 y/o el instrumento 18. Tras la detección de un riesgo de colisión con la envolvente más sobresaliente, el movimiento ordenado por el cirujano S en la dirección de colisión se reduce bruscamente en función de la penetración en la zona de margen.

Otra ventaja con respecto a la configuración del brazo 26 está relacionada con la capacidad de control mejorada de los accionadores asociados a las articulaciones J1, J2, J3. Cuando se compara con otras clases de robots (por ejemplo, robots esféricos o articulados), y como resultado de la configuración del brazo, se mejora el control de estos accionadores, dado que J1, J2, J3 y J4 no están sujetos a cargas gravitacionales variables, y dado que J1, J3 y J5 no tienen cargas de inercia variables. Esto permite una optimización simplificada de los bucles de control (por ejemplo, PID con avance) y para lograr errores de seguimiento muy bajos de la dinámica de la posición, por ejemplo, de unos pocos recuentos de codificadores de motor solamente. Además de las ventajas presentadas, el diseño mecánico deberá considerar una estructura rígida pero ligera para los eslabones L2 y L3, para limitar su desviación y oscilaciones en caso de que la articulación J1 y/o la articulación J2 ejecuten un movimiento brusco.

Se deben tener en cuenta otras dos ventajas resultantes de la geometría del manipulador de robot 14. En primer lugar, con la base 24 del manipulador situada a suficiente distancia de la mesa de operaciones 12 (por ejemplo, al menos a 600 mm de distancia) y el brazo 26 diseñado de manera que pueda girarse a mano alrededor de la articulación J2 (con los frenos soltados) a una posición de estacionamiento, el cirujano S puede acceder rápida y fácilmente a la mesa de operaciones 12 para tareas manuales tales como insuflación, extracción anatómica de órganos, sutura final, etc. Además, la transferencia del paciente P a la mesa de operaciones 12 o lejos de la misma es posible rápidamente. En segundo lugar, en comparación con una geometría SCARA, utilizada, por ejemplo en el brazo del manipulador conocido con el nombre comercial ZEUS, que tiene una articulación de rotación de codo que

conecta dos eslabones coplanarios de longitud similar para alcanzar una cierta posición horizontal, la configuración cilíndrica del manipulador 14 tiene una única articulación J3 de elongación radial que reduce considerablemente el espacio ocupado para colocar la muñeca 28 sobre el cuerpo del paciente P. Tal como se muestra en la figura 2, esta característica permite colocar cinco manipuladores 14 y más en la mesa de operaciones 12, siempre que las dimensiones de la muñeca y de la unidad efectora sean suficientemente pequeñas, es decir, que ocupen un espacio suficientemente contenido en el espacio de trabajo disponible sobre el cuerpo del paciente.

En los siguientes párrafos, se proporcionará una descripción más detallada de la construcción del manipulador de robot 14 haciendo referencia a las figuras 7 a 15.

La figura 7 muestra varias características de la base 24. La base 24 incluye una placa de base 40 principal y está dispuesta como estructura móvil por medio de cuatro ruedas 42 instaladas en aberturas en las esquinas de la placa principal 40. Cada rueda 42 está alojada en una cubierta 43 con una abertura para acceder a una empuñadura para extraer o retraer las ruedas 42. Cuando las ruedas 42 están retraídas, la base 24 descansa estable en el suelo del quirófano por medio de soportes de amortiguación (no mostrados) de las ruedas 42. Después de extraer las ruedas 42, la base 24 que incluye el manipulador de robot 14 puede ser movida a mano. En un diseño diferente, la base 24 puede estar montada en un eje de carril lineal móvil o fijo o en un carro diseñado para soportar varias bases 24 y manipuladores de robot 14 asociados. La placa de base 40 principal está diseñada de manera que puede ser fijada al suelo si es necesario, por ejemplo, mediante atornillado, utilizando los orificios 44, para proporcionar estabilidad adicional al manipulador de robot 14. El manipulador de robot 14 está fijado a la base 24 mediante pernos en los taladros roscados 45. En la placa de base 40, están mecanizados varios orificios 46 de alta precisión. Los orificios 46 sirven para soportar reflectores ópticos de calibración que se utilizan para determinar la posición y la orientación de la base 24 por medio de un sistema de medición óptica, tal como se describe en la publicación "*Robot calibration*" por R. Bernhardt y S. Albright, ed. Chapman & Hall, 1993. Se puede observar que el manipulador de robot 14 se calibra durante los procedimientos de configuración de fábrica para determinar con precisión su modelo geométrico. Además, la base comprende un recinto 48 para el suministro de energía y servoaccionadores de motores sin escobillas, dispositivos de acondicionamiento de señales, medios para el procesamiento local de sensores montados en el brazo y canales de comunicación a una unidad de control del sistema remoto.

Tal como se muestra en la figura 1 y se ve mejor en la figura 8, un escáner 22 de rango láser 2D está instalado en la base 24, más precisamente en el recinto 48, para permitir la detección de la entrada, por ejemplo, del asistente A, dentro de un perímetro de seguridad alrededor de los eslabones L2 y L3.

Se debe observar que, en general, se utilizan dos tipos diferentes manipuladores de robot 14 en el sistema robótico médico 10. Aunque los dos tipos de manipuladores de robot 14 tienen esencialmente la misma geometría y configuración PRP cinemática del brazo 26, el primer tipo está preferiblemente dispuesto específicamente para manejar un endoscopio utilizado para visualización, mientras que el segundo tipo está dispuesto para manejar cualquiera de los diversos tipos de instrumentos 18 laparoscópicos adaptados utilizados para la operación per se. Para laparoscopia, normalmente se utiliza un manipulador de robot 14 del primer tipo, mientras que se utilizan varios manipuladores de robot 14 del segundo tipo. En el sistema robótico médico 10, las principales diferencias entre estos dos tipos de manipuladores de robot 14 son:

- la separación de la articulación J3 es más larga para un manipulador de endoscopio (aproximadamente 750 mm), porque requiere una rotación de 360° alrededor de su orificio de acceso (en general, para propósitos de exploración),
- la separación de la articulación J4 es infinita para un manipulador de endoscopio porque, requiere 360° de rotación alrededor del orificio de acceso. Esto se habilita mediante la utilización de un colector de señales en el eje J4,
- la articulación J6 no es necesaria para el manipulador de endoscopio, es decir, el endoscopio se puede conectar directamente a la articulación J5,
- la unidad efectora 30 de un manipulador de endoscopio normalmente consiste en el endoscopio y en un sensor de fuerza / par para detectar fuerzas adicionales,
- las necesidades de velocidad / aceleración para todas las articulaciones son menores en un mínimo del 60% para un manipulador endoscópico, porque requiere capacidad de posicionamiento solo para el endoscopio.

Teniendo en cuenta estas diferencias, la presente descripción se centra en el segundo tipo manipulador de robot 14, ya que este último presenta las necesidades de diseño más estrictas.

Haciendo referencia a la figura 9, a continuación, se proporcionan detalles sobre la configuración de las articulaciones J1 a J3 del brazo 26 del manipulador, incluidos sus respectivos accionadores.

Como accionador lineal asociado, la articulación (P) J1 para la elevación del brazo comprende un eje lineal 50 del husillo de bolas (por ejemplo, un modelo adecuado de la serie ET comercializado por Parker Hannifin,

Electromechanical Division, Offenburg, Alemania y Poole, Reino Unido). El eje lineal 50 del husillo de bolas es accionado por un servomotor 51 sin escobillas equipado con un codificador de posición de motor incremental y un freno. El eje lineal 50 está dotado adicionalmente de un sensor de posición lineal absoluta adicional (no mostrado) en la etapa de salida, con interruptores de límite y con un parachoques mecánico de fin de carrera (no mostrado).

5 Una guía lineal vertical 52 está asociada operativamente al eje lineal 50 para asegurar la linealidad del eje y la rigidez frente a la torsión. El eje lineal 50 está fijado a los soportes 53 para montar el brazo 26 en la base 24. Los cables de señal y de potencia están guiados en un canal de cables vertical (no mostrado) en el interior de la cubierta de la articulación J1. Una cubierta externa 54 aloja los componentes de la articulación (P) J1 prismática, tal como se ve mejor en la figura 3. Con respecto al conjunto de accionador de la articulación J1, se puede observar que la

10 relación de reducción de motor / carga se establece para evitar la caída no deseada de la parte horizontal 29 también cuando el freno del motor está desconectado o cuando el servomotor 51 no está alimentado. Además, un pulsador de parada de emergencia (no mostrado) está dispuesto en la cubierta externa 54, el cual sirve para detener el movimiento de todas las articulaciones de robot en caso de una emergencia. Tal como se ve en la figura 9, los

15 componentes anteriormente mencionados del brazo 26 del manipulador constituyen su parte esencialmente vertical 27.

La figura 9 muestra asimismo la articulación (R) J2 que forma la articulación del hombro del brazo 26. Tal como se ve mejor en la figura 10, la articulación J2 comprende un conjunto de un servomotor 61 sin escobillas en línea con un engranaje 62 de tipo Harmonic Drive® para impulsar la carga. El motor 61 sin escobillas está equipado con un codificador de posición y un freno a prueba de fallos. Además, el conjunto de accionador comprende un sensor de

20 posición 65 de rotación absoluta adicional, que está accionado por una correa 66 conectada a la etapa de salida del engranaje 62, y por un tope mecánico de final de carrera e interruptores limitadores (no mostrados). Un interruptor de encendido (no mostrado) está dispuesto en la cubierta 64, el cual permite liberar los frenos de las articulaciones J2, J3, J4, J5 y J6 cuando sus respectivos motores no están alimentados. Esto permite mover el brazo 26 y la unidad de efectos 30 a mano hasta una posición de estacionamiento. Los cables de señal y de alimentación de las

25 articulaciones de más abajo J3 a J6 y de la unidad efectora 30 son dirigidos desde J3 a J1 a través de un conducto de cables flexible (no mostrado) que pasa por el interior de la cubierta 64. Alternativamente, dichos cables podrían estar guiados, por ejemplo, a través del eje hueco de un conjunto adaptado de engranaje y motor.

La figura 9 muestra asimismo el diseño de la parte horizontal 29 del brazo 26 que incluye la articulación (P) J3 para establecer la extensión radial, es decir, el alcance de la parte horizontal 29. La articulación J3 comprende un eje de cilindro lineal 70, por ejemplo, un eje lineal del husillo de bolas, como accionador lineal asociado. Por ejemplo, se utiliza un accionador de modelo ET comercializado por la compañía antes mencionada, accionado por un servomotor 71 sin escobillas equipado con un codificador de la posición del motor y un freno a prueba de fallos. La

30 varilla del eje lineal del cilindro 70 desplaza un brazo 72 que está configurado como un tubo rectangular y montado sobre carros de una guía lineal 73. Esta construcción permite reducir la deflexión lineal. El eje de cilindro lineal 70 está dotado adicionalmente de un sensor de posición lineal absoluto adicional en la etapa de salida, con interruptores limitadores y topes mecánicos de fin de carrera (no mostrados). Los cables de señal y de alimentación están guiados en una cadena portacables colocada horizontalmente. Un recubrimiento 74 está fijado a las piezas que forman el segundo eslabón L2 y aloja los componentes de la articulación (P) J3, en particular el accionador lineal 70 y la guía lineal 73. Tal como se ve en la figura 9, el brazo 72, que forma parte del eslabón L3, está

35 configurado para ser desplazado telescópicamente respectivamente fuera del recubrimiento 74. El brazo 26 está provisto por ello de una parte horizontal 29 que se estrecha en un extremo que requiere solo una cantidad limitada de espacio sobre el paciente P. Además, preferiblemente están dispuestas lámparas en la parte superior trasera de la cubierta 74 para indicar visualmente el estado de alimentación y activación.

Haciendo referencia a las figuras 11 a 13, la construcción de la muñeca 28 y más particularmente las articulaciones

40 J4 y J5 se detallarán a continuación.

El diseño mecánico y de accionamiento de la articulación (R) J4 mostrada en las figuras 11 a 13 comprende una placa de soporte 80 en la cual un servomotor 81 sin escobillas está montado verticalmente. El servomotor 81 está provisto de un codificador de posición 82 y de un sensor Hall en el eje del motor. Como servomotor 81, se utiliza un modelo adecuado de la serie de motores EC comercializados por MAXON MOTOR A.G., Sachseln, Suiza, por

45 ejemplo. La articulación (R) J4 comprende además un mecanismo de transmisión a través de un engranaje 83 acoplado al servomotor 81 y a través de una correa de transmisión 84 y un sistema de poleas 85 para accionar una polea de eje de carga 86 que está acoplada a una brida de conexión 87. Un el sensor de una sola vuelta 88 absoluto adicional está conectado a una polea 89, que también es accionada por la correa de transmisión 84, y fijada al lado inferior de la placa de soporte 80. Para encaminar fácilmente los cables desde la articulación J5 a la articulación J4,

50 el conjunto que comprende la polea del eje de carga 86 y la brida de conexión 87, tienen un eje hueco y una ventana lateral en la brida de conexión 87. La placa de soporte 80 está rígidamente fijada al brazo 72 por medio de dos placas de montaje 90. Tal como se ve en la figura 14, una cubierta 92 sirve para proteger las piezas de la articulación J4. En el interior de la cubierta, los cables de la unidad efectora 30, desde las articulaciones J5 y J4 están provistos de conectores para hacer que la muñeca 28 se pueda desmontar para fines de mantenimiento. Un

55 pulsador de parada de emergencia está dispuesto en la cubierta 92 de la articulación J4. Un freno a prueba de fallos está preferiblemente montado en el eje del servomotor 81. Para reducir la separación O1 lateral, que podría constituir un factor limitante en una configuración de robot múltiple, el motor también puede alinearse con los ejes de

60

la carga. la polea 86 del eje y el sensor 88. En este caso, la placa de soporte 80 preferiblemente tiene un borde redondeado alrededor de la polea 86 del eje de carga.

El diseño mecánico y de accionamiento de la articulación (R) J5 también se muestra con más detalle en las figuras 11 a 13. Un elemento de soporte 100 esencialmente en forma de L une la articulación J5 a la articulación J4, con una porción horizontal conectada a la articulación J4 y una porción vertical como bastidor fijo para la articulación J5. Comprende un servomotor 101 sin escobillas, por ejemplo, un modelo EC adecuado de MAXON MOTOR A.G., con un codificador de posición 102 y un sensor de pasillo en el eje del motor. Tal como se ve en la figura 13, el servomotor 101 está montado transversalmente sobre el elemento de soporte 100. Tal como se ve en las figuras 12 y 13, la articulación (R) J5 comprende además un mecanismo de transmisión a través de un engranaje 103 acoplado al motor 101 y un sistema de correa de transmisión 104 y polea 105 para accionar una polea del eje de carga 106. Un sensor adicional de una sola vuelta 108 absoluto está conectado a la polea 109 que está accionada también por la correa de transmisión 104, y fijada al lado interior del elemento de soporte 100. Para encaminar los cables fácilmente desde la unidad efectora 30 a la articulación J4, se incluyen varias características. Estas son dos orificios 110 y 112 dispuestos en el elemento de soporte 100, un paso central hueco 114 en la polea 106 y la brida de herramienta 32, y un soporte de encaminamiento de cables 116 para la polea 106. El elemento de soporte 100 en forma de L tiene refuerzos laterales para proporcionar una estructura rígida para soportar la unidad efectora 30 a través de la brida de herramienta 32. Si es necesario, la articulación (R) J5 incluye preferiblemente interruptores limitadores y un freno a prueba de fallos (no mostrados). Cuando existe, este último está montado preferiblemente en una polea accionada por la correa de transmisión 104 con el fin de reducir la separación O2 lateral, que puede constituir un factor limitativo en una configuración de múltiples robots.

Las figuras 14 y 15 muestran una unidad efectora 30 diseñada para estar conectada a la brida de la herramienta 32 de la articulación J5, con sus tres piezas principales: un accionador de instrumento laparoscópico 120, un conjunto de detección 122 que incluye un sensor de fuerza / par de 6 DOF y un acelerómetro lineal / angular de 6 DOF y una cubierta 124 para la articulación J6. La articulación J6 está conectada al conjunto de detección 122. El accionador de instrumento laparoscópico 120 está dotado de un asiento 130 para montar un instrumento 18 laparoscópico adaptado en el manipulador de robot 14.

Para mitigar, el accionador de instrumento laparoscópico 120 y el conjunto de detección 122 que incluye sensores de medición de fuerza, par y aceleración se denominarán con el acrónimo LIA y FTAS respectivamente. Los componentes de la unidad efectora 30 están alineados de tal manera que la articulación J6 gira el instrumento 18 laparoscópico adaptado alrededor de eje de simetría longitudinal de este último, y de tal manera que este eje coincida con el eje Z perpendicular del FTAS 122. La posición de la unidad efectora 30 con respecto al eje de rotación de la articulación (R) J5 se selecciona en el punto de equilibrio de la unidad efectora 30, con el fin de evitar el cabeceo cuando la articulación J5 es detenida y no alimentada. Por ello, un bastidor de soporte principal 140 de la unidad efectora 30, que conecta a la muñeca 28, se configura de tal forma que la unidad efectora 30 montada, es balanceado sobre el eje de rotación de la articulación (R) J5. La relación de reducción motor / carga para la articulación J5 contribuye asimismo a la resistencia al cabeceo.

La figura 15 muestra la construcción de la articulación J6. En el bastidor de soporte principal 140 (para ser conectado a la brida de la herramienta 32) está montado un motor 141 sin escobillas con un codificador 142 incremental y un conjunto de engranaje 143. Una polea 145 del motor conectada al motor 141 está acoplada a la polea de carga 146 por medio de una correa 144. La polea de carga 146 proporciona la DOF en rotación a la articulación J6. Un sensor de posición absoluta 148 adicional está montado en el eje de la polea de carga 146 coincidiendo con el eje de la articulación (R) J6.

El codificador de posición 148 presenta un eje hueco para pasar las líneas de señal y de potencia del LIA 120 y el FTAS 122 a un colector 150 giratorio del tipo "anillo deslizante" o contacto deslizante. El anillo deslizante 150 permite la rotación infinita del eje para la articulación J6. La polea de carga 146 está conectada al FTAS 122 por medio de una brida de conexión 152. Los cables para las líneas de potencia y señal para el LIA 120 y el FTAS 122 son guiados por el interior de la cubierta 124 a través de un paso hueco en la brida de conexión 152. Tal como se apreciará, el manipulador de robot 14 como conjunto está provisto de canales internos para garantizar el guiado protegido de todas las líneas de señal y potencia, por ejemplo, de las articulaciones J1 a J6 y de los componentes de la unidad efectora 30 tales como el LIA 120 y el FTAS 122. En una mejora adicional (no mostrada), la configuración de la articulación J6 implementa las dos modificaciones siguientes: en primer lugar, la reducción de la separación O3 mediante la colocación del conjunto de motor – engranaje - polea 141, 143, 144, 145 a -90 grados con respecto a la orientación mostrada en la figura 15. En segundo lugar, la separación O4 se reduce configurando el conjunto de motor – engranaje - polea 141, 143 para estar situado más cerca del LIA 120.

Tal como se apreciará, los ejes de rotación de las articulaciones J4, J5 y J6 se cortan en el mismo punto en el espacio en la realización presentada. Por lo tanto, una posible separación causada por el eslabón L5 se elimina.

Tal como se muestra en la figura 23 y la figura 24, un diseño alternativo podría presentar una separación O5 debido al eslabón L5, por ejemplo, para mejorar la maniobrabilidad en caso de que dos instrumentos 18 laparoscópicos adaptados deban ser introducidos en trócares situados cerca (orificios de acceso 20). Por ejemplo, el diseño específico mostrado en las figuras 23 y 24 proporciona una muñeca 28' de manipulador modificada que tiene una

separación O5 negativa debido al eslabón L5. Esta separación O5 negativa permite colocar la unidad efectora 30 de un primer manipulador de robot 14 sobre la unidad efectora 30 de un segundo manipulador de robot 14 sin colisión entre las muñecas 28'. Sin embargo, esta configuración modificada requiere un mayor alcance para la articulación J3 y mayores capacidades de velocidad y aceleración para las articulaciones J2, J3 y J4. Tal como se apreciará a partir de la figura 24, la configuración de la muñeca 28' es ventajosa para operar en múltiples orificios de acceso 20 (trócares 200) situados cerca. Se comprenderá que un valor preferido de la separación O5 entre el eje de rotación de J6 y J4 tal como se muestra en la figura 23 es de aproximadamente el diámetro del LIA 120 en su sección transversal más grande.

Algunos aspectos y ventajas adicionales con respecto al diseño del manipulador de robot 14 y sus componentes se detallarán a continuación.

En cuanto a la configuración descrita de transmisiones y motores utilizados para la muñeca 28 y la unidad efectora 30, también son posibles otras configuraciones que utilizan, por ejemplo, cables y poleas como medios de transmisión, o conjuntos compactos de engranajes – motor - freno con motores de par. Sin embargo, los cables y poleas como transmisiones son más difíciles de implementación y mantenimiento, mientras que los conjuntos basados en motores de par son en general menos compactos. Para la seguridad del sistema descrito, se seleccionaron servoaccionadores que tienen una función de 'freno dinámico' para permitir detener los motores 51, 61, 71, 81, 101, 141 en caso de una parada de emergencia. La cubierta externa del manipulador de robot 14 está fabricada de un material plástico apto para la limpieza y posiblemente, en parte, de aluminio, pero todas las piezas conductoras externas están conectadas a tierra eléctrica. Todos los componentes internos están protegidos frente a EMI con respecto a la recepción y la emisión. Con respecto a la esterilización en el quirófano, normalmente se utiliza una bolsa de plástico estéril para cubrir completamente el manipulador de robot 14, es decir, desde la unidad efectora 30 a la base 24.

Con respecto al accionamiento, el diseño del manipulador de robot 14 tal como se describió anteriormente presenta dos ventajas adicionales: en primer lugar, las articulaciones del manipulador de robot 14 se pueden accionar manualmente, a excepción de la articulación J1, porque presenta una alta fricción estática e inercia invertida. En otras palabras, cuando todos los frenos están desacoplados, la unidad efectora 30 montada en la muñeca 28 en la brida 32 se puede mover a mano por medio de un accionamiento manual de las articulaciones J2, J3, J4, J5 y J6 que solamente requieren una fuerza de empuje inferior a 5 kg (en dirección horizontal). En segundo lugar, la seguridad del sistema aumenta con la redundancia de detección. Tal como se ha descrito anteriormente, cada una de las articulaciones J1 a J6 tiene un codificador de posición en el eje del motor y un sensor de posición adicional (por ejemplo, 65, 88, 108, 148) que mide la salida del movimiento efectivo de la articulación respectiva. En la práctica, esta redundancia de detección se utiliza para detectar fallos (por ejemplo, de un cable de motor, de una correa o de un servoaccionador).

Además, el diseño evita las condiciones de fin de carrera en cada una de las articulaciones J1 a J6. El fin de la ejecución ocurre cuando una articulación se sale de su límite de movimiento y es una condición crítica, particularmente en la cirugía robótica llevada a cabo remotamente, porque es difícil y engorroso para el cirujano S lograr la recuperación con un instrumento 18 introducido en el cuerpo del paciente P. Para evitar las condiciones de fin de carrera, las articulaciones prismáticas J1, J3 del brazo 26 están diseñadas con suficiente recorrido y la articulación giratoria J6 de la unidad efectora 30 está diseñada para una rotación ilimitada. Como resultado, evitar las condiciones de fin de carrera solo requiere que se respeten ciertas configuraciones iniciales predeterminadas y condiciones de configuración.

La figura 16 muestra esquemáticamente un trócar 200 y su espacio de trabajo 202 externo al cuerpo del paciente P. También se muestra un marco de referencia del fulcro FRF (Fulcrum Reference Frame, en inglés) en la figura 16, por medio de un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) con el eje z orientado hacia arriba aproximadamente paralelo a la dirección de la gravedad. El trócar 200 es introducido normalmente a través de una pequeña incisión en el abdomen del paciente P, indicada en 204, en la cavidad peritoneal. El trócar 200 junto con la incisión forma un orificio de acceso 20 tal como se muestra en las figuras 1 y 2. Para alcanzar el órgano o región en la que se va a llevar a cabo una operación, el eje longitudinal del trócar 200 se indica mediante z' se pivota en el espacio de trabajo 202 alrededor del origen del FRF, denominado punto de pivotamiento 206. En otras palabras, este origen define un fulcro para el trócar 200. El fulcro se determina preferiblemente entre la pared abdominal y la piel del paciente P, en la ubicación de menor resistencia al cabeceo, con el fin de reducir el riesgo de sacar el trócar 200.

Los siguientes rangos máximos de fuerza y par fueron registrados experimentalmente en un sensor de fuerza / par de 6 DOF colocado en la empuñadura de un instrumento laparoscópico modificado (véase "Surgeon-Tool force/torque Signatures – Evaluation of Surgical Skills in Minimally Invasive Surgery." por J. Rosen et al – Actas del Medicine Meets Virtual Reality, MMVR-7, IOS Press, San Francisco, CA, enero de 1999):

- Fuerzas: $F_x, F_y = \pm 10 \text{ N};$ $F_z = \pm 30 \text{ N};$
- Momentos: $M_x, M_y = \pm 1 \text{ Nm};$ $M_z = \pm 0,1 \text{ Nm}.$

En el presente documento, F_i representa la fuerza a lo largo del eje correspondiente $i = x, y$ o z , y M_i representa el momento sobre el eje correspondiente $i = x, y$ o z , del FRF en la figura 16. Los rangos de operación del sensor de fuerza - par en el FTAS 122 deberán tener en cuenta estos valores más el peso del LIA 120, las cargas dinámicas del movimiento y la resistencia al pivotamiento y a la penetración ejercida sobre el trócar 200. En la práctica, el sensor de fuerza - par en el FTAS 122 se utiliza para la reflexión de fuerza / par, es decir, la retroalimentación de fuerza / par a una interfaz háptica accionada por el cirujano S, para accionar manualmente la unidad efectora 30 utilizando el FTAS 122 como palanca de mando, y para monitorizar las fuerzas / pares que interactúan con un instrumento 18 conectado a la unidad efectora 30, por ejemplo las fuerzas / pares en la punta del instrumento 18 o en el punto de pivotamiento 206 en la figura 4. El acelerómetro lineal y radial en el FTAS 122 se utiliza para compensar la influencia de la gravedad y la aceleración en la información del sensor de fuerza - par. Los ejes de medición del acelerómetro y del sensor de fuerza - par en el FTAS 122 son geoméricamente coincidentes.

Durante la operación, se introduce un instrumento 18 laparoscópico a través del trócar 200. Para la mayoría de los procedimientos quirúrgicos, el cirujano S maneja el instrumento 18 dentro de los siguientes rangos máximos de espacio de trabajo angular y velocidad alrededor del FRF de la figura 16:

Eje del fulcro	Máximo recorrido	Máxima velocidad
Pivote de guiñada	+/- 70°	100 °/s
Pivote de inclinación	[+10° -80°]	60 °/s
Penetración	[0 200 mm]	200 mm/s
Balanceo	[-360° +360°]	300 °/s

Tabla 1

En el diseño y configuración de algunos manipuladores de robot de la técnica anterior, el punto de pivotamiento del trócar 200 permanece fijo después de la instalación de la muñeca gracias a la disposición mecánica de la estructura de la muñeca, que gira alrededor de un punto fijo (véase, por ejemplo: "*Remote center of motion robot*" por Taylor et al. patente de Estados Unidos N° 5667323 - mayo de 1995). Otros diseños de la técnica anterior implementan un cumplimiento mecánico a lo largo de los ejes de pivotamiento para limitar las fuerzas aplicadas al trócar (véase, por ejemplo: "*Medical robotic system*" por Wang et al.- patente de Estados Unidos N° 6102850, agosto de 2000). En oposición a esto, el manipulador de robot 14 propuesto en la presente memoria descriptiva no está diseñado con cumplimiento mecánico ni con centro de movimiento, sino que se basa en un movimiento resuelto preciso alrededor de un punto de pivotamiento 206 determinado por un procedimiento específico, y en el control en tiempo real de las fuerzas y momentos aplicados a la unidad efectora 30 para optimizar la ubicación del punto de pivotamiento 206. Además, esta característica proporciona la flexibilidad de trasladar el punto de pivotamiento 206, si así lo requiere el cirujano S, para mejorar el espacio de trabajo intraabdominal. Otra ventaja es la capacidad de adaptarse a las variaciones de la ubicación absoluta del punto de pivotamiento 206 debido, por ejemplo, a la pérdida de presión abdominal.

Tal como es evidente, el manipulador de robot 14 debe tener ciertas capacidades de movimiento para dotar a la unidad efectora 30 de una destreza comparable a la manipulación manual de instrumentos laparoscópicos por parte de los cirujanos. En base a las condiciones de movimiento presentadas en la Tabla 1, las capacidades cinemáticas preferidas que se han encontrado para las articulaciones J1 a J6 en este ejemplo específico se resumen en la Tabla 2. Los ángulos de balanceo, inclinación y guiñada se pueden definir con relación a un sistema de referencia absoluto, por ejemplo, en el fulcro.

Eje del fulcro	Máximo recorrido	Máxima velocidad	Máxima aceleración
J1 - Elevación	700 mm	600 mm/s	4 m/s ²
J2 - Hombro	+/- 90°	60 °/s	400 °/s ²
J3 - Radial	600 mm	600 mm/s	4 m/s ²
J4 - Guiñada	[-360° +360°]	260 °/s	1900 °/s ²
J5 - Inclinación	[-60° +180°]	75 °/s	500 °/s ²
J6 - Balanceo	Infinito	250 °/s	2400 °/s ²

Tabla 2

En términos de capacidades de velocidad y aceleración para la articulación respectiva, los valores proporcionados en la Tabla 1 son relativamente altos y, por lo tanto, requieren accionadores fuertes, una estructura del brazo 26 rígida y una muñeca 28 y una fijación al suelo apropiada por medio de la base 24. Obviamente, se pueden elegir valores más bajos, lo que conduce a menores necesidades, pero esto tiene un coste de una reducción de la dinámica en el punto de pivotamiento 206.

Otro aspecto relevante, especialmente en la cirugía robótica accionada remotamente con reflexión de la fuerza, es la necesidad de precisión para el manipulador 14. Una suficiente precisión contribuye a reducir las tensiones en la incisión del trócar y permite realizar una compensación precisa de fuerza / par.

5 En el diseño elegido, la precisión estática del manipulador 14 en la conexión a la unidad efectora 30, es decir, en la brida de la herramienta 32 (véase la figura 4) será mejor que ± 2 mm para la posición y mejor que $\pm 0,1^\circ$ para la orientación en el FRF (véase la figura 16). En este caso, se supone una carga externa de 1,5 kg en la punta de un instrumento 18 laparoscópico conectado, y se supone que el FRF está a 280 mm del eje de la articulación (R) J5. La precisión dinámica debe ser mejor que ± 4 mm para la posición, y de $\pm 0,5^\circ$ para la orientación en el FRF. Estas características se obtienen, entre otros, mediante un mecanizado mecánico preciso de las piezas estructurales, la rigidez de los eslabones L1 a L6 y las articulaciones J1 a J6, una resolución suficiente de los sensores de posición, un ajuste adecuado de los bucles de control del motor PID, una calibración cinemática del manipulador, etc.

En este contexto, los sensores de posición absoluta antes mencionados (por ejemplo, 65, 88, 108, 148) proporcionados a la salida de cada articulación J1 a J6 proporcionan las siguientes ventajas:

- 15 • Devolver las articulaciones J1 a J6 del manipulador de robot 14 a su estado inicial sin accionar las articulaciones; esto significa que el valor inicial de los sensores incrementales utilizados para controlar los motores es proporcionado por los sensores absolutos. Si los sensores absolutos no estuvieran disponibles, se podría implementar un procedimiento de desplazamiento que mueva cada articulación en una dirección dada para encontrar una señal de referencia. Ningún movimiento automático para la vuelta al estado inicial garantiza un procedimiento de configuración rápido y una mayor seguridad.
- 20 • Determinación en tiempo real de la posición y orientación de la unidad efectora 30, evitando errores de elasticidad de la articulación provocados por mecanismos de transmisión;
- Monitorización de desviaciones del manipulador del robot 14 desde el FRF;
- Detectar un fallo de transmisión de la articulación (por ejemplo, ruptura de la correa) u otro fallo de hardware mediante la monitorización de la coherencia de los datos utilizando las posiciones indicadas por el codificador de motor respectivo dispuesto en cada articulación J1 a J6.

Otro aspecto en robótica es el modelo matemático utilizado para controlar el manipulador de robot 14. Partiendo de un modelo teórico del manipulador de robot 14, el modelo "concreto" efectivo y preciso, que incluye parámetros tales como separaciones con respecto a la disposición cinemática, elasticidad de las articulaciones J1 a J6, elasticidad de los eslabones L1 a L7, los errores de los accionadores y otros errores de linealidad se determinan necesariamente durante un proceso de calibración. El modelo de manipulador "concreto" identificado se utiliza con tres fines: en primer lugar, mejorar la precisión del manipulador de robot 14 utilizando el modelo teórico en el controlador del movimiento (lo que simplifica el cálculo cinemático inverso) con separaciones de articulaciones y longitudes de eslabones reales; en segundo lugar, calcular con precisión, en tiempo real mediante formulación directa, la posición y orientación del FTAS 122 de 6 DOF y las cargas asociadas, (estos valores son necesarios para compensar las cargas gravitacionales y de aceleración); en tercer lugar, determinar, en tiempo real mediante formulación directa, la posición y orientación de la punta del instrumento, y deducir los parámetros necesarios para la reflexión de la fuerza (por ejemplo, la penetración del instrumento 18).

Los siguientes párrafos proporcionan una descripción más detallada del accionador del instrumento laparoscópico (LIA) 120.

40 Tal como se ve en las figuras 14 y 15, el LIA 120 forma parte de la unidad efectora 30. El LIA 120 proporciona una interfaz de accionamiento genérica para utilizar instrumentos laparoscópicos estándar, tales como fórceps de sujeción / disección, tijeras, herramientas de succión / irrigación, etc. con el manipulador de robot 14. Por lo tanto, el LIA 120 forma el extremo del manipulador 14 y representa su parte de la mano, ya que reproduce las acciones de la mano de un cirujano. El LIA 120 comprende un alojamiento 154 cuyo extremo posterior forma una brida de interfaz 156 para la conexión con el FTAS 122, mientras que su extremo frontal forma la extremidad del manipulador del robot 14. En una configuración diferente de una unidad efectora, un LIA podría incluir la articulación J6. Sin embargo, esta configuración requiere un diseño mecánico más complejo del adaptador del instrumento que debe incluir un mecanismo de rotación junto con el mecanismo de apertura - cierre y la transmisión de potencia. Además, el campo estéril debe mantenerse incluso con el mecanismo de rotación.

50 El LIA 120 mostrado en las figuras 14 a 15 y las figuras 18 a 22 está adaptado para ser utilizado con cualquier instrumento laparoscópico estándar que se pueda dividir en una empuñadura en un lado y un vástago en el otro lado. En este caso, el vástago se define como un tubo alargado comparativamente delgado que tiene en su punta, por ejemplo, inserciones de fórceps / mordazas de tijera, medios de succión / irrigación, herramientas básicas tales como una cuchilla o un dispositivo de cauterización / corte eléctrico. El extremo opuesto a la punta comprende un enchufe que está diseñado para conectar el vástago a la empuñadura para el cirujano.

La compatibilidad del manipulador de robot 14 con instrumentos estándar se consigue mediante el diseño del LIA 120 y el diseño de adaptadores de vástago de instrumento correspondientes, indicado en el siguiente párrafo por el

acrónimo ISA (Instrument Stem Adaptor, en inglés), del que se muestra un ejemplo en vista en sección parcial en la figura 17.

La figura 17 muestra el ISA (adaptador de vástago de instrumento) 300 al que se puede conectar un vástago de instrumento 302. El ISA 300 se puede conectar al LIA 120 montándolo en el asiento 130 mostrado en la figura 15. A este efecto, el ISA 300 comprende una carcasa 303 con una superficie exterior esencialmente cilíndrica. Tal como se ve en la figura 17, el ISA 300 está diseñado como elemento de acoplamiento entre el vástago del instrumento 302 de un instrumento convencional (laparoscópico) y el LIA 120. A este efecto, el ISA 300 comprende un conector de vástago 304 en su extremo frontal. El conector de vástago 304 está diseñado para la conexión a un conector hembra de tipo específico 306 del vástago 302, que depende del instrumento real. Originalmente, el conector hembra 306 está diseñado para la conexión a una empuñadura de instrumento laparoscópico (no mostrado). Tal como se ve en la figura 17, el conector de vástago 304 reproduce el conector de la empuñadura original para el que se diseñó el vástago 302. El ISA 300 comprende, además, como medio de acoplamiento, un elemento de acoplamiento 308 para una conexión segura al LIA 120. El elemento de acoplamiento 308 está dispuesto lateralmente sobre la carcasa 303 y sobresale radialmente desde allí para bloquear la rotación del ISA 300 cuando está montado en el LIA 120. Se incluye un pequeño bloque metálico 309 en el elemento de acoplamiento 308 para proporcionar una superficie metálica de detección para un interruptor de presencia inductivo (véase la parte 404 que se describe a continuación) del LIA 120. Un pistón 310 deslizable linealmente está dispuesto en una guía cilíndrica 312 interna al ISA 300. Un pasador 314 deslizante cilíndrico está unido transversalmente al pistón 310, y los salientes sobresalen de la carcasa 303 para hacer funcionar el pistón 310. El accionamiento deslizante del pistón 310 acciona una varilla en el interior del vástago 302 del instrumento para accionar la herramienta en la punta del vástago 302 del instrumento. Tal como se apreciará, el ISA 300 reproduce la funcionalidad de la empuñadura conectada originalmente al vástago 302 con respecto al accionamiento del vástago del instrumento 302, a la vez que proporciona, junto con el LIA 120, una interfaz de conexión al manipulador de robot 14.

Se comprenderá que la realización específica del ISA 300 mostrada en la figura 17 está diseñada para un instrumento que requiere un accionamiento mecánico, tal como una función de apertura / cierre para la punta del instrumento, por ejemplo, tijeras y pinzas con o sin transmisión de energía eléctrica unipolar o bipolar. Una variedad de otros tipos de adaptadores análogos también están abarcados por la presente descripción, estando cada adaptador adaptado a un tipo específico de instrumento laparoscópico, es decir, un tipo específico de vástago (por ejemplo, 302), que se va a conectar al LIA 120. Por consiguiente, el ISA comprende, dependiendo de los requisitos del instrumento, un pasador 314 deslizante lineal, por ejemplo, para el accionamiento de las mordazas del instrumento, uno o más conectores eléctricos 318, por ejemplo, para energía de cauterización unipolar o bipolar, etc., y/o una o más conexiones de conductos, por ejemplo, para instrumentos de irrigación o de succión. Aunque se muestra en la figura 17 con conectores eléctricos 318, se entenderá que para un instrumento 18 puramente mecánico, las piezas del ISA 300 que forman los conectores eléctricos 18 (dibujadas en un grosor de línea delgado en la figura 17) no necesitan ser proporcionadas. Se puede observar que el material constituyente de cualquier tipo de ISA se elegirá de manera que se pueda esterilizar, por ejemplo, por medio de un autoclave de vapor. De hecho, en virtud del diseño del LIA 120, el ISA es la única parte del sistema robótico médico 10 que necesita ser esterilizada (además del vástago del instrumento, por supuesto). Durante el funcionamiento, el alojamiento 154 del LIA 120 y las otras piezas de la unidad efectora 30 están alojadas en una bolsa de plástico estéril. Aunque no se muestra, es evidente que, para instrumentos no accionados mecánicamente, sino accionados eléctricamente, tales como electrobisturries o cuchillas, el ISA no necesita tener el pasador 314 deslizante y una transmisión mecánica asociada. Para instrumentos tales como una cánula de irrigación o de succión, el ISA está equipado con dos tubos que se controlan remotamente por medio de electroválvulas accionadas eléctricamente por el sistema de control del robot.

El LIA 120 mostrado en la figura 18 está diseñado con un peso ligero (por ejemplo, menos de 800 g de peso total) y se adapta a una envolvente cilíndrica relativamente pequeña de aproximadamente 90 mm o, preferiblemente, de 75 mm de diámetro, para aumentar el espacio de trabajo disponible de dos herramientas adyacentes con orificios de acceso 20 cercanos. La longitud total del LIA 120 (aproximadamente 130 mm en un ejemplo específico) está determinada principalmente por la longitud del ISA 300. La longitud del LIA 120 se minimiza para limitar la distancia entre el eje de rotación de la articulación J5 y el punto de pivotamiento 206 del FRF (véase la figura 17). De hecho, esta distancia es determinante para el rango del recorrido y las capacidades de velocidad / aceleración de todas las articulaciones J1 a J5 del manipulador. Sin embargo, se recomienda que la longitud del LIA 120 sea de al menos 6 cm con el fin de permitir la sujeción del LIA 120 con la mano en modo manual (es decir, utilizando el alojamiento 154 conectado al FTAS 122 como una "palanca de mando").

Tal como se puede ver en la figura 18, la superficie exterior del alojamiento 154 tiene bordes suaves. Está realizada de un material fácil de limpiar, ligero y no conductor. Además, el LIA 120 tiene un diseño parcialmente en rotación simétrico con respecto al vástago 302 de un instrumento 18 adaptado montado utilizando un ISA 300. Cuando el ISA 300 está conectado apropiadamente al LIA 120, el eje del vástago 302 coincide con el eje de rotación de la articulación J6 y con el eje perpendicular del FTAS 122.

Tal como se ve adicionalmente en la figura 18, el alojamiento 154 del LIA 120 comprende un mecanismo de accionamiento lineal 400 para accionar un instrumento 18 montado por medio del ISA 300, tal como se detallará a continuación. El asiento 130 está formado por un conducto semicilíndrico alargado cóncavo en una superficie de acceso 401 del LIA 120, para facilitar la introducción y la extracción del ISA 300. El asiento 130 para alojar el ISA

300 es aproximadamente coaxial al eje de rotación de la articulación J6 y se extiende a lo largo del eje central del alojamiento 154. Tal como se apreciará, la dirección del montaje y la extracción del ISA 300 con respecto al LIA 120 es radial con respecto al eje de rotación de la articulación J6. El LIA 120 está configurado de tal manera que el asiento 130 es accesible desde el semiplano completo por encima de la superficie de acceso 401. Tal como se ve en la figura 18, el asiento 130 comprende una ranura 402 longitudinal que profundiza el asiento 130 radialmente en el cuerpo del LIA 120. La ranura 402 adicional está configurada para recibir el elemento de acoplamiento 308 del ISA 300. La parte de acoplamiento de un mecanismo de bloqueo 406 asociado al asiento 130 está dispuesta en la ranura 402 y colabora con el elemento de acoplamiento 308. El asiento 130 está formado como un rebaje semicilíndrico con una porción extrema redondeada conformada a la forma cilíndrica exterior de la carcasa 303 del ISA 300. Un detector de presencia 404, por ejemplo, un interruptor de presencia inductivo, está dispuesto en el asiento 130 para la detección de presencia del ISA 300, detectando el bloque metálico 309 (véase la figura 17). Un pulsador de interruptor de hombre muerto 408 permite conmutar el sistema de control del manipulador de robot 14 al modo manual. En modo manual, el LIA 120 (y, si está conectado, el instrumento 18) es posicionado y orientado por el manipulador de robot 14 utilizando la información generada por el asistente que maneja el alojamiento 154 del LIA 120 y leída por el FTAS 122. El modo manual es particularmente útil para introducir o extraer un instrumento a través de un trócar.

Los detalles del mecanismo de accionamiento 400 lineal se ven mejor en la figura 20. El mecanismo de accionamiento 400 comprende un motor 411 sin escobillas en miniatura conectado a través de una carcasa de engranajes 412 y de las poleas 414 y 416, que están acopladas mediante una correa 418, a un husillo de bolas 420. El husillo de bolas 420 colabora con una tuerca 422 dispuesta sobre el mismo para transformar la rotación en movimiento lineal, tal como se ve en la figura 19. La tuerca 422 es guiada por una guía lineal 424 para reducir los esfuerzos transversales en el husillo de bolas 420. Los interruptores limitadores 426 y 428 inductivos están colocados en las ubicaciones de fin de recorrido de la tuerca 422 y conectados a una unidad de control para limitar el recorrido del mecanismo de accionamiento 400.

Tal como se ve en la figura 19, el mecanismo de accionamiento 400 comunica el movimiento lineal a un carro 430 deslizante del LIA 120, tal como se detallará a continuación. En una realización preferida, se eligieron los siguientes parámetros para el mecanismo de accionamiento 400:

- recorrido mecánico máximo del carro 430 deslizante: 7 mm (normalmente 5 mm son suficientes para instrumentos estándar, pero se ha encontrado que varios vástagos del mismo tipo pueden tener longitudes de recorrido que varían hasta 2 mm);
- rango de la velocidad de desplazamiento: de 1 mm/s a 20 mm/s;
- fuerza de accionamiento máxima: 200N.

Los motores paso a paso se evitan preferiblemente en el LIA 120 porque producen vibraciones que serían una fuente considerable de ruido para el FTAS 122. Por lo tanto, se utiliza un motor 411 sin escobillas en miniatura equipado con un codificador de la posición del eje. Dichos motores están comercializados, por ejemplo, por Faulhaber GmbH, Schoenaich, Alemania. Sin embargo, no se excluyen otros mecanismos de movimiento lineal sin vibración, tales como la transmisión por cable.

La figura 20 muestra una unidad de alimentación y control 440 para el motor 411 que está incrustado en el alojamiento 154 del LIA 120 y alimentado, por ejemplo, con 24 VCC de potencia. Para reducir aún más el diámetro del alojamiento 154, la unidad de alimentación y control 440 puede estar situada en un alojamiento adicional entre la brida 156 y el FTAS 122, o entre el FTAS 122 y una brida de conexión a la articulación J6 (no mostrada), o en el interior de la cubierta 124 de la articulación J6, por ejemplo, detrás del colector 80 del anillo deslizante cerca del motor 141. La unidad de alimentación y control 440 está diseñada para accionar el carro 430 deslizante con un perfil de velocidad dado según las órdenes de posición recibidas, para limitar la corriente del motor a demanda del usuario, para gestionar el movimiento en base a las señales de los interruptores limitadores 426, 428, para devolver el motor 411 a su situación inicial utilizando un interruptor limitador, y para monitorizar el detector de presencia 404 en el alojamiento 154. Otras funciones de seguridad, por ejemplo, las funciones de parada de emergencia también se implementan utilizando un servo error del motor 411, es decir, la posición objetivo menos la posición efectiva y la protección térmica del motor 411. Para reducir el espacio necesario para el LIA 120, el mecanismo de accionamiento 400 lineal no está equipado con un sensor de posición absoluta. Sin embargo, se garantiza un procedimiento de referencia automático utilizando los interruptores limitadores 426 y 428 como sensores de estado inicial. Durante el funcionamiento, la posición absoluta del carro 430 deslizante puede ser registrada periódicamente, por ejemplo, en una memoria adecuada del sistema de control del robot, para una recuperación rápida del sistema después de una interrupción o fallo de alimentación. La presencia del ISA 300, es decir, si está montado correctamente en el LIA 120, es detectada por medio del conmutador de presencia 404 inductivo (véase la figura 18) dispuesto en el asiento 130. La salida del conmutador de presencia 404 inductivo es alimentada a una entrada disponible de la unidad de control 440.

Tal como se ve mejor en las figuras 17 y 19, el carro 430 deslizante del mecanismo de accionamiento 400 está adaptado para recibir el pasador 314 deslizante del ISA 300. Por la acción del motor 411, el carro 430 deslizante es

5 posicionado de nuevo para conducir el pasador 314 deslizante de un ISA 300 conectado. El pasador 314 deslizante acciona a su vez el pistón 310 para accionar un elemento o herramienta de trabajo en la punta del vástago 302 (no mostrado), por ejemplo, un mecanismo de apertura / cierre de la mordaza. En otras palabras, la combinación del mecanismo de accionamiento 400 lineal e ISA 300 simula la acción de la empuñadura que ha sido extraída del vástago 302 y es reemplazada por el ISA 300. La introducción del pasador 314 deslizante en el carro 430 deslizante se facilita mediante las superficies de guía 434 biseladas.

10 La figura 21 y la figura 22 muestran con más detalle la configuración del mecanismo de bloqueo 406 del LIA 120 mostrado, solo parcialmente, en la figura 18. El mecanismo de bloqueo 406 está configurado como un pestillo, y comprende un cierre 450 deslizante dispuesto en la ranura 402 (mostrada en la figura 18) del asiento 130. Se comprenderá que el cierre 450 está guiado por medios adecuados en la ranura 402. La ranura 402, junto con el cierre 450 deslizante, están configurados para recibir en acoplamiento el elemento de acoplamiento 308 del ISA 300 que se muestra en la figura 17. El cierre 450 comprende dos narices 452 para acoplar dos salientes 316 formados por ranuras en el elemento de acoplamiento 308 (véase la figura 17). Los bordes del elemento de acoplamiento 308 están redondeados para facilitar la introducción y la extracción en / desde la ranura 402.

15 El diseño del cierre 450 se ve mejor en la figura 22. Un resorte 454 empuja elásticamente el cierre 405 hacia el FTAS 122. Un pomo 456 guiado linealmente permite girar un pivote 458 que está acoplado al cierre 450 guiado linealmente para desacoplar manualmente el cierre 450 del elemento de acoplamiento 308 cuando se debe extraer el ISA 300. Las narices 452 del cierre 450 están biseladas para permitir la introducción del ISA 300 simplemente empujando. Las porciones de acoplamiento de las narices 452 y los salientes 316 están redondeadas de acuerdo con un perfil conjugado, con el fin de limitar los daños a una lámina de plástico estéril utilizada para cubrir el LIA 120. Tal como se comprenderá, se podrían utilizar asimismo otros mecanismos de acoplamiento o bloqueo equivalentes, por ejemplo, utilizando imanes permanentes instalados en el LIA con placas metálicas y una palanca basada en una leva montada en el ISA para reemplazar el mecanismo de pestillo. Se prefiere que el mecanismo de fijación, por ejemplo, el mecanismo de bloqueo 406 y el elemento de acoplamiento 308, estén diseñados para garantizar que el ISA 300, cuando está montado en el LIA 120, puede resistir las siguientes fuerzas y momentos sin desconectarse del LIA 120:

- fuerzas de tracción y compresión de 100 N;
- momentos de torsión correspondientes a fuerzas radiales de 15 N en la punta del instrumento;
- momentos de flexión de hasta 5 Nm.

30 Se apreciará que el LIA 120 y cada ISA que colabora (por ejemplo, 300) están diseñados para una instalación manual rápida y fácil y la extracción de un instrumento 18 laparoscópico adaptado, es decir, un vástago (por ejemplo, 302) ensamblado con un ISA (por ejemplo, 300) por el asistente A del cirujano. La forma exterior esencialmente cilíndrica del ISA 300, su elemento de acoplamiento 308, el asiento 130, la ranura 402 y el mecanismo de bloqueo 406 tal como los descritos anteriormente proporcionan una introducción guiada y un procedimiento de conexión sencillo del ISA 300 al LIA 120. El diseño garantiza la rigidez necesaria cuando se introduce el ISA y un procedimiento simple de extracción mediante unos pocos movimientos manuales. Mediante este diseño, la introducción y la extracción del instrumento 18 adaptado (es decir, el vástago y el ISA) se puede llevar a cabo esencialmente tan rápido como en operaciones quirúrgicas manuales, en las que el asistente reemplaza un instrumento convencional para el cirujano en aproximadamente 6 a 9 segundos.

40 Se debe observar que la introducción o la extracción de un instrumento 18 adaptado que comprende el ISA (por ejemplo, 300) y el vástago (por ejemplo, 302) puede realizarse de forma segura en ambos casos, cuando el instrumento está fuera del cuerpo del paciente P o cuando el instrumento está introducido en el cuerpo del paciente P. También es posible llevar a cabo la extracción mientras se impulsa el pasador 314 deslizante.

45 Antes de montar el instrumento adaptado en el LIA 120, se deben cumplir varias condiciones preliminares. En primer lugar, si el instrumento está parcialmente introducido en el trócar (sin exceder la longitud del trócar), el LIA 120 debería ser previamente posicionado y orientado por el manipulador 14 hacia una posición enseñada que alinee el eje de rotación de la unidad efectora 30 (articulación J6) con el trócar. En segundo lugar, el carro 430 deslizante debería ser colocado en la "posición de referencia de introducción" por el sistema de control del robot, por ejemplo, una posición más cerrada a la brida de interfaz 156. Cuando se retira un ISA (por ejemplo, 300), el carro 430 deslizante debería ser desplazado de manera automática a esta "posición de referencia de introducción" por el sistema de control del robot. Tal como se mencionó anteriormente, el detector de presencia 404 puede detectar una presencia, una ausencia o una liberación anormal de un ISA. En tercer lugar, y si está presente, el pasador deslizante (por ejemplo, 314) del ISA (por ejemplo, 300) debería estar en una "posición de referencia de introducción" correspondiente a la del carro 430 deslizante. Esta posición del pasador 314 deslizante se define preferiblemente de modo que el instrumento esté en configuración "cerrada", por ejemplo, las mordazas de un instrumento de fórceps / tijera están sueltas, pero suficientemente cerradas en esta posición. Tal como se ilustra mejor en la figura 14, el procedimiento de introducción de un instrumento 18 laparoscópico adaptado que incluye un ISA (por ejemplo, 300) y un vástago (por ejemplo, 302) puede llevarse a cabo mediante un solo movimiento manual simple de acuerdo con la flecha 460, que consiste en colocar el ISA (por ejemplo, 300) en su asiento 130 y presionar

ligeramente sobre el ISA en la misma dirección para acoplar el elemento de acoplamiento 308 con el mecanismo de bloqueo 406. El detector de presencia 404 proporciona una salida afirmativa cuando el elemento de acoplamiento 308 se instala correctamente en la ranura 402. Durante este procedimiento de introducción, el carro 430 deslizante se acopla al pasador 314 deslizante sin la necesidad de otras medidas, si se han cumplido las condiciones mencionadas anteriormente.

Cuando el cirujano S solicita un cambio de instrumento a través de su consola principal 15, se realizan cuatro operaciones, normalmente llevadas a cabo de manera automática por el sistema de control del robot. En primer lugar, el sistema de control del robot controla el instrumento 18 para liberar cualquier tejido. En segundo lugar, desplaza el instrumento cerca del orificio del trócar siguiendo la dirección del eje del instrumento. En tercer lugar, la punta de la herramienta, por ejemplo, las mordazas del instrumento, se llevan a una configuración que evita el enganche de la punta en el trócar. En cuarto lugar, libera el motor de la articulación J6 de forma tal que el asistente A del cirujano puede girar libremente el LIA 120 para facilitar la extracción del instrumento del LIA 120. Después de estas operaciones, la extracción de un instrumento 18 laparoscópico adaptado puede llevarse a cabo de forma segura en dos movimientos simples y en cualquier momento.

El primer movimiento de extracción consiste en empujar el pomo 456 para desbloquear el mecanismo de bloqueo 406. El segundo movimiento de extracción consiste en girar el ISA (por ejemplo, 300) y el vástago (por ejemplo, 302) alrededor de la punta del vástago mediante rotación alrededor de un eje perpendicular al eje del vástago para extraer ambos del asiento 130 y, posteriormente, si aún está introducido, para extraer el vástago (por ejemplo, 302) del cuerpo del paciente P.

Como es evidente a partir de los procedimientos de introducción y extracción anteriores, el diseño del LIA 120 y del ISA (por ejemplo, 300) permite la introducción o extracción del instrumento incluso cuando el vástago (por ejemplo, 302) de un instrumento 18 adaptado todavía está parcialmente introducido en el cuerpo del paciente P a través del trócar 200 (véase la figura 16). Como se apreciará, los movimientos requeridos para la extracción no están en la dirección de penetración con respecto al paciente P, ya que consisten en un movimiento pivotante perpendicular al eje longitudinal del asiento 130 y un posterior movimiento de extracción. Además, en caso de que un movimiento en una dirección de pivotamiento dada pueda dañar al paciente, esta dirección puede cambiarse girando el LIA 120 con la mano LIA a través de la articulación J6. Además, en caso de fallo de energía, un ISA (por ejemplo, 300) junto con su vástago (por ejemplo, 302) se puede liberar y extraer manualmente.

Con respecto al LIA 120 tal como se describió anteriormente, se apreciará que en el sistema robótico 10 se puede utilizar una amplia variedad de instrumentos laparoscópicos estándar existentes, por medio de adaptadores de vástago de instrumento (ISA) simples (por ejemplo, 300). El LIA 120 en combinación con un ISA correspondiente reemplaza la parte de la empuñadura de un instrumento laparoscópico dado sin pérdida de la capacidad de accionamiento o de suministro de energía. El LIA 120 está diseñado genéricamente, es decir, es independiente del tipo de instrumento que se va a acoplar al manipulador de robots 14. Por lo tanto, solo el ISA (por ejemplo, 300) debe diseñarse específicamente de acuerdo con los requisitos del instrumento. Tal como se describió anteriormente, el LIA 120 es capaz de proporcionar, entre otras, las siguientes funciones:

- accionamiento de "apertura/ cierre" de las puntas de las herramientas del instrumento, por ejemplo, de las mordazas del instrumento, utilizando el mecanismo de accionamiento lineal 400;
- adaptación de la longitud del recorrido de la "apertura/ cierre" necesaria para cada tipo de instrumento;
- manejo de instrumentos no accionados tales como cuchillas por la acción del manipulador de robot 14.

Además, el LIA 120 permite una rentabilidad beneficiosa en la laparoscopia robótica debido a varios factores. En primer lugar, a diferencia de los dispositivos de la técnica anterior que requieren varios accionadores por cada manipulador debido a que el instrumento y el accionador asociado se ensamblan como una sola unidad en un solo recinto, solo se necesita un LIA 120 para cada manipulador 14. Esto permite un ahorro, entre otros, en los costes del accionador. En segundo lugar, los costes de los instrumentos se reducen utilizando los vástagos (por ejemplo, 302) de los instrumentos laparoscópicos estándar y los correspondientes adaptadores de vástago (por ejemplo, 300) de construcción simple. Por lo tanto, el coste de un instrumento 18 adaptado para su utilización con el LIA 120 es casi idéntico al coste de un instrumento laparoscópico manual estándar (es decir, que incluye la empuñadura). En tercer lugar, los costes de mantenimiento del instrumento son esencialmente iguales a los de los instrumentos laparoscópicos estándar, porque el diseño del ISA (por ejemplo, 300) es robusto frente a los ciclos de esterilización.

Volviendo a la figura 25, se describirá una realización alternativa de un LIA 1120. Dado que muchos aspectos y ventajas del LIA descrito anteriormente en este documento también se aplican al LIA 1120, solo se detallarán a continuación las principales características y diferencias.

El LIA 1120 mostrado en la figura 25 tiene un alojamiento 1154 semicilíndrico que tiene una superficie de acceso 1401 sustancialmente plana para facilitar el montaje y la extracción de un ISA en el LIA 1120. La superficie opuesta 1155 del alojamiento 1154 es semicilíndrica en conformidad con una envolvente cilíndrica que es coaxial al eje de rotación de J6. El diámetro de la superficie semicilíndrica 1155 se elige ergonómicamente para permitir la

manipulación por parte de un operador humano, por ejemplo, en el rango de 50 mm a 135 mm, preferiblemente de aproximadamente 90 mm, especialmente para controlar el manipulador de robot 14 en el modo manual mencionado anteriormente. Dado que el alojamiento semicilíndrico tiene una sección transversal sustancialmente más pequeña que la brida de interfaz 156 por medio de la cual el LIA 1120 está unido al FTAS 122, el alojamiento 1154 incluye además nervios 1157 de refuerzo graduales. Los nervios de refuerzo tienen una forma gradual, es decir, de crecimiento uniforme comenzando desde la superficie de acceso 1401 hasta el borde superior de la brida de interfaz 156. Los nervios de refuerzo 1157 están además curvados de conformidad con la envolvente cilíndrica de la superficie semicilíndrica 1155. Los nervios de refuerzo 1157 conectan la superficie de acceso 1401 a la brida de interfaz 156 y, de este modo refuerzan y aumentan la rigidez de la fijación del alojamiento 1154 a la pestaña 156 de interfaz. Con ello, los nervios de refuerzo 1157 garantizan una transmisión más precisa de las fuerzas y pares de un ISA a través del LIA 1120 al FTAS 122. Se puede observar que nervios de refuerzo similares también se proporcionan en el LIA 120 de la figura 14.

La figura 25 muestra además un mecanismo de acoplamiento alternativo para montar un adaptador de vástago de instrumento al LIA 1120 y, por lo tanto, a la unidad efectora 30. En el LIA 1120, como en el LIA 120, está formado un asiento 1130 como un rebaje semicilíndrico alargado cóncavo en la superficie de acceso 1401, para proporcionar el autocentrado de un adaptador en el eje de rotación de J6. Además, el mecanismo de acoplamiento comprende una pluralidad de dispositivos magnéticos 1423, dos en el lado del carro 1430 deslizante y uno en el otro lado del asiento 1130, estando el último dispuesto en una elevación 1425 fuera de la superficie de acceso 1401. La elevación 1425 proporciona una restricción de retención adicional en la dirección axial a un adaptador montado y permite el posicionamiento autoajustado en la dirección axial del adaptador mediante superficies inclinadas hacia la superficie de acceso 1401. Como se comprenderá, los dispositivos magnéticos 1423, que pueden ser electroimanes, imanes permanentes o una combinación de ambos, aseguran la sujeción de un ISA diseñado de forma correspondiente mediante atracción magnética. Evitar un accesorio mecánico de encaje a presión elimina el riesgo de dañar una cubierta de plástico estéril utilizada para envolver el manipulador 14 o, por lo menos, la unidad efectora 30.

La figura 25 ilustra una pluralidad de sensores de presencia 1431 inductivos para identificar un instrumento montado en la unidad efectora 30 por medio de un patrón material identificable de manera inductiva dispuesto en un ISA. Cuatro sensores de presencia 1431 inductivos se agrupan en una fila y permiten distinguir e identificar 16 tipos de instrumentos cuando se utiliza un código binario (palabra de 4 bits) basado en la presencia o ausencia de material conductor en una fila de ubicaciones correspondientes en el ISA orientada hacia los sensores de presencia 1431 inductivos. Además, los sensores de presencia 1431 inductivos permiten asimismo la detección de presencia si el código del patrón (palabra de 4 bits) correspondiente a un instrumento ausente se utiliza para este propósito, es decir, cuando ningún material conductor está orientado hacia ningún sensor 1431 inductivo.

Un elemento de acoplamiento 1433 se muestra por separado en la figura 25. El elemento de acoplamiento 1433 forma parte del mecanismo de accionamiento que incluye el carro 1430 deslizante y que tiene superficies de captura 1434 biseladas que conducen a una hendidura para acoplarse al pasador 314 deslizante de un ISA. Las superficies 1434 biseladas facilitan la introducción del pasador 314 deslizante de un ISA. Como se apreciará, el elemento de acoplamiento 1433 es desmontable del carro 1430 deslizante y está fabricado de un material compatible con la esterilización. El elemento de acoplamiento puede, de este modo, ser instalado en el carro 1430 solo después de que una envoltura estéril cubra el LIA 1120. Dado que el rango de movimiento del carro 1430 está limitado, no puede dañar la envoltura estéril.

La figura 26 muestra una realización alternativa de un ISA 1300 montado en el LIA 1120 de la figura 25. El ISA 1300 está diseñado para ser compatible con el diseño alternativo del LIA 1120 y se detallará a continuación. El ISA 1300 está dimensionado de tal manera que su base está confinada a la superficie de acceso 1401. La función del ISA 1300 es la misma que la del ISA 300 que se muestra en la figura 17, a saber, proporcionar una interfaz que permita la utilización de los vástagos 302 de instrumentos laparoscópicos manuales estándar en el manipulador de robot 14 sin pérdida de ninguna funcionalidad disponible en las intervenciones manuales. La figura 26 muestra asimismo el pulsador de conmutación 408 dispuesto en el LIA 1120 para conmutar el sistema al modo manual. El ISA 1300 está provisto de una palanca 1301 para un desmontaje manual fácil, es decir, que separa el ISA 1300 del LIA 1120. El ISA 1300 tiene asimismo un conector eléctrico 1308 para conectar instrumentos alimentados (por ejemplo, instrumentos de coagulación o corte) directamente a una fuente de energía eléctrica sin que pasen cables a través del LIA 1120.

Tal como se desprende de las figuras 25 y 26, el diseño es tal que todos los componentes del LIA 1120, incluidos el alojamiento 1154, la brida 156, los nervios de refuerzo 1157, el conjunto de detección del FTAS 122 y todas las piezas del ISA 1300 montado, incluida la palanca 1301 están situados en el interior de la envolvente cilíndrica definida por la superficie semicilíndrica 1155. Esto es para reducir el riesgo de colisión y daño cuando J6 hace girar el LIA 1120.

La figura 27 muestra un mecanismo de accionamiento 1400 alternativo para comunicar el movimiento lineal al carro 1430 deslizante, que difiere en el diseño del mecanismo de la figura 19. Comprende un motor 1411 sin escobillas en miniatura conectado a través de la carcasa de engranajes 1412 y un husillo de bolas o un engranaje de tornillo sin fin 1420 a un elemento de tuerca 1422. El carro 1430 está fijado al elemento de tuerca 1422 a través del intermedio de un sensor de fuerza 1427. El sensor de fuerza 1427 permite medir fuerzas ejercidas por el carro 1430 sobre el

pasador 314 deslizante y viceversa. Se apreciará asimismo que, en virtud del montaje del carro 1430 deslizante en el lado del asiento longitudinal 1130, el motor 1411 y los engranajes conectados pueden disponerse en paralelo al eje longitudinal del ISA 1300 y el vástago 302. Esto permite minimizar la longitud total del LIA 1120, por lo que se reducen las necesidades de las dinámicas del accionador para ciertas articulaciones (por ejemplo, J4). Además, se apreciará que este mecanismo de accionamiento 1400 está optimizado con respecto a la producción de vibración perjudicial. Otros aspectos y ventajas del mecanismo de accionamiento 1400 son similares a los del mecanismo 400 descrito anteriormente en este documento.

La figura 28 muestra el lado inferior del ISA 1300 de la figura 26 cuando está separado del LIA 1120. El ISA 1300 comprende una carcasa 1303 alargada con un conector de vástago 1304 en su extremo frontal (véase la figura 30). El conector de vástago 1304 permite la conexión extraíble a un conector hembra 306 del tipo fijado al vástago 302 (solo parcialmente mostrado) de un instrumento laparoscópico estándar, siempre que se proporcione cualquier tipo de conexión desmontable. Por supuesto, el conector y el conector hembra podrían estar situados respectivamente en el vástago y el ISA. De manera similar a la carcasa 303, la carcasa 1303 tiene una superficie semicilíndrica en su lado inferior para colaborar con el asiento 1130. Tal como se ve en la figura 28, las alas 1305 laterales sobresalen de cada lado de la carcasa 1303. Las alas 1305 laterales tienen una superficie plana que es conjugada con la superficie de acceso 1401 en el LIA 1120 (por ejemplo, también con la elevación 1425). Se proporciona un espacio recortado 1307 en un ala 1305 por encima del pasador 314 deslizante para proporcionar visibilidad y acceso, por ejemplo, para desplazar manualmente el pasador 314 deslizante cuando el ISA 1300 está acoplado al LIA 1120. La figura 28 muestra asimismo los elementos ferromagnéticos 1311 planos dispuestos en cada ala 1305 a cada lado de la carcasa 1303. Los elementos ferromagnéticos 1311 forman medios de acoplamiento que colaboran respectivamente con un dispositivo magnético 1423 correspondiente en el LIA 1120, tal como se muestra en la figura 25. En la región 1313, está dispuesto un patrón identificable inductivamente en el ISA 1300 para identificar, por medio de los sensores 1431 inductivos mostrados en la figura 25, el instrumento que se utiliza. En esta realización mostrada en la figura 25, una placa metálica completa corresponde a una palabra dada de 4 bits (por ejemplo, 1111 o 0000), mientras que en otros adaptadores se pueden proporcionar huecos, por ejemplo, perforando orificios en una o más de las posiciones orientadas hacia los sensores 1431 inductivos, para proporcionar una palabra de bit diferente para identificación.

La figura 29 muestra el ISA 1300 de la figura 28 en una vista parcialmente desmontada. Tal como se ve en la figura 29, el ISA 1300 tiene un hueco interno que sirve como guía 1312 cilíndrica para un pistón 310 de un cierto instrumento laparoscópico manual. El pistón 310 se utiliza típicamente en el instrumento manual para comunicar el movimiento desde la empuñadura del instrumento al eje guiado en el vástago 302. Se apreciará que el pistón existente de un instrumento manual se puede disponer para deslizar en la guía 1312. Tal como se ve en la figura 28, se proporciona un orificio pasante 1315 oblongo en la carcasa 1303, que permite al pasador 314 deslizante unido transversalmente al pistón 310 sobresalir de la carcasa 1303 y desplazarse hacia delante y hacia atrás en la dirección axial de la carcasa 1303 para hacer funcionar el pistón 310. El pistón 310 mostrado en la figura 29 es una pieza original de un instrumento bipolar manual, que se utiliza para proporcionar potencia eléctrica bipolar al instrumento y para bloquear / desbloquear el instrumento.

La figura 30 es para ilustrar que se puede utilizar el mismo tipo de adaptador para alojar diferentes pistones de diferentes tipos de instrumentos laparoscópicos disponibles en el mercado para la intervención manual, por ejemplo, el pistón 1310, para un instrumento manual monopolar tal como el mostrado en la figura 30. Se deduce que los adaptadores tales como el ISA 1300 (o el ISA 300) permiten la utilización de las piezas esenciales de cualquier instrumento manual relativamente económico disponible comercialmente en el manipulador de robot 14. La figura 29 muestra asimismo una de las dos espigas 1317 de la palanca 1301 y el eje 1319 sobre el cual pivota. Mediante el empuje hacia abajo de la palanca 1301, las espigas 1317 elevan la superficie inferior y, en particular, los elementos ferromagnéticos 1311, del ISA 1300 alejándolos de la superficie de acceso 1401 del ISA 1120, de tal manera que el ISA 1300 puede ser extraído manualmente en una dirección perpendicular al eje de rotación de J6, es decir, el eje del vástago del instrumento.

Además de los aspectos descritos anteriormente, el sistema robótico médico 10 presenta asimismo las siguientes características:

- los manipuladores de robot 14, en virtud de su diseño, pueden ser retraídos fácil y rápidamente para permitir al cirujano S acceder a la mesa de operaciones 12 o para permitir la instalación de un instrumento radiológico;
- los manipuladores de robot 14, en virtud de su diseño y utilización de la información de un sensor externo, pueden adaptarse fácilmente sin un aumento significativo del tiempo de intervención a las variaciones angulares de la mesa de operaciones 12 durante la intervención, para la posición de Trendelenburg o de anti Trendelenburg (- / + 20 grados a 35 grados) o para la orientación lateral del paciente;
- los manipuladores de robot 14, en virtud de su diseño y utilización de la información de un sensor externo, pueden gestionar fácilmente las variaciones de posición del trócar debido a cambios en la presión intraabdominal;
- el sistema robótico médico 10 permite tiempos cortos de cambio de instrumento para minimizar el tiempo de intervención total, el diseño del LIA 120; 1120 y el manipulador de robot 14 permiten tiempos de cambio de

instrumento esencialmente tan cortos como en los procedimientos manuales de laparoscopia (que van de 6 a 9 segundos), cuando se utiliza con un endoscopio, el diseño del manipulador de robot 14 permite asimismo una extracción y reintroducción rápida del endoscopio, por ejemplo, para limpiar la óptica;

5 - el sistema robótico médico 10 permite una configuración rápida y sencilla del sistema, que incluye la configuración de una pluralidad de manipuladores de robot 14 alrededor de la mesa de operaciones 12;

- el manipulador de robot 14 está diseñado de forma versátil para ser adecuado para una variedad de aplicaciones, tales como la cirugía mínimamente invasiva, la ortopedia, la biopsia, la terapia percutánea, la obtención de piel, el diagnóstico por ultrasonidos, etc.

10 Aunque la presente solicitud de patente tal como se ha presentado en principio se refiere a la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas, el experto en la técnica comprenderá fácilmente que la presente solicitud de patente contiene soporte para la definición de otras invenciones, que podrían, por ejemplo, ser reivindicadas como objeto de las reivindicaciones enmendadas en la presente solicitud, o como objeto de las reivindicaciones en las solicitudes divisionales y/o de continuación. Dicho objeto podría ser definido por cualquier característica o combinación de características descrita en la presente memoria descriptiva.

15

REIVINDICACIONES

1. Sistema robótico médico para llevar a cabo procedimientos médicos, que comprende un manipulador de robot (14) para la manipulación asistida por robot de un instrumento médico (18), en el que dicho manipulador de robot comprende:
- 5 una base (24);
- un brazo (26) de manipulador, que tiene una parte esencialmente vertical (27) soportada por dicha base y una parte esencialmente horizontal (29) soportada por dicha parte vertical;
- una muñeca (28) de manipulador, soportada por dicho brazo del manipulador; y
- 10 una unidad efectora (30), soportada por dicha muñeca del manipulador y configurada para sujetar un instrumento médico;
- dicho brazo (26) del manipulador tiene una configuración cinemática PRP cilíndrica, que tiene, en secuencia y únicamente las tres articulaciones siguientes, una primera articulación (P) (J1) prismática para variar la altura de dicha parte vertical proporcionando un grado de libertad en traslación a lo largo de un eje esencialmente vertical, una
- 15 segunda articulación (R) (J2) giratoria para variar el ángulo de rotación entre dicha parte vertical y dicha parte horizontal proporcionando un grado de rotación de libertad sobre un eje esencialmente vertical, y una tercera articulación (P) (J3) prismática para variar el alcance de dicha parte horizontal proporcionando un grado de libertad de traslación a lo largo de un eje esencialmente horizontal, y
- caracterizado por que dicha muñeca (28) del manipulador comprende, en secuencia después de dicha tercera articulación (J3), una cuarta articulación (R) (J4) giratoria y una quinta articulación (R) (J5) giratoria para orientar la
- 20 unidad efectora (30), siendo los ejes de rotación de dicha cuarta articulación (R) (J4) y dicha segunda articulación (R) (J2) paralelos.
2. Sistema robótico médico según la reivindicación 1, en el que dicha primera articulación (P) (J1) tiene una guía (52) lineal vertical y un primer accionador (50) lineal, preferiblemente un eje de husillo de bolas lineal, para accionar dicha primera articulación (P) (J1), y en el que dicha tercera articulación (P) (J3) tiene una guía (73) lineal horizontal y un
- 25 segundo accionador (70) lineal, preferiblemente un eje de husillo de bolas lineal, para accionar dicha tercera articulación (P).
3. Sistema robótico médico según la reivindicación 2, en el que dicha parte horizontal comprende una cubierta (74) alargada que aloja dicha guía lineal horizontal y dicho segundo accionador lineal, comprendiendo dicha parte horizontal un brazo (72) que es telescópico con respecto a dicha cubierta en un lado y soporta dicha muñeca (28) en
- 30 el otro lado.
4. Sistema robótico médico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dicha segunda articulación (R) (J2) tiene un engranaje, preferiblemente un engranaje de accionamiento armónico (62), un motor (61), preferiblemente un servo motor sin escobillas, acoplado a la etapa de entrada de dicho engranaje, y un sensor de posición absoluta (65) acoplado a la etapa de salida de dicho engranaje.
- 35 5. Sistema robótico médico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicha parte horizontal (29) de dicho brazo tiene una separación mínima de conexión de 800 mm.
6. Sistema robótico médico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que dicha unidad efectora (30) incluye una articulación (J6) giratoria, en secuencia después de dicha quinta articulación (R) (J5) giratoria.
7. Sistema robótico médico según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha cuarta articulación (R) (J4) proporciona un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje esencialmente vertical para establecer el
- 40 ángulo de guiñada de dicha unidad efectora (30), y la articulación (R) (J5) proporciona un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje esencialmente horizontal para establecer el ángulo de inclinación de dicha unidad efectora (30).
8. Sistema robótico médico según la reivindicación 7, en el que dicha muñeca (28) comprende una placa de soporte (80) conectada a dicha parte horizontal (29) de dicho brazo, y un elemento de soporte (100) sustancialmente en
- 45 forma de L, conectando dicha cuarta articulación (R) (J4) una primera parte horizontal de dicho elemento de soporte a dicha placa de soporte (80), y conectando dicha quinta articulación (R) (J5) una segunda porción vertical de dicho elemento de soporte (100) a un medio de conexión (32) para dicha unidad efectora (30), estando configurada dicha muñeca de tal manera que los ejes de rotación de dicha cuarta articulación (R) y dicha quinta articulación (R) son
- 50 perpendiculares y tienen un punto de intersección.
9. Sistema robótico médico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que dicha unidad efectora (30) comprende un accionador de instrumento laparoscópico (120; 1120) que tiene medios para montar un instrumento quirúrgico (18) en dicho manipulador y un mecanismo de accionamiento (400; 1400) lineal para accionar un instrumento quirúrgico montado.

- 5 10. Sistema robótico médico según la reivindicación 9, en el que dicha unidad efectora (30) comprende un bastidor de soporte principal (140) para conectar dicha unidad efectora (30) a dicha muñeca (28) y una sexta articulación (R) (J6) giratoria que une dicho accionador de instrumento laparoscópico (120; 1120) a dicho bastidor de soporte principal, proporcionando dicha sexta articulación (R) un grado de libertad en rotación a lo largo de un eje que coincide con el eje longitudinal de un instrumento quirúrgico montado en dicho accionador de instrumento laparoscópico, para ajustar el ángulo de balanceo de dicho instrumento quirúrgico montado.
11. Sistema robótico médico según la reivindicación 10, en el que los ejes de rotación de dicha sexta articulación (R) (J6) y dicha quinta articulación (R) (J5) son perpendiculares.
- 10 12. Sistema robótico médico según la reivindicación 10 u 11, en el que dicha muñeca (28) de manipulador está configurada de tal manera que los ejes de rotación de dicha sexta articulación (R) (J6) y dicha cuarta articulación (R) (J4) están separados una distancia (O5) que corresponde aproximadamente al diámetro del accionador del instrumento laparoscópico (120; 1120) en su sección transversal más grande.
- 15 13. Sistema robótico médico según la reivindicación 10, 11 o 12, en el que dicha unidad efectora (30) comprende un conjunto de detección (122) que comprende un sensor de fuerza / par de 6 DOF y un acelerómetro lineal y angular de 6 DOF coincidentes, conectando dicho conjunto dicho accionador del instrumento laparoscópico a dicha sexta articulación (R) (J6).
- 20 14. Sistema robótico médico según la reivindicación 1 o 10, en el que dicha cuarta articulación (R) (J4), dicha quinta articulación (R) (J5) y/o dicha sexta articulación (R) (J6) tiene un motor (81; 101; 141), preferiblemente un servomotor sin escobillas, un engranaje (83; 103; 143) que tiene una etapa de entrada acoplada al eje de dicho motor, una transmisión de correa (84; 104; 144) acoplada a la etapa de salida de dicho engranaje para transmitir movimiento a la articulación asociada, y un sensor de posición absoluta (88; 108; 148) acoplado a dicha transmisión de correa.
- 25 15. Sistema robotizado médico según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha primera articulación (P) (J1) prismática y dicha tercera articulación (P) (J3) prismática tienen respectivamente un freno asociado y un sensor de posición absoluta asociado.

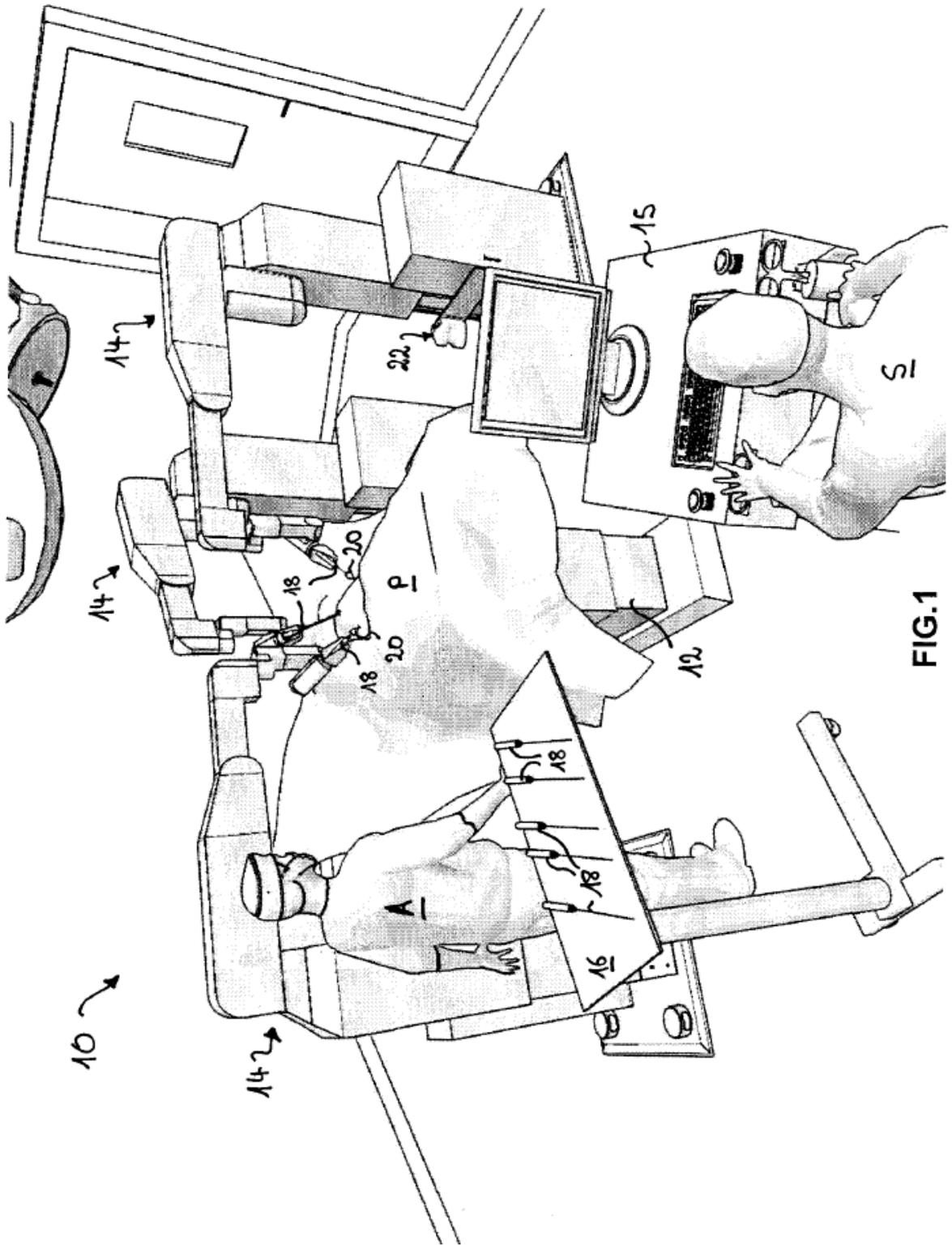


FIG.1

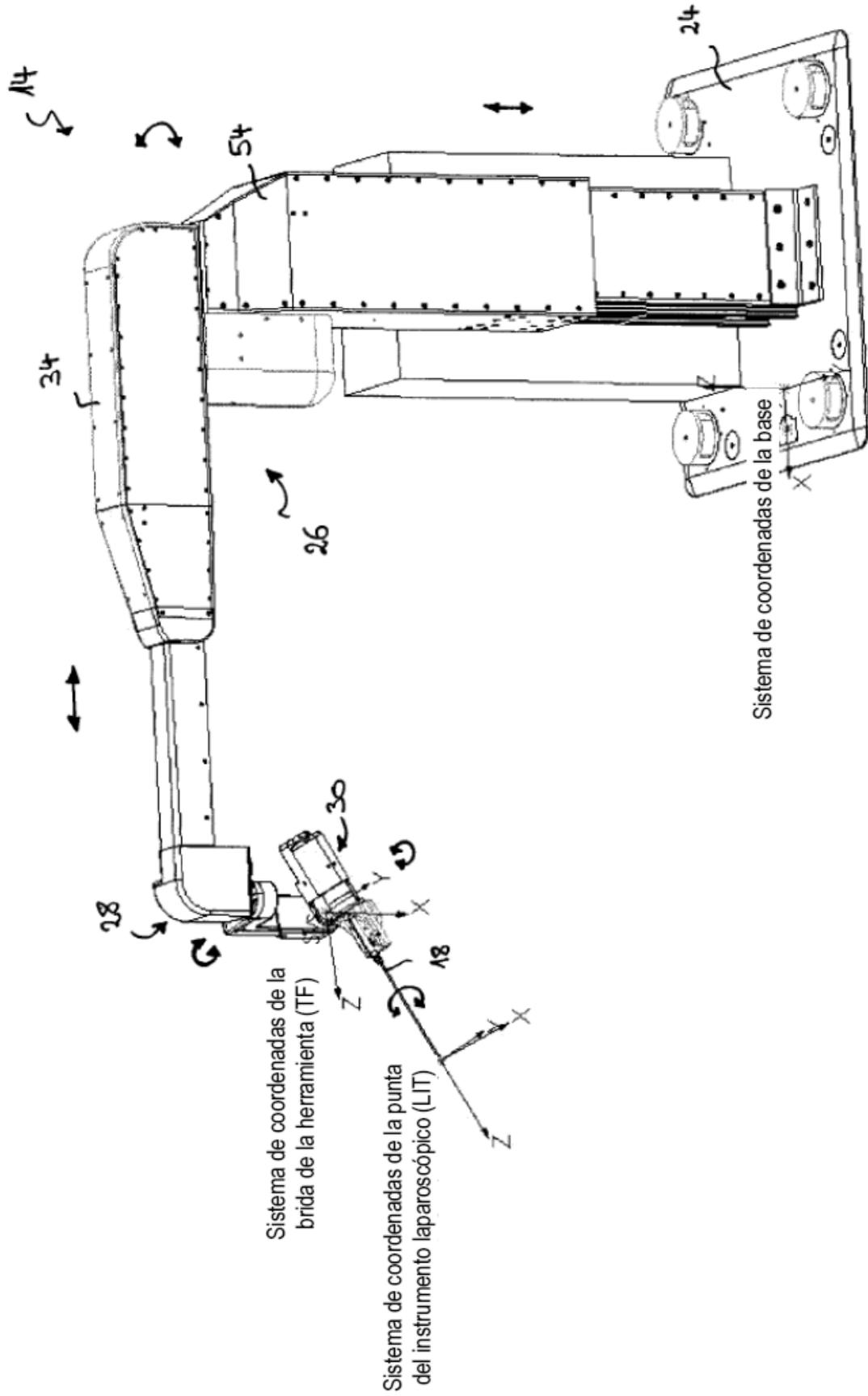


FIG.3

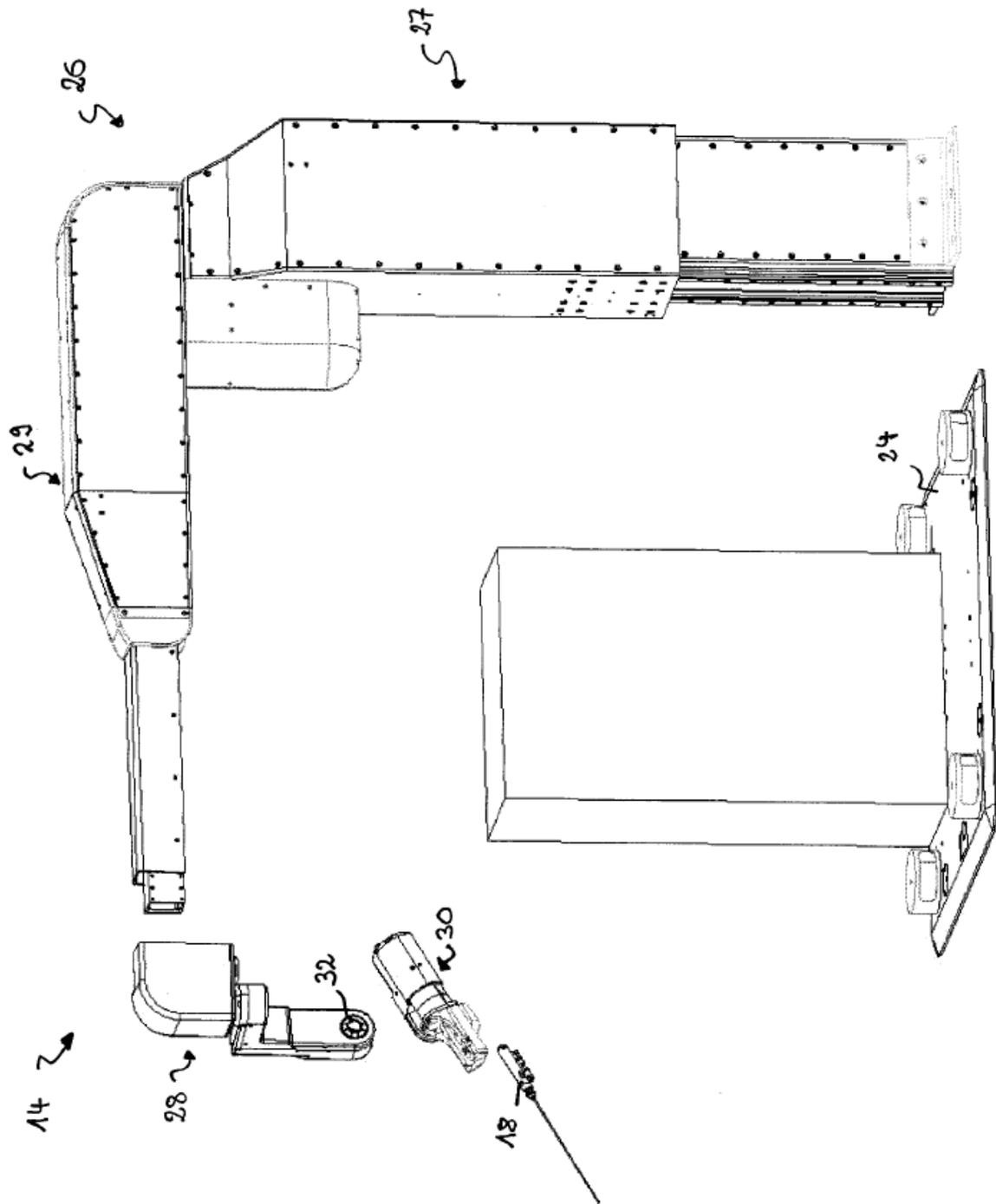


FIG.4

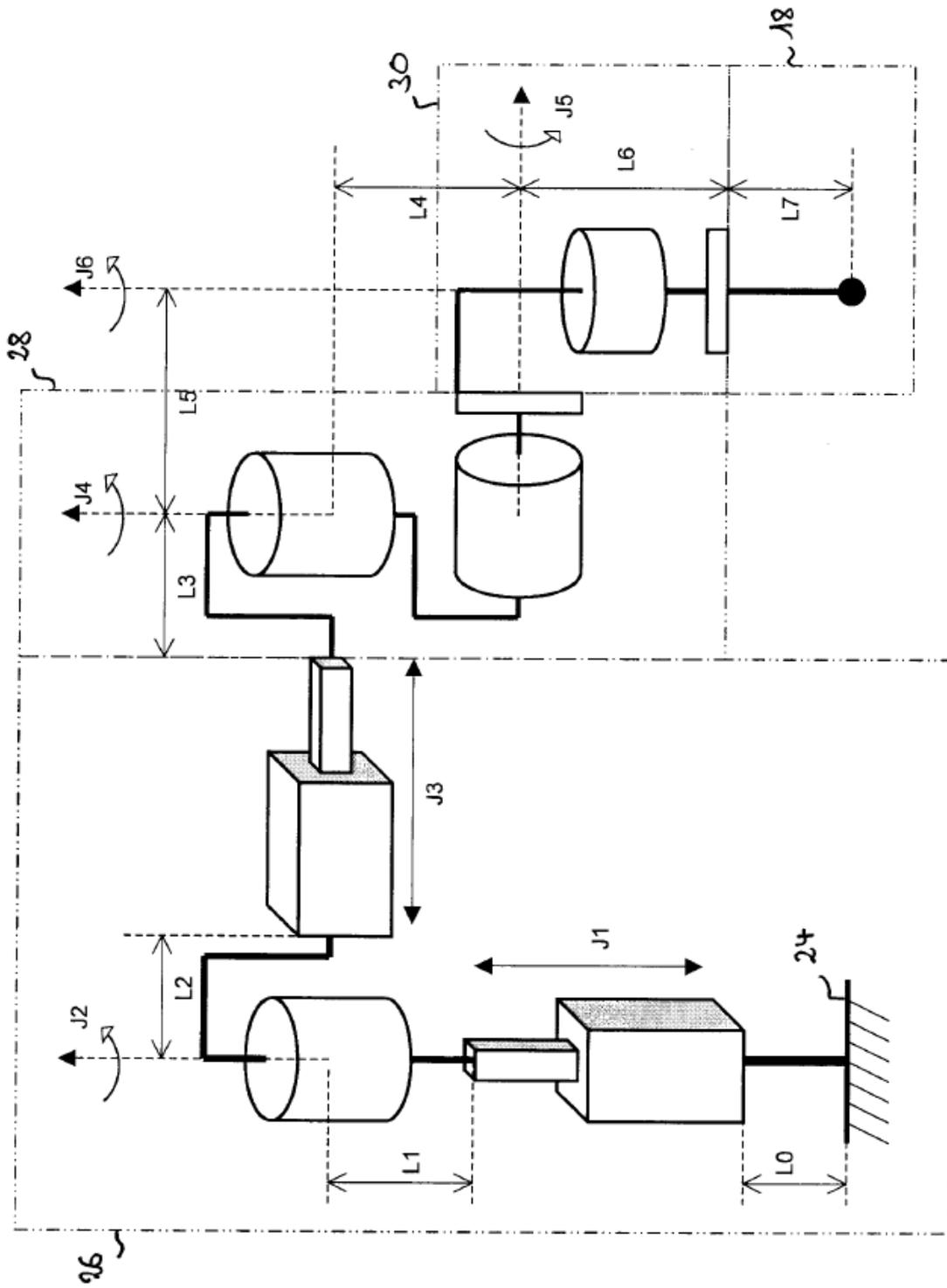
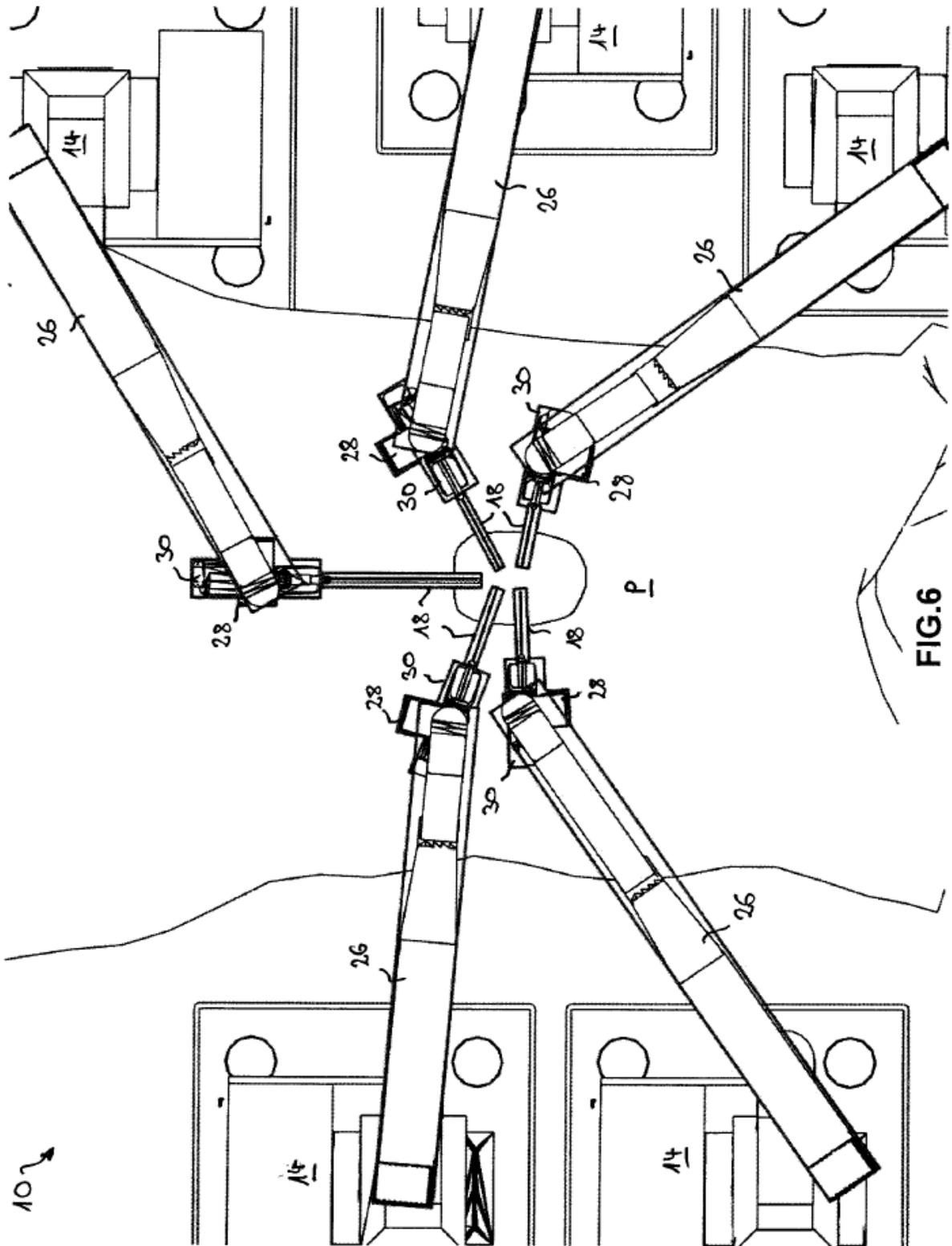


FIG.5



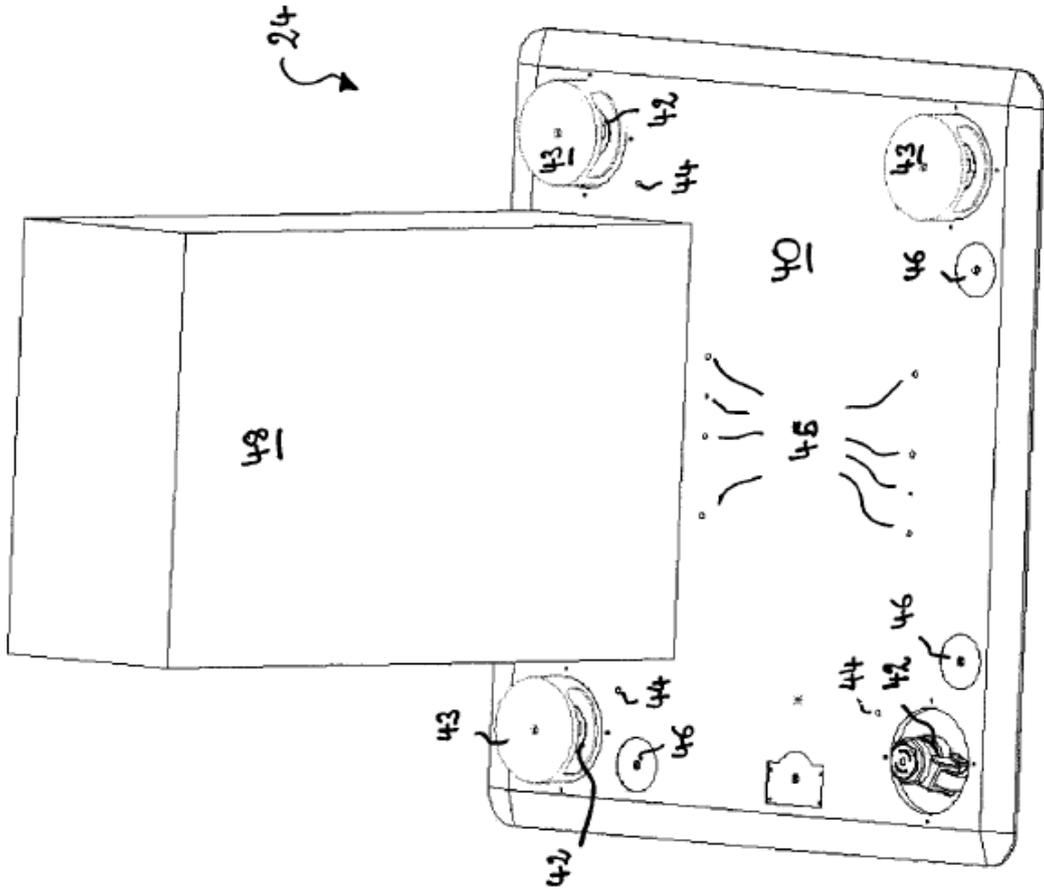


FIG.7

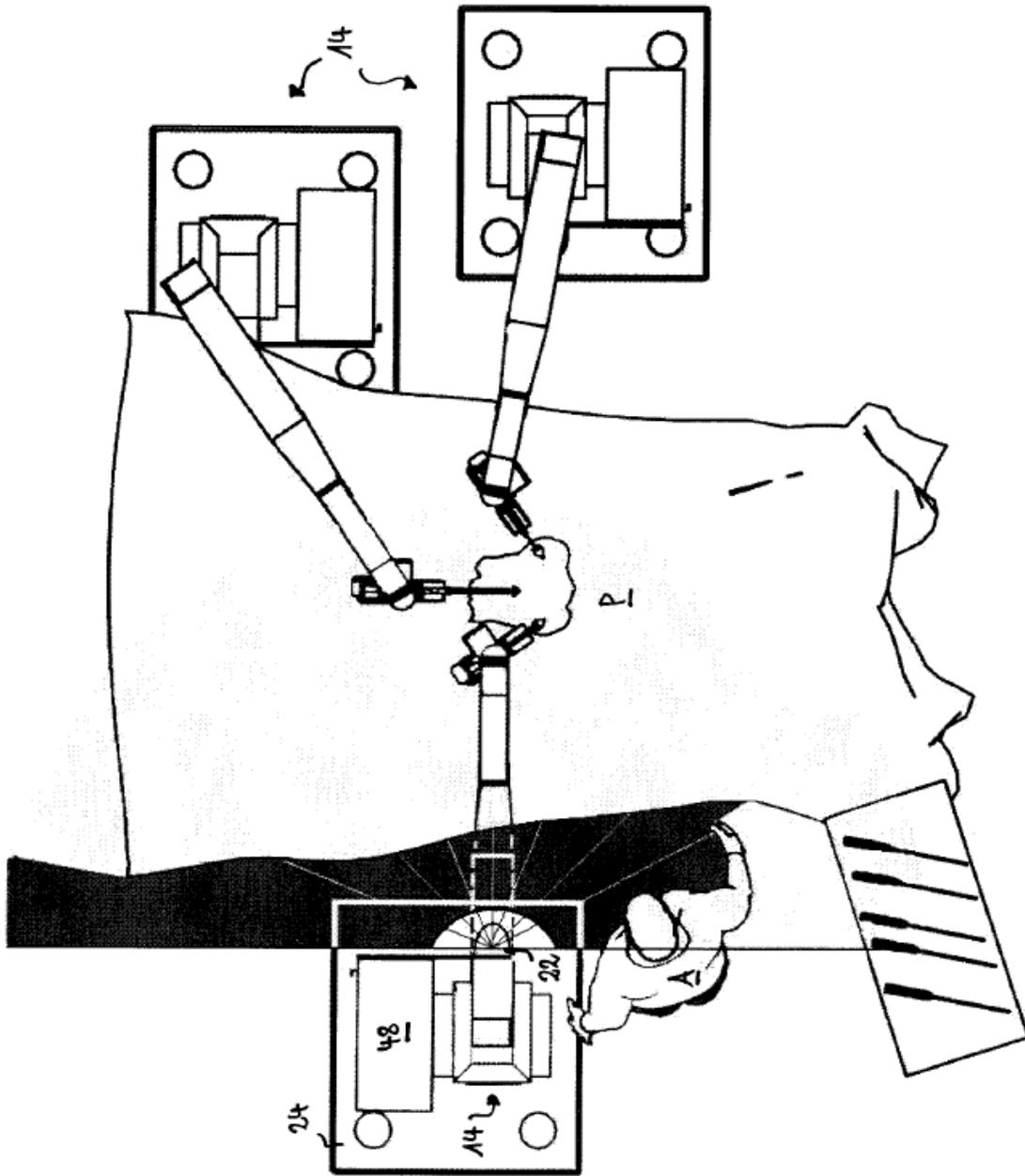


FIG.8

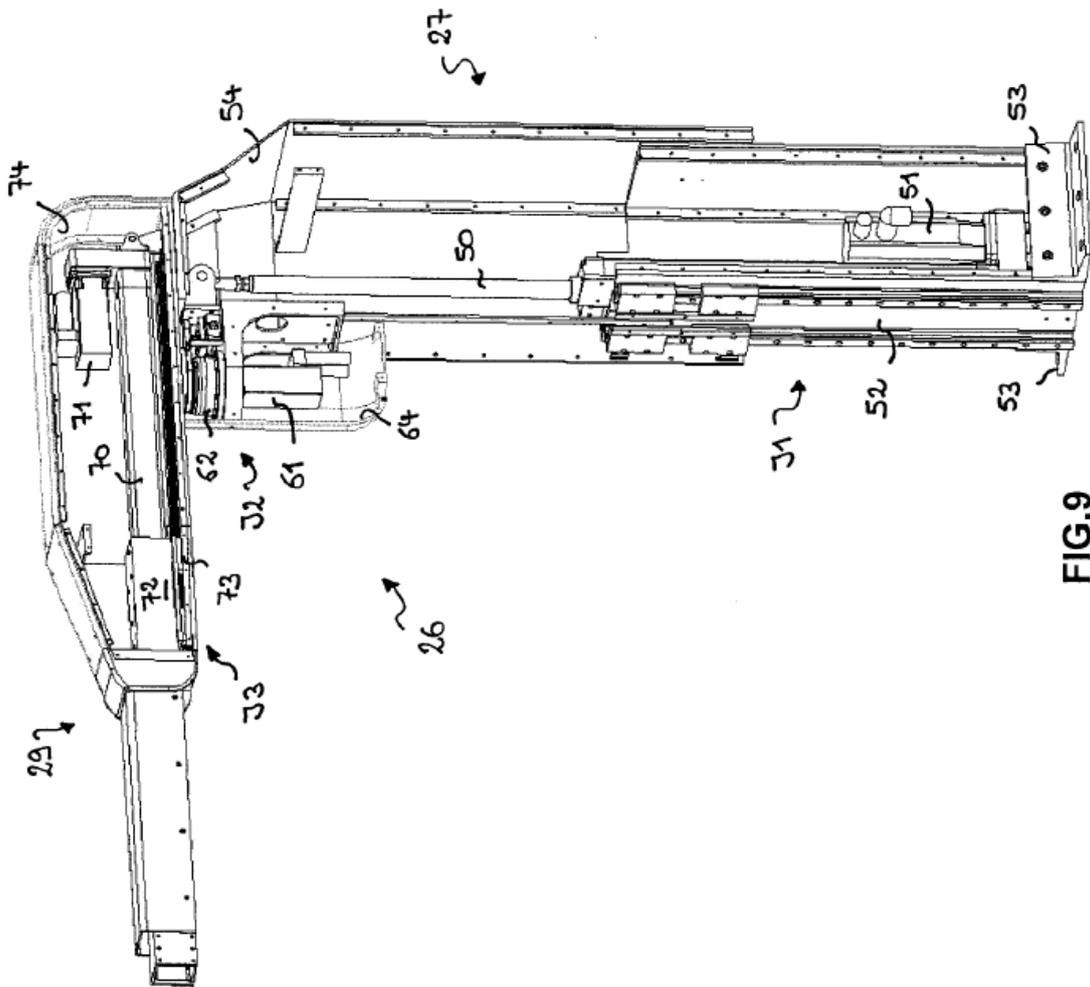


FIG.9

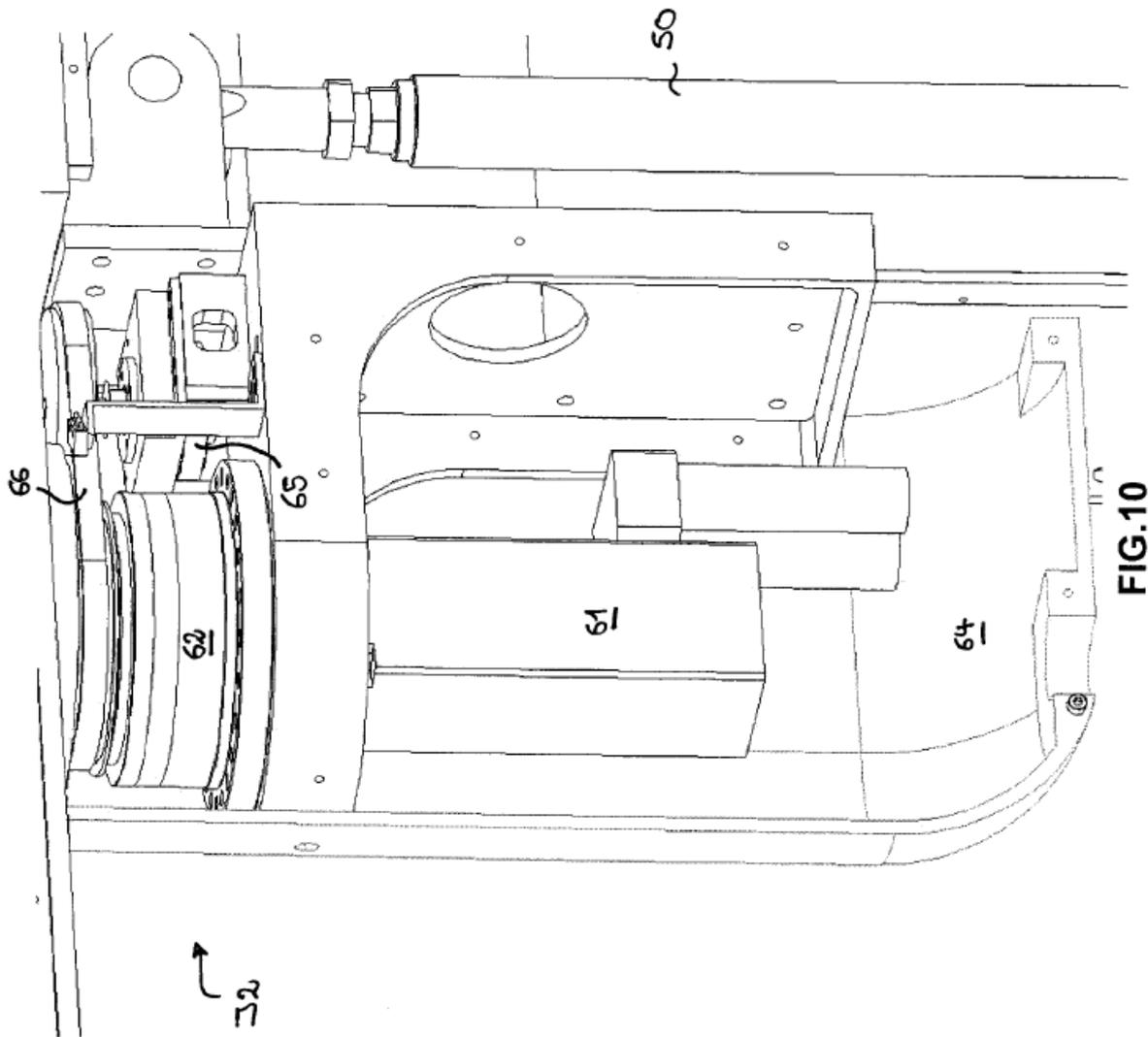


FIG.10

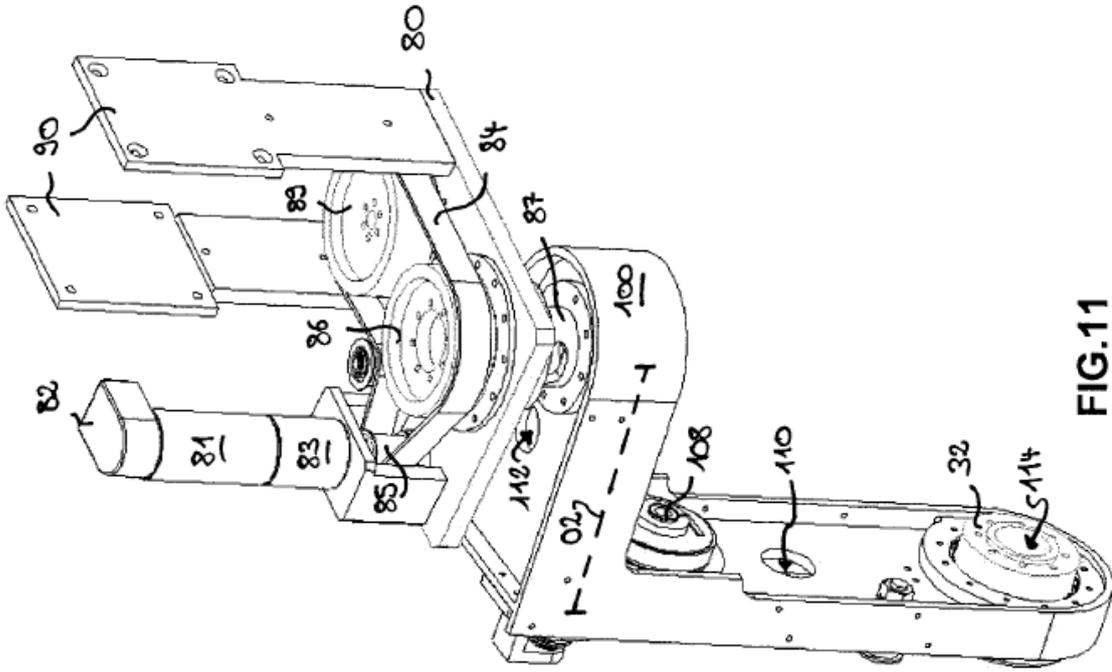


FIG.11

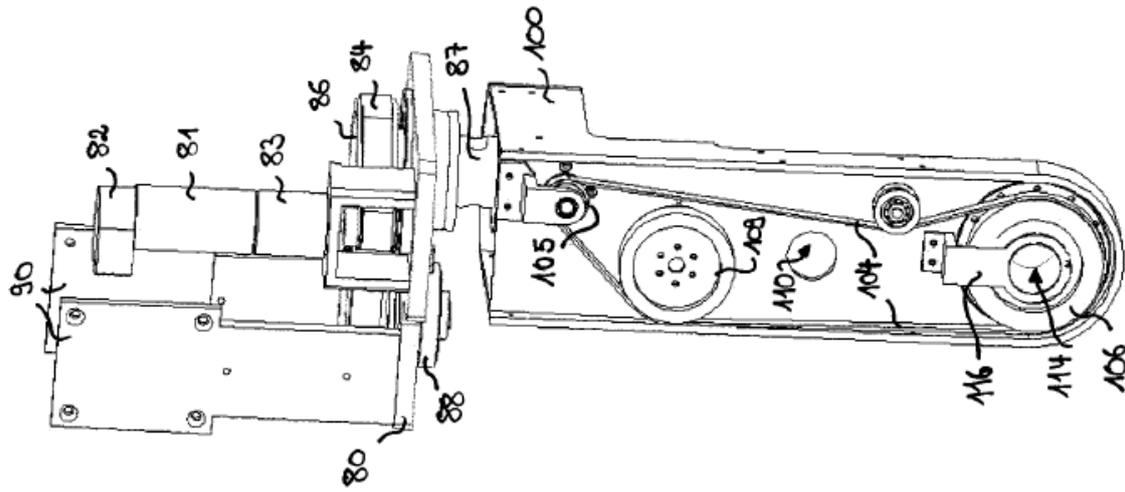


FIG.12

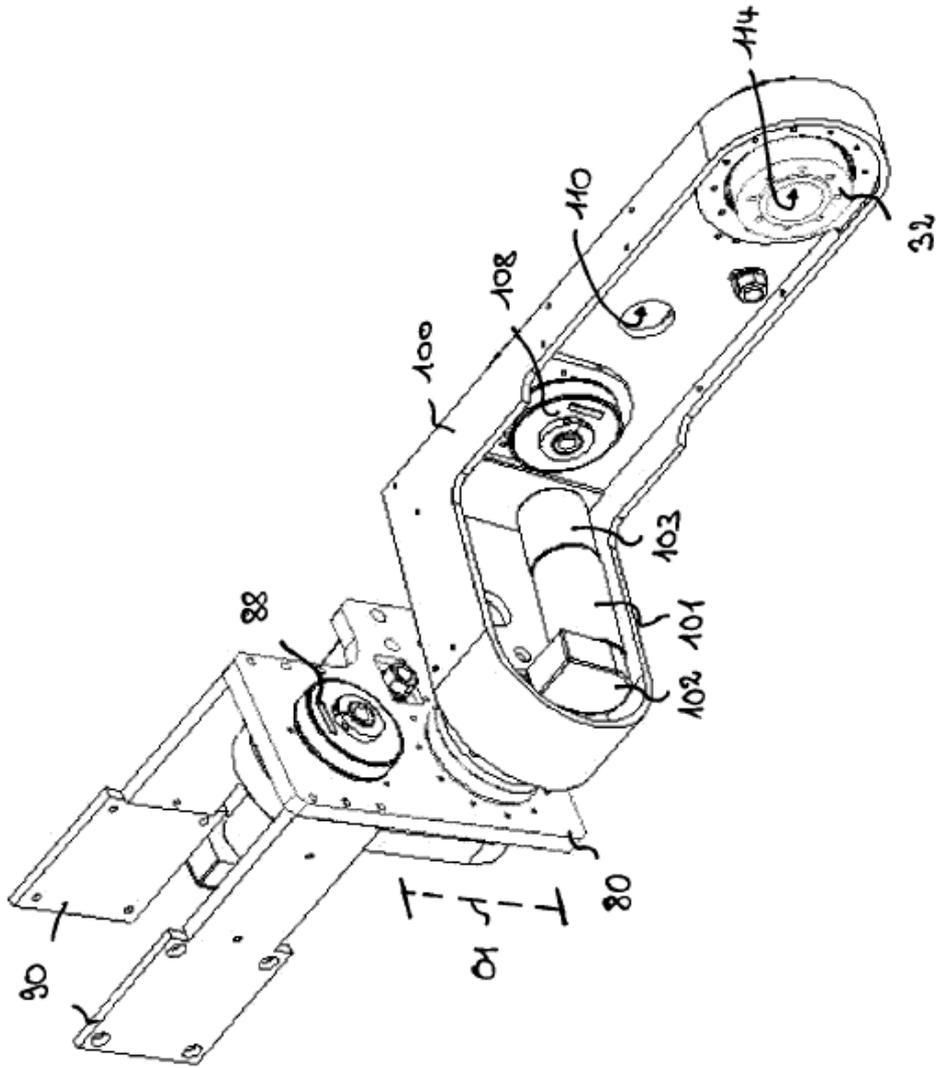


FIG.13

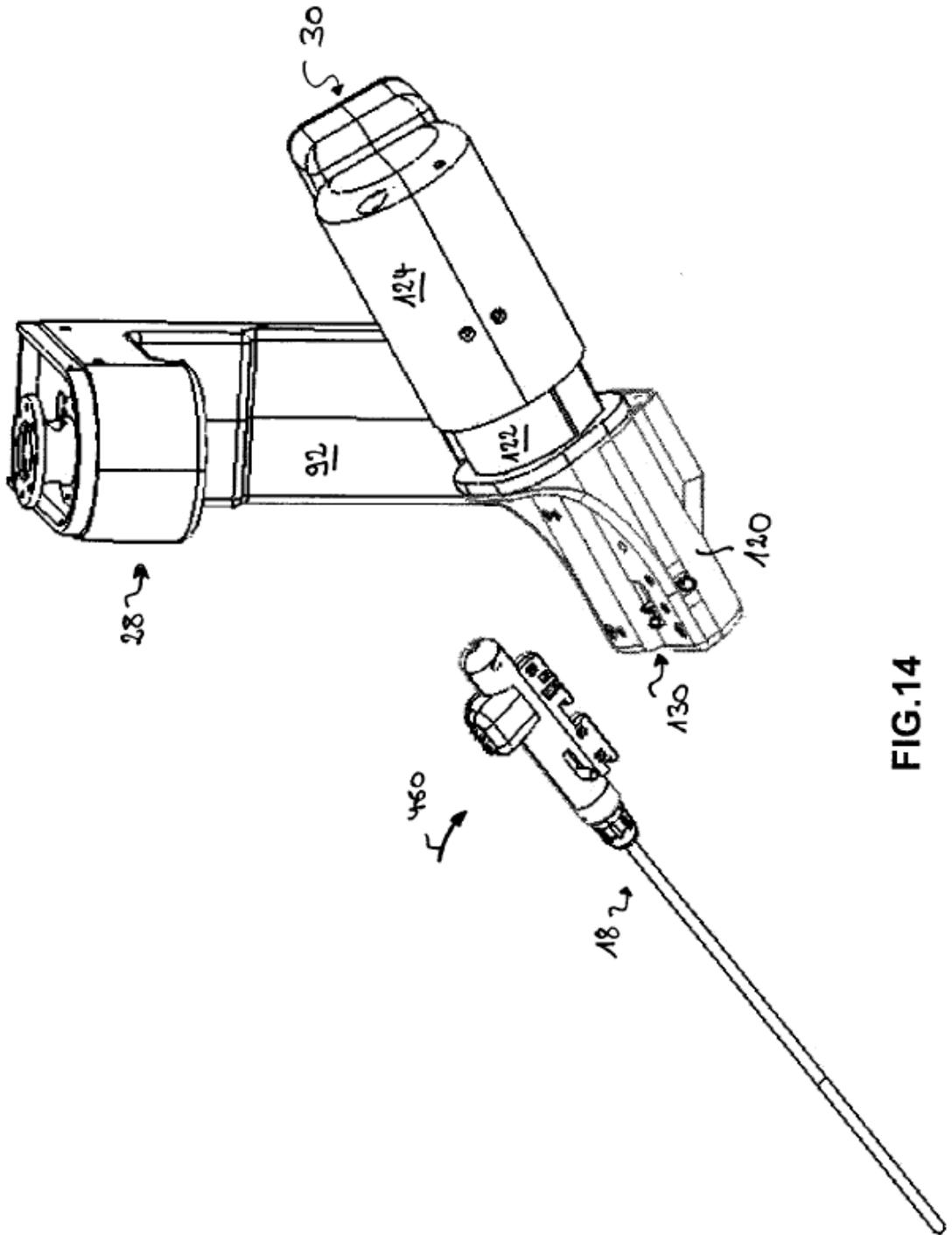


FIG.14

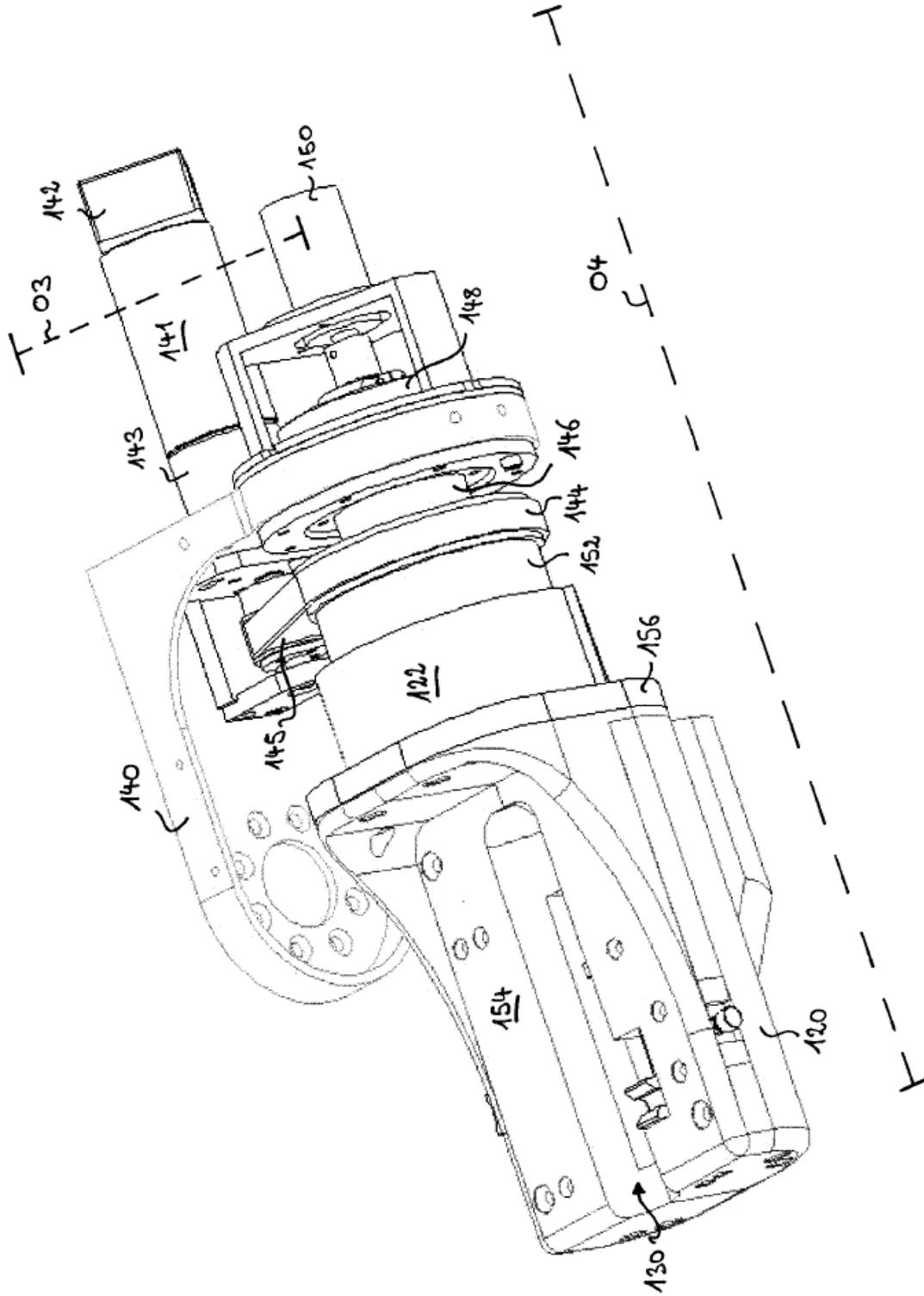


FIG.15

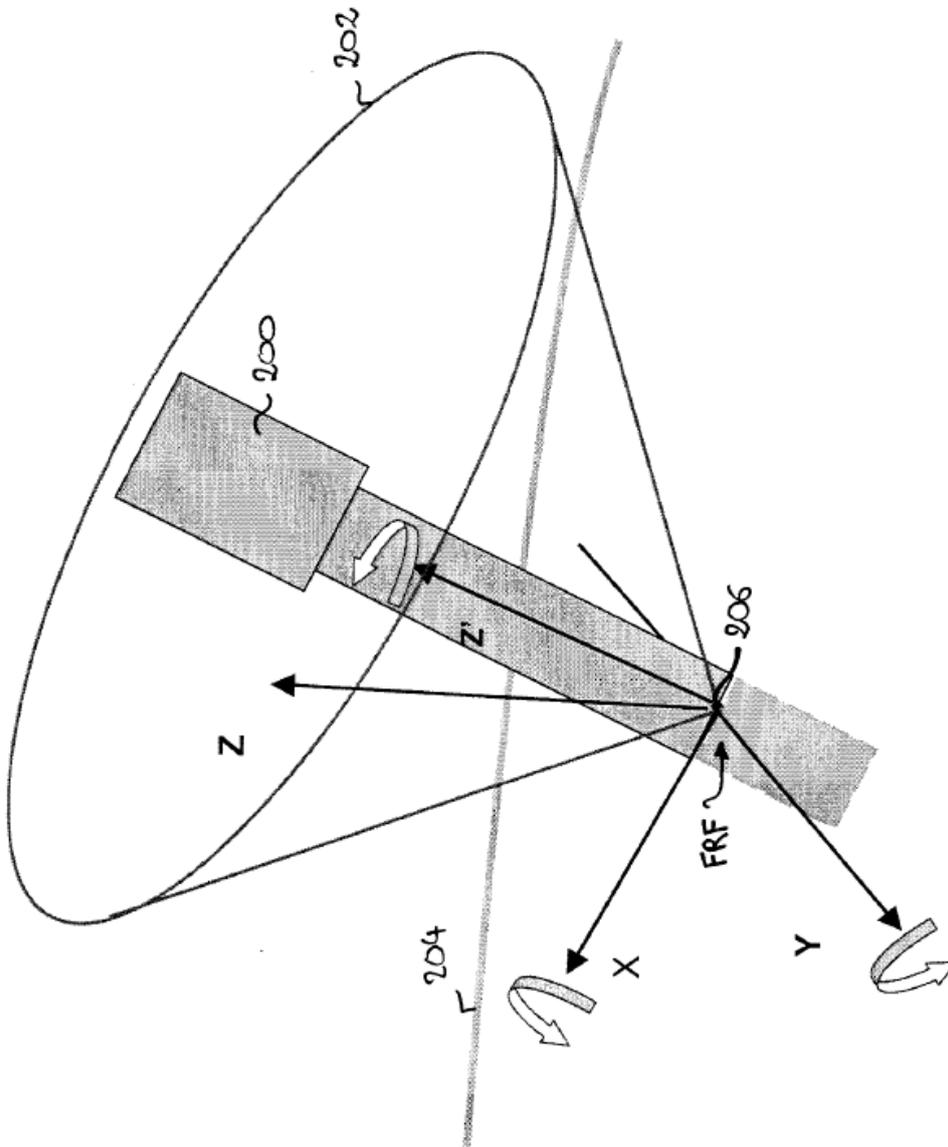


FIG.16

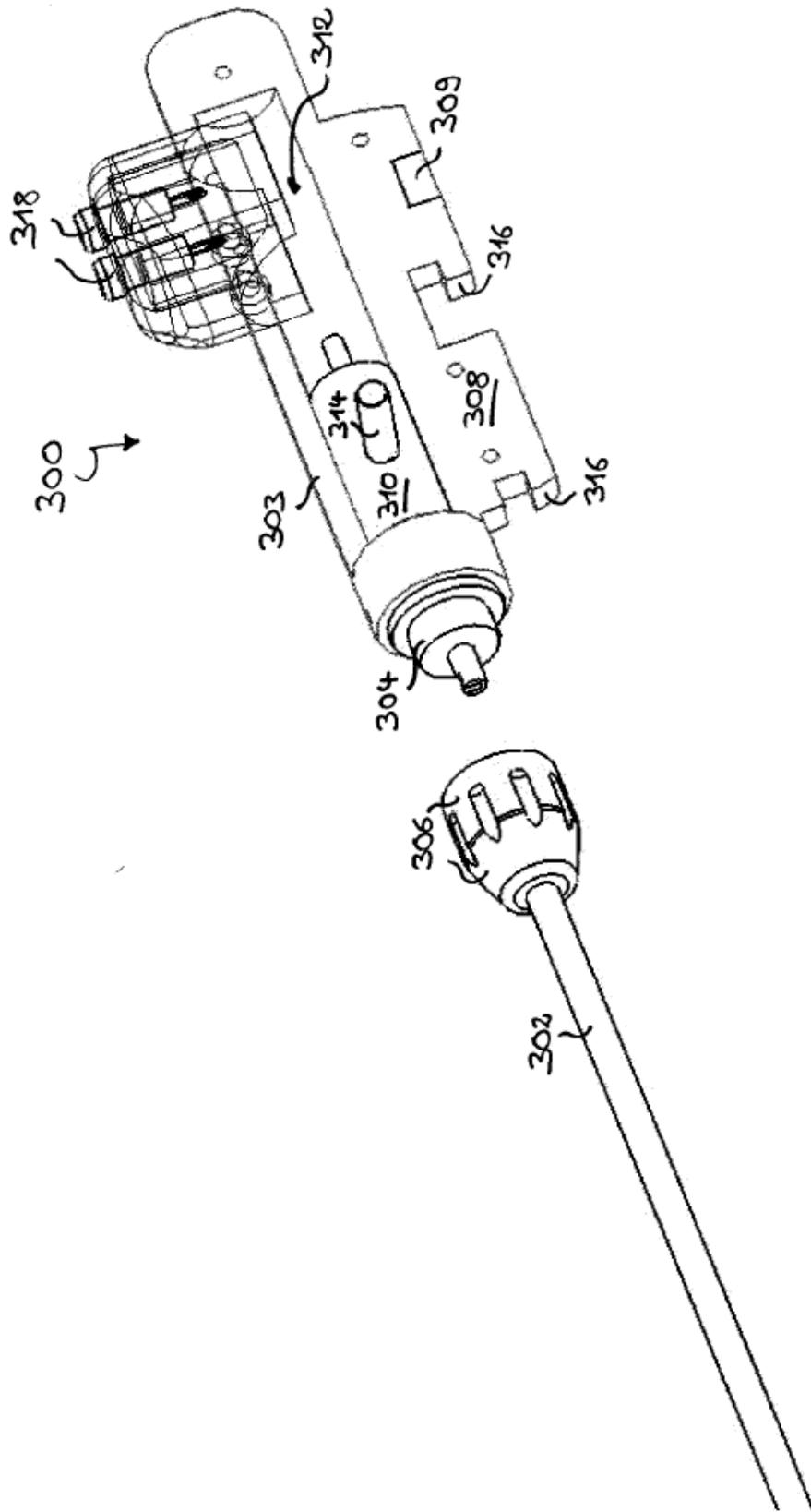


FIG.17

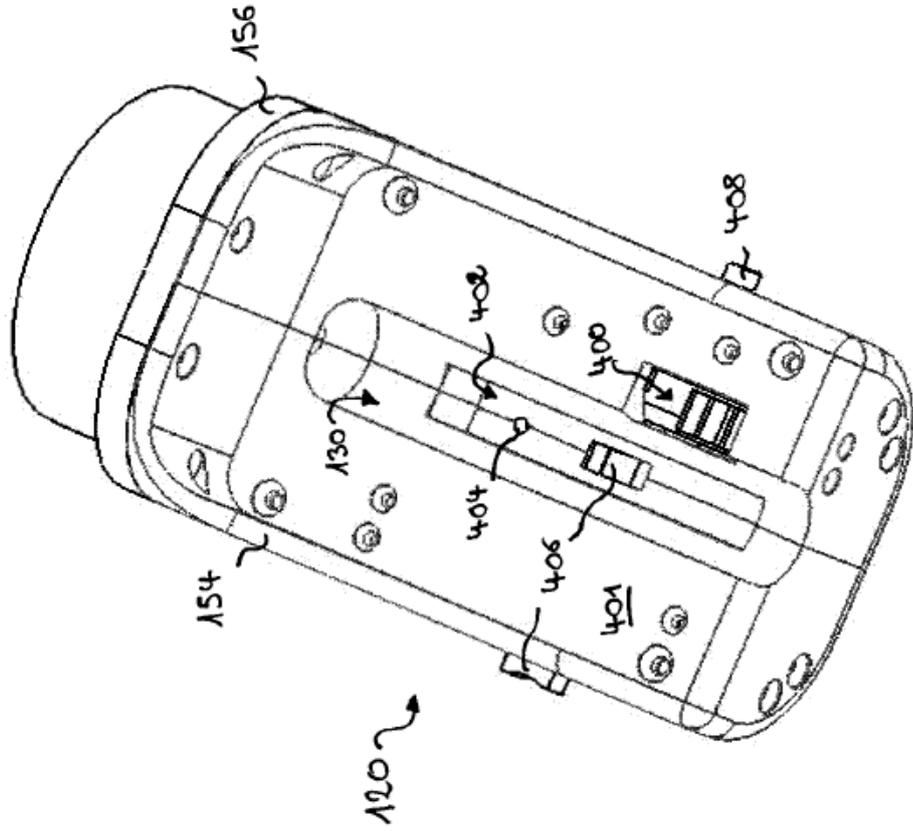


FIG.18

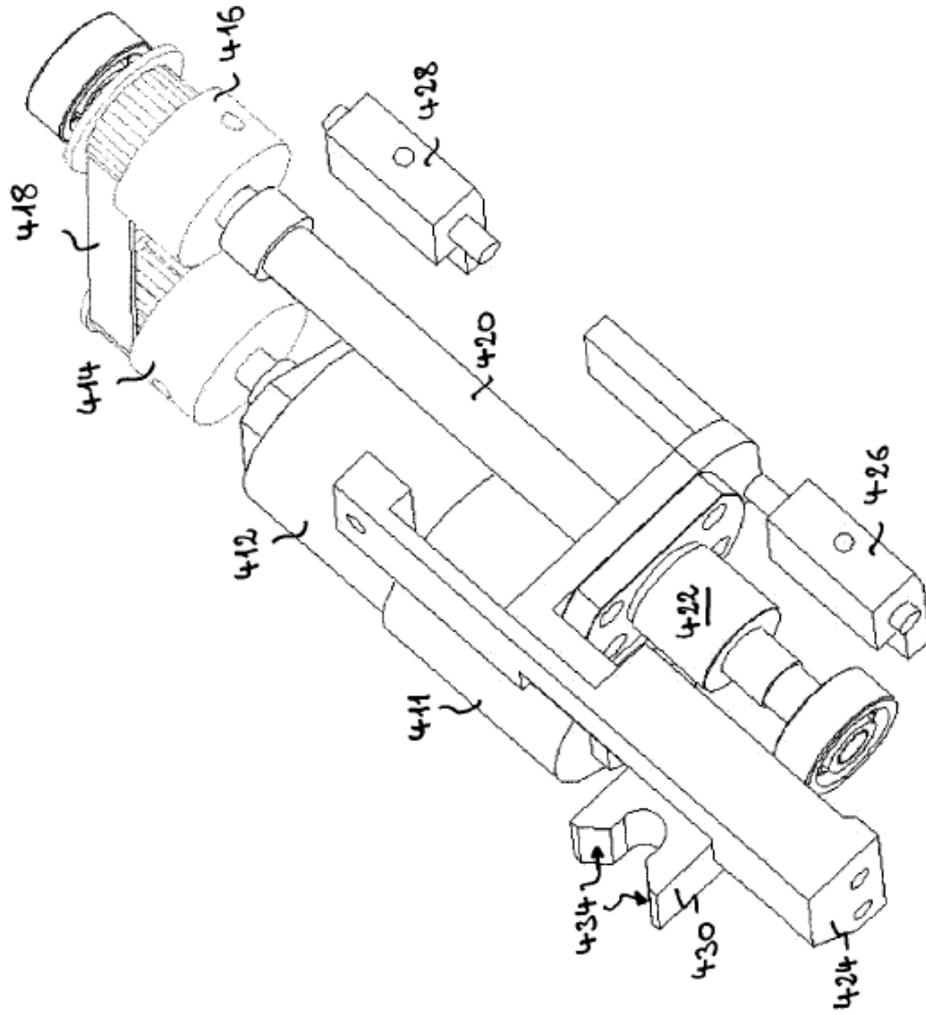


FIG.19

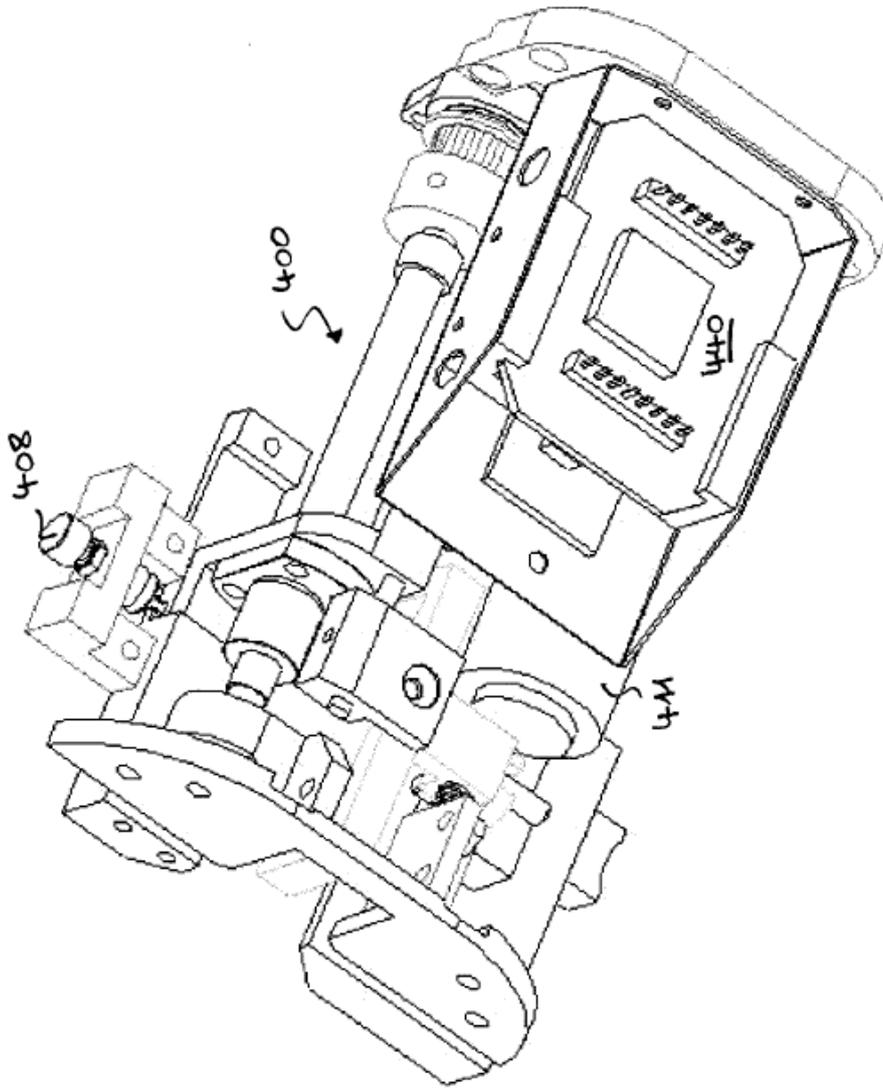


FIG.20

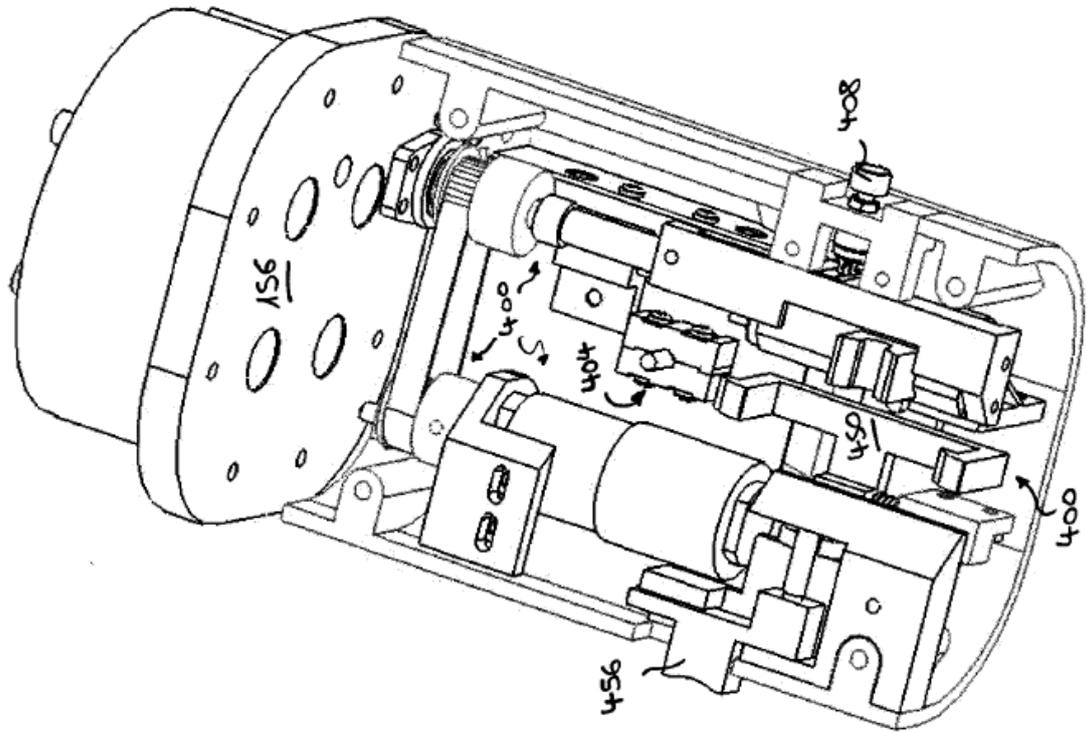


FIG.21

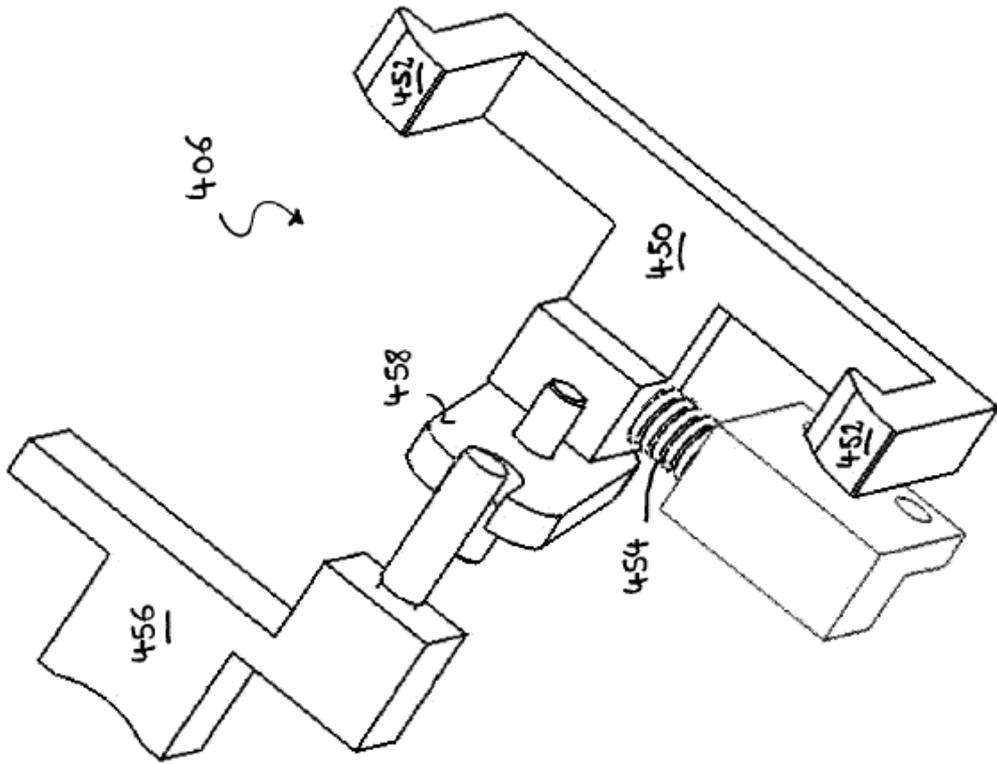


FIG.22

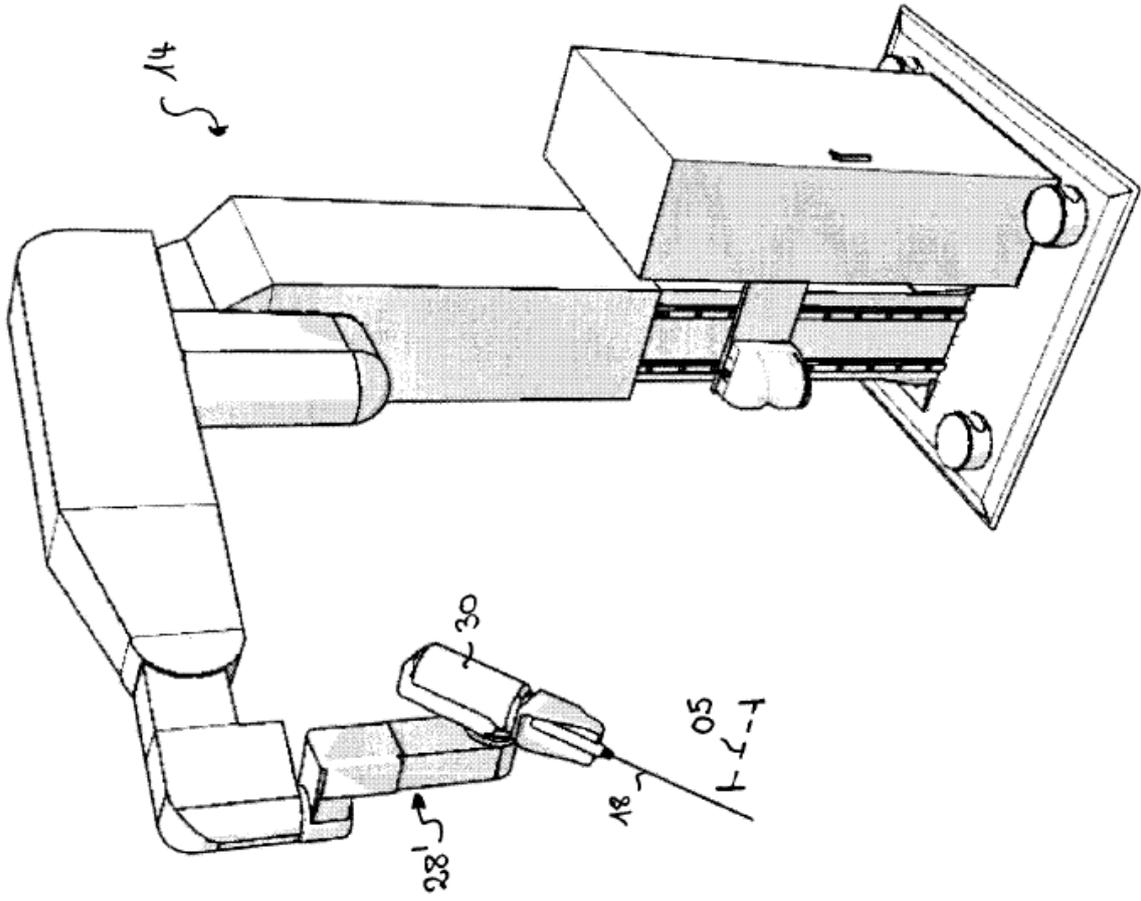


FIG.23

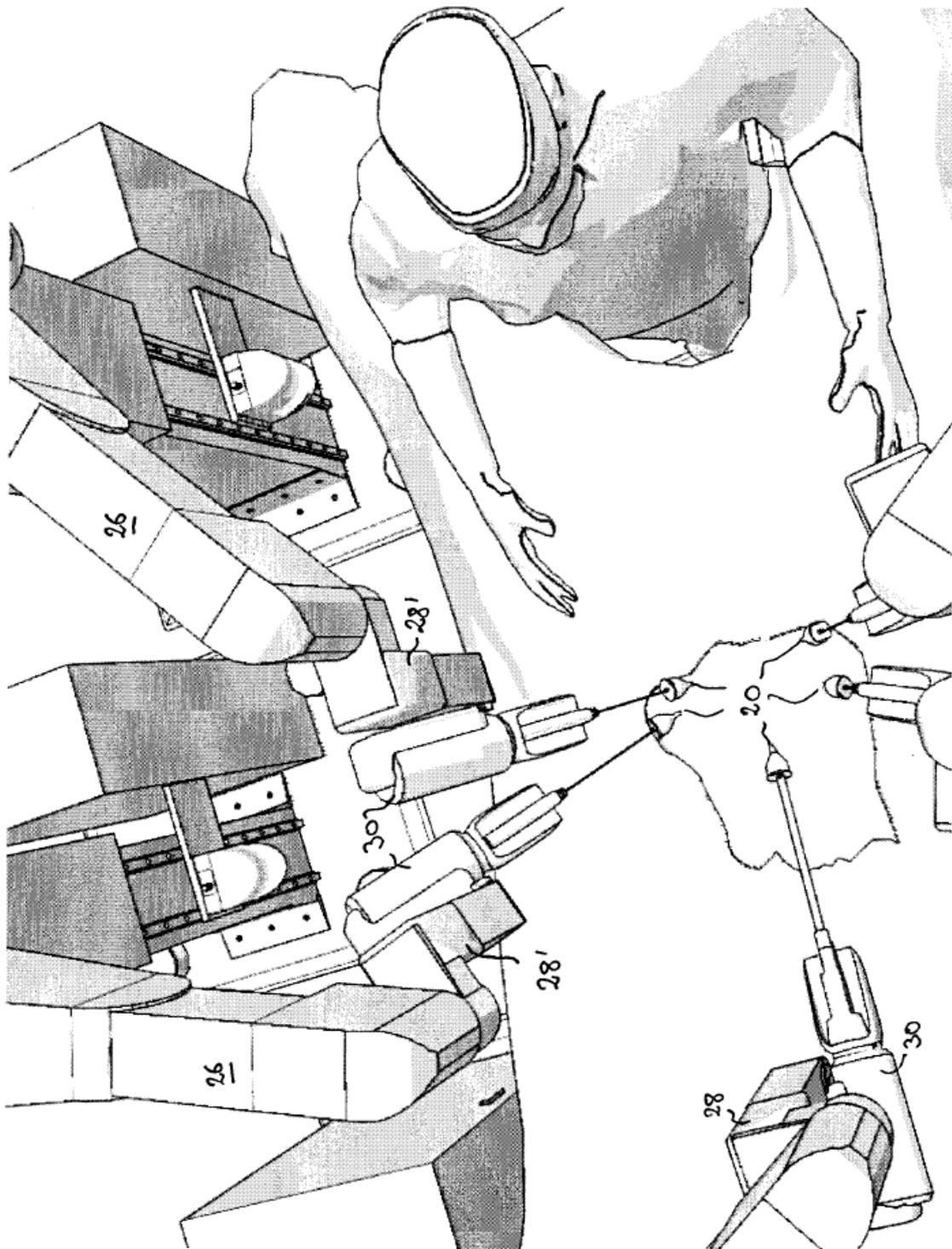
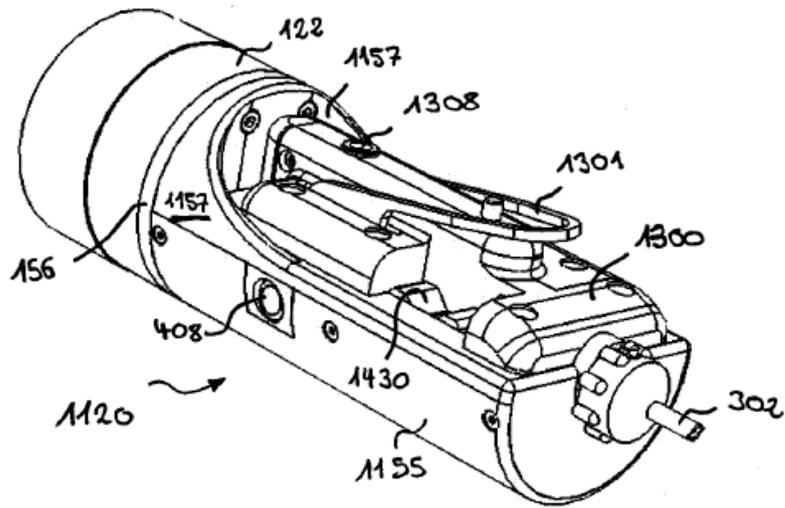
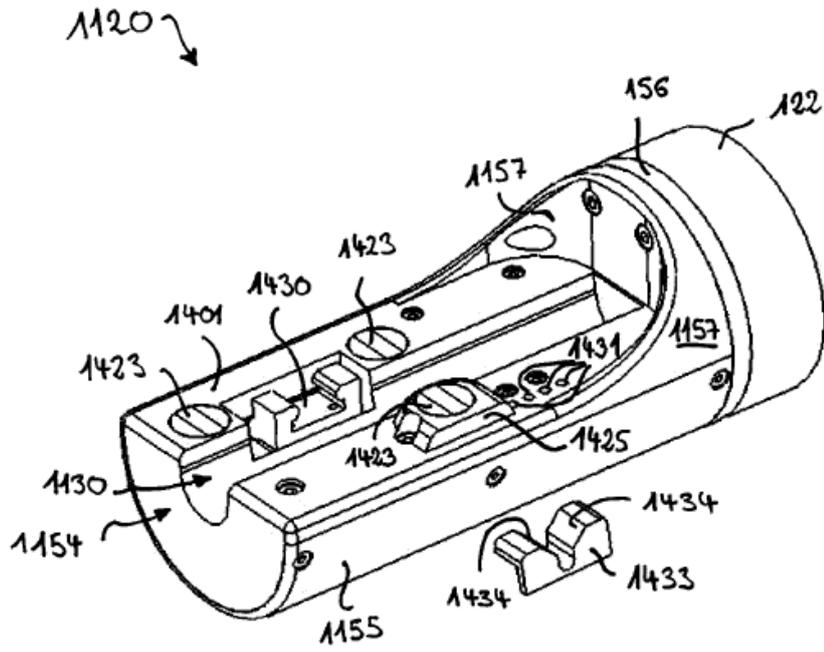


FIG.24



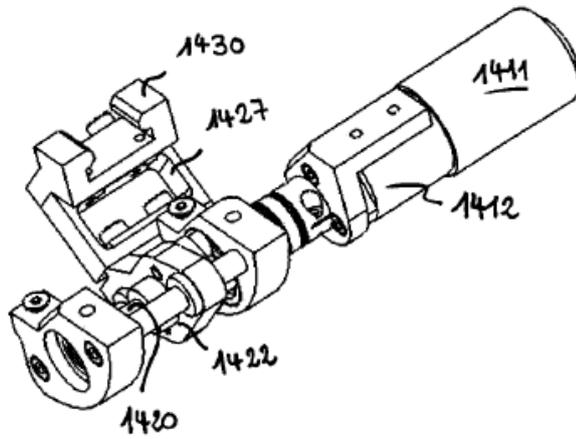


FIG. 27

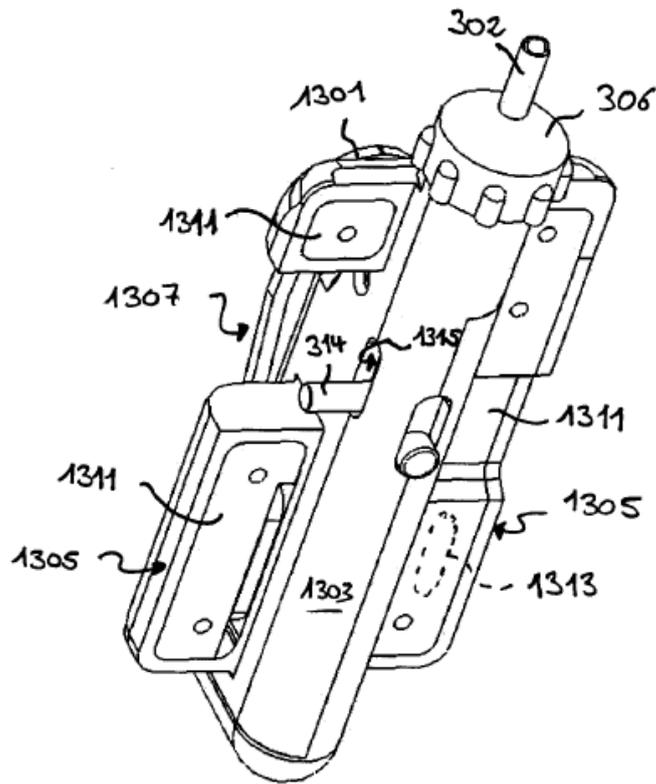


FIG. 28

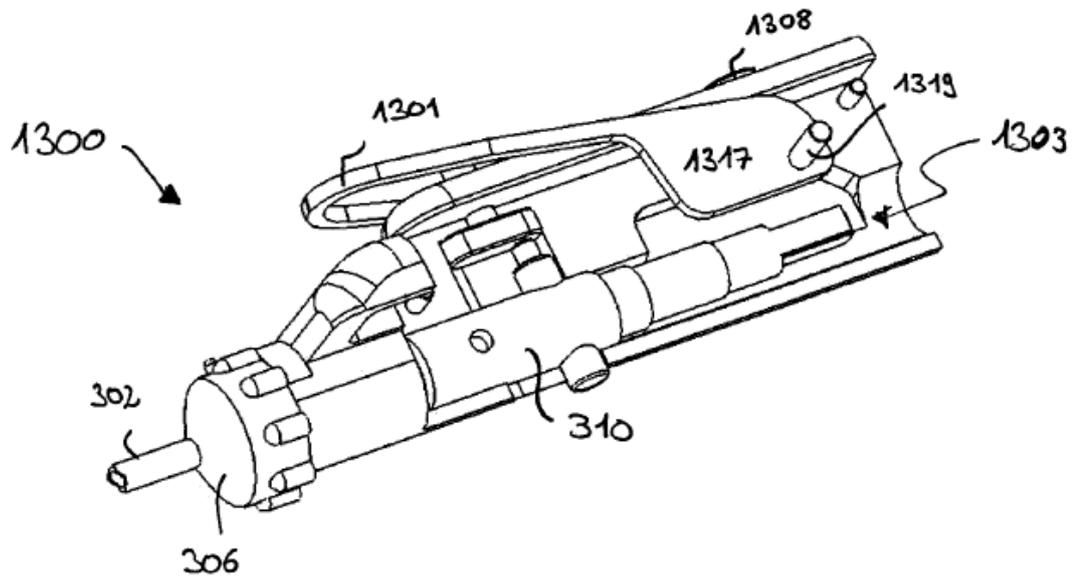


FIG.29

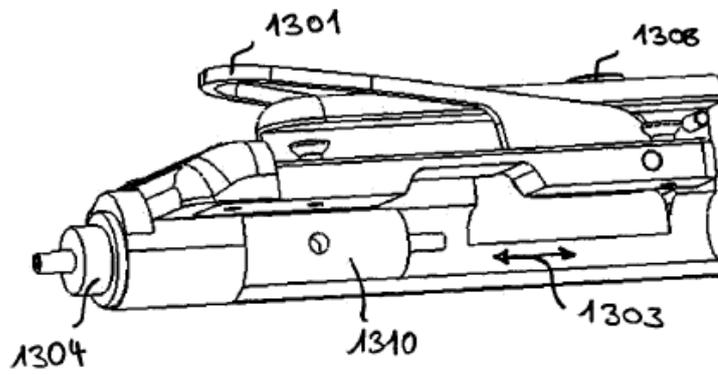


FIG.30