

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 381 975**

51 Int. Cl.:
A61B 19/00 (2006.01)
B25J 9/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **06752435 .5**
96 Fecha de presentación: **08.05.2006**
97 Número de publicación de la solicitud: **1885273**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **13.02.2008**

54 Título: **Sistemas robóticos altamente configurables para cirugía y otros usos**

30 Prioridad:
19.05.2005 US 133423

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
04.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
04.06.2012

73 Titular/es:
Intuitive Surgical Operations, Inc.
1266 Kifer Road
Sunnyvale, CA 94086, US

72 Inventor/es:
NOWLIN, William C;
MOHR, Paul;
SCHEMA, Bruce M;
LARKIN, David Q y
GUTHART, Gary

74 Agente/Representante:
Ponti Sales, Adelaida

ES 2 381 975 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

Sistemas robóticos altamente configurables para cirugía y otros usos.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere en general a los dispositivos, sistemas y procedimientos médicos, de telecirugía, de telepresencia, telerobóticos, y / o robóticos. En una realización a título de ejemplo, la invención proporciona un sistema robótico quirúrgico con suficientes grados de libertad para proporcionar tanto un movimiento deseado dentro de un sitio interno quirúrgico como un movimiento pivotante alrededor de una abertura quirúrgica mínimamente invasiva. En realizaciones relacionadas, la invención también proporciona sistemas, procedimientos y dispositivos que pueden ser utilizados para la puesta a punto y / o el control de sistemas robóticos.
- 10 **[0002]** Las técnicas médicas mínimamente invasivas están destinadas a reducir la cantidad de tejido que se daña durante procedimientos de diagnóstico o quirúrgicos. La cirugía mínimamente invasiva puede reducir el tiempo de recuperación del paciente, la incomodidad, y muchos de los efectos secundarios nocivos de la cirugía. Si bien muchas de las cirugías que se realizan cada año en los EE.UU. podrían llevarse a cabo de una manera mínimamente invasiva, sólo una parte limitada de las cirugías actuales utilizan estas técnicas ventajosas debido en parte a las limitaciones de los instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos existentes y los desafíos que plantean.
- 15 **[0003]** Los sistemas robóticos mínimamente invasivos se han desarrollado recientemente para aumentar la destreza de un cirujano y evitar algunas de las limitaciones de la cirugía tradicional mínimamente invasiva. En la cirugía robótica, el cirujano utiliza alguna forma de control robótico (tal como un servomecanismo máster-esclavo o similar) para manipular instrumentos quirúrgicos, en lugar de sostener y mover los instrumentos a mano directamente. El cirujano puede ver con una imagen un sitio quirúrgico interno y así dirigir el tratamiento de los tejidos. Mientras ve una imagen en dos o tres dimensiones en una pantalla, el cirujano realiza los procedimientos quirúrgicos en el paciente mediante la manipulación de los dispositivos de entrada de control maestro, que a su vez controlan el movimiento de los instrumentos robóticos. Los instrumentos robóticos quirúrgicos se pueden insertar a través de aberturas pequeñas quirúrgicas mínimamente invasivas para el tratamiento de los tejidos en los sitios quirúrgicos dentro del paciente, generalmente el trauma asociado con el acceso a la cirugía abierta. Estos sistemas robóticos pueden mover los extremos de trabajo de los instrumentos quirúrgicos con destreza suficiente para realizar tareas quirúrgicas bastante complejas, generalmente por pivotamiento de ejes de los instrumentos en la abertura mínimamente invasiva, por deslizamiento axial del eje a través de la abertura, por rotación del eje dentro de la abertura, y/ o similares.
- 20 **[0004]** El servomecanismo utilizado para telecirugía aceptará generalmente la entrada de dos controladores maestros (uno para cada una de las manos del cirujano) y podrá incluir dos o más brazos robotizados o manipuladores. La cartografía de los movimientos de la mano en correspondencia con la imagen de los instrumentos robóticos que muestra el dispositivo de captura de imágenes puede ayudar a proporcionar al cirujano un control preciso sobre los instrumentos asociados con cada mano. En muchos sistemas robóticos quirúrgicos, se incluyen uno o más manipuladores robóticos adicionales para mover un endoscopio u otro dispositivo de captura de imágenes, instrumentos quirúrgicos adicionales, o similares.
- 25 **[0005]** Mientras que los nuevos sistemas y dispositivos robóticos quirúrgicos han demostrado ser muy eficaces y ventajosos, aún son deseables más mejoras. Por ejemplo, cuando se mueven los instrumentos quirúrgicos dentro de un sitio quirúrgico mínimamente invasivo, los manipuladores robóticos quirúrgicos pueden presentar una cantidad significativa de movimientos fuera del paciente, particularmente al pivotar instrumentos en aberturas mínimamente invasivas. Como los instrumentos pueden pivotar al mismo tiempo de forma independiente alrededor de sus aberturas asociadas, los manipuladores robóticos dispuestos fuera del paciente pueden a veces chocar entre sí (o con otras estructuras o personal). Además, la configuración del sistema quirúrgico robótico para la preparación de la cirugía puede ser un reto, y puede ser un inconveniente volver a configurar el sistema para acceder a diferentes tejidos del paciente durante las diferentes fases de un procedimiento.
- 30 **[0006]** Por estas y otras razones, sería ventajoso proporcionar dispositivos, sistemas y procedimientos mejorados para la cirugía, la cirugía robótica, y otras aplicaciones robóticas. Sería particularmente beneficioso si estas tecnologías mejoradas proporcionasen un montaje más rápido y fácil, y/ o inhibiesen colisiones de los dispositivos robóticos durante su uso. Lo ideal sería que estas mejoras se proporcionasen sin aumentar significativamente el tamaño, la complejidad mecánica, o el coste de estos sistemas, manteniendo o mejorando al mismo tiempo su destreza.
- 35 **[0008a]** EP 1 234 641 A1 describe un controlador de robot que opera para mantener una posición de una herramienta que permite la traslación flexible de la herramienta en respuesta a una fuerza aplicada externamente. El
- 40
- 45
- 50

controlador de robot logra este objetivo mediante el uso de un circuito de control que tiene un lazo de realimentación en función del estado posición / velocidad.

BREVE RESUMEN DE LA INVENCION

5 [0007] La presente invención proporciona un sistema robótico tal como se describe en la reivindicación 1 adjunta. En varias realizaciones, la invención empleará manipuladores robóticos quirúrgicos altamente configurables. Estos manipuladores, por ejemplo, pueden tener más grados de libertad de movimiento que los efectores quirúrgicos finales asociados dentro de un espacio de trabajo quirúrgico. Las realizaciones de la invención incluirán generalmente un procesador configurado por instrucciones de programa para calcular un movimiento de la articulación robótica que incluye pivotar un eje de la articulación de manipulador sobre un sitio de abertura, de ahí la noción de software de centrado. Las articulaciones de los manipuladores robóticos que soportan los efectores de extremo pueden permitir al manipulador moverse a lo largo de una serie de configuraciones diferentes para una determinada posición del efector de extremo, en algunos casos, incluso restringiendo el movimiento lateral del eje desde el sitio de abertura a fin de evitar daños a los tejidos adyacentes. El procesador puede sacar ventaja de estos manipuladores para llevar a los manipuladores a configuraciones donde se inhiben las colisiones que involucran a una o más estructuras robóticas móviles. El ajuste de estos manipuladores robóticos altamente configurables puede ser facilitado por procesadores que controlan a una o más articulaciones de los manipuladores, mientras el manipulador va siendo posicionado manualmente por el operador del sistema (o por alguna otra interacción externa), con las articulaciones siendo opcionalmente accionadas en respuesta a los movimientos de otras articulaciones a lo largo de la cadena cinemática del manipulador. Las realizaciones pueden ajustar un centro de movimiento pivotante del manipulador en respuesta a la respiración y / o movimiento del paciente, en algunos casos por detección de las fuerzas aplicadas entre el manipulador y los tejidos a lo largo del sitio de la abertura. También se proporcionan estructuras robóticas refinadas para su uso en aplicaciones quirúrgicas mínimamente invasivas y otras aplicaciones, junto con los procedimientos robóticos relacionados.

25 [0008] En una configuración, se proporciona un sistema robótico quirúrgico con grados de libertad redundantes (RDOF) con entrada de manipulación. El sistema robótico quirúrgico RDOF, comprende un conjunto de manipulador, un dispositivo de entrada, y un procesador. Como respuesta a una orden para efectuar un movimiento deseado del efector de extremo tal como se recibe por el dispositivo de entrada se manipula el conjunto de manipulador. El manipulador tiene una pluralidad de articulaciones que proporcionan suficientes grados de libertad para permitir una gama de estados de articulación para una posición de efector de extremo. El procesador acopla el dispositivo de entrada al conjunto de manipulador y puede configurarse para operar en diferentes modos. En el modo de manipulación del efector de extremo, el procesador determina los movimientos de las articulaciones como respuesta a la orden para mover el efector de extremo con el movimiento deseado. En el modo de embrague, el procesador acciona por lo menos una de las articulaciones como respuesta a una articulación externa de otra articulación del conjunto de manipulador. El modo de embrague puede estar en un modo de embrague de pose, un modo de embrague de instrumento, o un modo de embrague de orificio.

40 [0009] En otra configuración, se proporciona un sistema robótico quirúrgico con software de centrado RDOF. El sistema robótico quirúrgico con software de centrado RDOF comprende un procesador, un dispositivo de entrada, un manipulador, y un instrumento quirúrgico. El instrumento quirúrgico tiene un extremo proximal, un efector de extremo distal adecuado para su inserción en un paciente, y una parte intermedia entre ellos. El manipulador soporta el extremo proximal del instrumento y es por lo tanto capaz de mover / controlar el instrumento desde fuera del paciente. Entre el manipulador y el instrumento, hay una pluralidad de articulaciones accionadas que proporcionan suficientes grados de libertad para permitir una gama de estados de articulación para una posición del efector de extremo, cuando la parte intermedia del efector de extremo pasa a través de un lugar de acceso. El dispositivo de entrada recibe una orden para efectuar un movimiento deseado del efector de extremo. El procesador acopla el dispositivo de entrada al manipulador. Como respuesta al movimiento ordenado, el procesador determina los movimientos de las articulaciones de modo que la porción intermedia del instrumento se encuentre dentro del lugar de acceso durante el movimiento deseado del efector de extremo.

50 [0010] En una configuración, los movimientos de las articulaciones tal como están determinados por el procesador también pueden estar diseñados para inhibir la colisión del manipulador. En otra configuración, los movimientos de las articulaciones tal como están determinados por el procesador pueden ser diseñados para llevar el manipulador a combinaciones deseadas de estados de articulación que logren la solución primaria bajo restricciones y una tarea de control secundario. En otra configuración, los movimientos de las articulaciones tal como están determinados por el procesador pueden ser diseñados para inhibir el movimiento de un pivote central de la porción intermedia del instrumento como respuesta a un factor de rigidez de orificio. En otra configuración, los movimientos de las articulaciones tal como están determinados por el procesador cumplen una tarea de prioridad seleccionada de una lista de prioridades. En otra configuración, el sistema robótico quirúrgico con software de centrado RDOF incluye además un sistema de sensores para indicar al procesador una posición del lugar de acceso y / o una fuerza de reacción entre la parte intermedia del instrumento y la abertura de acceso al lugar.

5 [0011] Según otra configuración adicional, se proporciona un robot multi-manipulador RDOF quirúrgico con capacidad para evitar colisiones. El robot multi-manipulador RDOF quirúrgico comprende un primer conjunto de manipulador, un segundo conjunto de manipulador, un dispositivo de entrada, y un procesador. El primero conjunto de manipulador tiene un primer efector de extremo y una pluralidad de estados de articulación para una posición de primer efector de extremo. El segundo conjunto manipulador tiene un segundo efector de extremo y tiene la capacidad para transmitir señales de estado que indican el movimiento del segundo conjunto de manipulador. El dispositivo de entrada recibe una entrada para un primer movimiento deseado del primer efector de extremo. El procesador está acoplado a la entrada, al primer conjunto de manipulador, y al segundo conjunto de manipulador. El procesador determina un movimiento del primer conjunto de manipulador como respuesta a la entrada, pero 10 teniendo en cuenta las señales de estado del segundo conjunto de manipulador con el fin de inhibir las colisiones entre los conjuntos de manipulador. Utilizando el movimiento determinado, el procesador controla el primer efector de extremo para efectuar el primer movimiento deseado.

15 [0012] En otra configuración, se proporciona un manipulador robótico quirúrgico con un rodillo de brazo superior. El manipulador robótico quirúrgico comprende un soporte móvil de instrumento quirúrgico, una base que es posicionable cerca de una área de trabajo, y un conjunto de brazo acoplado para pivotar entre la base y el soporte de instrumento. El conjunto de brazo incluye un primer enlace que tiene un primer eje, un segundo enlace que tiene un segundo eje, una articulación de brazo pivotante acoplada entre el primer enlace y el segundo enlace para variar un ángulo entre el primer eje primer y el segundo eje, y una primera articulación de rodillo entre la base y la articulación de brazo pivotante. La primera articulación de rodillo tiene un eje de rodillo de brazo que se extiende a lo 20 largo del primer eje.

[0013] Una mejor comprensión de la naturaleza y ventajas de la presente invención se harán evidentes con referencia al resto de la memoria descriptiva y a los dibujos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

25 [0014] La figura 1A es una vista en perspectiva que ilustra una consola o estación de trabajo maestra de cirugía para introducir órdenes de procesos quirúrgicos, incluyendo la consola un procesador para generar señales de órdenes al manipulador como respuesta a las órdenes de entrada.

30 [0015] La figura 1B es una vista lateral que ilustra esquemáticamente una estación quirúrgica que tiene una pluralidad de manipuladores robóticos para desplazar robóticamente instrumentos quirúrgicos que tienen efectores de extremo quirúrgicos en un sitio interno quirúrgico dentro de un paciente, y un procedimiento para llevar a cabo un proceso quirúrgico con los conjuntos de manipulador-instrumento.

[0016] La figura 1C es una vista en perspectiva que ilustra esquemáticamente un procedimiento quirúrgico que se realiza en un sitio quirúrgico mínimamente invasivo dentro de un paciente utilizando los conjuntos de manipulador y la consola de cirugía de las figuras 1A y 1B.

35 [0017] La figura 2 es una vista lateral que ilustra un dispositivo controlador maestro de entrada que tiene un mango para introducir un movimiento deseado en la estación de trabajo de la figura 1A.

[0018] La figura 3 es una vista en perspectiva de ejemplo de instrumento quirúrgico robótico o herramienta destinado a ser montado en los manipuladores de la figura 1B.

[0019] Las figuras 3A-3F son vistas en perspectiva de una pluralidad de efectores de extremo diferentes para instrumentos quirúrgicos de diferentes tipos.

40 [0020] Las figuras 4A-4C son vistas inferiores, lateral y posterior de un conjunto manipulador robótico a modo de ejemplo que tiene una serie de estados de articulación para una determinada posición de efector de extremo.

[0021] Las figuras 5A y 5B son vistas laterales del manipulador de las figuras 4A-C, e ilustran una configuración de articulación de codo orientada hacia abajo y una configuración de articulación de codo orientada hacia arriba del manipulador para una determinada posición de efector de extremo.

45 [0022] La figura 6 ilustra esquemáticamente los grados de libertad proporcionados por el manipulador de las figuras 4A-C y el instrumento de la figura 3 montado sobre este.

[0023] La figura 7A ilustra esquemáticamente un conjunto de manipulador insertado a través de una abertura.

[0024] La figura 7B ilustra esquemáticamente algunos de los retos que se plantean en el reposicionamiento manual del conjunto de manipulador altamente configurable de la figura 7A a una nueva posición de abertura.

- [0025]** La figura 7C ilustra esquemáticamente la reconfiguración del brazo de la figura 7A a fin de aumentar la amplitud de movimiento o similar durante el reposicionamiento manual del manipulador a una nueva posición de abertura.
- 5 **[0026]** La figura 8 ilustra esquemáticamente un conjunto de manipulador altamente configurable que tiene un interruptor de entrada de embrague a fin de facilitar la colocación manual de un instrumento quirúrgico adyacente a una abertura mínimamente invasiva mientras un procesador configura la articulación del manipulador como respuesta al movimiento manual.
- 10 **[0027]** Las figuras 8A-8D ilustran esquemáticamente diferentes modos de embrague para reposicionar manualmente al menos una porción de un conjunto de manipulador robótico para acomodarlo a una nueva posición de apertura, para pivotar un soporte de instrumento sobre una abertura, para cambiar una pose del manipulador sin mover el efector de extremo o el soporte de instrumento, y similares.
- [0028]** Las figuras 9A y 9B ilustran esquemáticamente la reconfiguración robóticamente de las articulaciones del conjunto de manipulador dentro de una gama de configuraciones alternativas de articulación durante el movimiento manual del brazo.
- 15 **[0029]** La figura 10A es un diagrama de bloques simplificado que ilustra esquemáticamente un controlador de velocidad maestro / esclavo jacobiano inverso restringido.
- [0030]** La figura 10B es un diagrama simplificado de un controlador maestro / esclavo modificado en el que se combina un módulo controlador jacobiano inverso con un segundo módulo que tiene un filtro de subespacio dependiente de configuración para permitir el control de un manipulador que está sobre o sub restringido.
- 20 **[0031]** La figura 11 ilustra esquemáticamente un ejemplo de controlador Jacobiano inverso de un sistema robótico quirúrgico maestro / esclavo totalmente restringido.
- [0032]** La figura 12 ilustra esquemáticamente una porción modificada del controlador de la figura 11, en el que el controlador jacobiano inverso ha sido modificado con un filtro dependiente de configuración para que el controlador respete la prioridad de diferentes niveles de restricciones y/u objetivos del sistema.
- 25 **[0033]** La figura 13 ilustra esquemáticamente un conjunto de manipulador esclavo que tiene un sensor de fuerza de cánula.
- [0034]** la figura 13A ilustra esquemáticamente un controlador fuerza / posición híbrido para su uso con el conjunto de manipulador de la figura 13 u otros sistemas de manipulador aquí descritos.
- [0035]** Las figuras 13B y 13C ilustran esquemáticamente aspectos del sistema de control de la figura 13A.
- 30 **[0036]** Las figuras 14A y 14B ilustran esquemáticamente un marco de coordenadas de instrumento y un eje de instrumento que se pivota sobre un sitio de acceso mínimamente invasivo, respectivamente.
- [0037]** La figura 15 es un esquema de todo el sistema de control alternativo del procesador de la estación de trabajo según el que se puede implementar una realización de la presente invención.
- 35 **[0038]** La figura 16 ilustra esquemáticamente un sistema de control modificado con módulos para resolver movimientos de articulación de manipuladores que tienen excesivos grados de libertad, que son adecuados para la modificación del sistema de la figura 15 a fin de implementar una forma de realización de la invención.
- [0039]** La figura 17 ilustra esquemáticamente un cálculo de solución por cinemática inversa tal como se realizó en uno o más módulos de control de la figura 16.
- 40 **[0040]** La figura 18A ilustra una geometría de conjunto de enlace a título de ejemplo y una configuración de articulación preferida conjunta para el conjunto de articulación.
- [0041]** La figura 18B es una vista superior del conjunto de manipulador de la figura 18A, e ilustra una configuración plana del conjunto de manipulador.
- [0042]** Las figuras 18C y 18D son vistas desde arriba que ilustran poses planas de conjuntos de manipulador adyacentes en un sistema esclavo multimanipulador.
- 45 **[0043]** Las figuras 18E y 18F ilustran un conjunto de manipulador y muestran un intervalo deseado de movimiento de una de las articulaciones del conjunto.

[0044] La figura 18G es una vista en perspectiva que muestra un sistema de sensor de colisión de ejemplo a lo largo de una superficie de un conjunto de manipulador.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

5 **[0045]** La presente invención proporciona en general dispositivos, sistemas y procedimientos quirúrgicos y robóticos mejorados. La invención es particularmente ventajosa para su uso con sistemas robóticos quirúrgicos en los que una pluralidad de instrumentos quirúrgicos o instrumentos se montarán en y serán movidos por una pluralidad asociada de manipuladores robóticos durante un procedimiento quirúrgico. Los sistemas robóticos comprenden generalmente sistemas telerobóticos, de telecirugía, y / o de telepresencia, que incluyen procesadores configurados como controladores maestro-esclavo. Al proporcionar sistemas robóticos que utilizan procesadores debidamente configurados para mover conjuntos de manipulador con enlaces articulados con un número relativamente elevado de grados de libertad, el movimiento de los enlaces puede ser adaptado para trabajar a través de un lugar de acceso mínimamente invasivo. El elevado número de grados de libertad también puede permitir a un procesador posicionar los manipuladores así como inhibir la interferencia o colisiones entre estas estructuras móviles, y similares.

10 **[0046]** Los conjuntos de manipuladores robóticos que se describen en este documento suelen incluir un manipulador robótico y una herramienta montada sobre este (comprendiendo generalmente la herramienta un instrumento quirúrgico con distintas versiones), aunque el término "conjunto robótico" también abarcará el manipulador sin la herramienta montada sobre este. El término "herramienta" abarca tanto las herramientas robóticas generales o industriales como los instrumentos quirúrgicos robóticos especializados, incluyendo generalmente estas últimas estructuras un efector de extremo que es adecuado para la manipulación de tejido, el tratamiento del tejido, la toma de imágenes de tejido, o similares. La interfaz de la herramienta / manipulador será generalmente un soporte de acoplamiento desacoplamiento rápido, que permite la eliminación rápida y sustitución de la herramienta por una herramienta alternativa. El conjunto de manipulador tendrá generalmente una base que se fija en el espacio durante al menos una parte de un procedimiento robótico, y el conjunto de manipulador podrá incluir un número de grados de libertad entre la base y un efector de extremo de la herramienta. El accionamiento del efector de extremo (tales como la apertura o cierre de las mandíbulas de un dispositivo de agarre, energización de una almohadilla electroquirúrgica, o similares) estará generalmente separado de, y añadido a, estos grados de libertad de conjunto de manipulador.

15 **[0047]** El efector de extremo se moverá típicamente en el espacio de trabajo con entre dos y seis grados de libertad. Tal como se usa aquí, el término "posición" abarca tanto la ubicación como la orientación. Por lo tanto, un cambio en una posición de un efector de extremo puede (por ejemplo) implicar una traslación del efector de extremo desde una primera localización a una segunda localización, una rotación del efector de extremo de una primera orientación a una segunda orientación, o una combinación de ambos. Cuando se usa para la cirugía robótica mínimamente invasiva, el movimiento del conjunto manipulador puede ser controlado por un procesador del sistema de modo que un eje o parte intermedia de la herramienta o instrumento esté restringido a un movimiento seguro a través de un sitio de acceso mínimamente invasivo quirúrgico u otra abertura. Este movimiento puede incluir, por ejemplo, la inserción axial del eje a través del sitio de apertura, la rotación del eje alrededor de su eje, y el movimiento pivotante del eje alrededor de un punto de pivotamiento adyacente a la zona de acceso, aunque generalmente se opondrá a movimiento lateral excesivo del eje que de lo contrario podría romper los tejidos adyacentes a la apertura o ampliar la zona de acceso inadvertidamente. Todas o algunas de estas restricciones en el movimiento del manipulador en el sitio de acceso pueden ser impuestas mediante enlaces de articulación de manipulador mecánicos que inhiben los movimientos inadecuados, o se puede imponer en parte o en su totalidad mediante el procesamiento de datos y técnicas de control robóticos. Por lo tanto, este movimiento de conjunto manipulador restringido mínimamente invasivo de abertura puede emplear entre cero y tres grados de libertad del conjunto de manipulador.

20 **[0048]** Muchos de los ejemplos de conjuntos de manipulador aquí descritos tendrán más grados de libertad que los necesarios para posicionar y mover un efector de extremo dentro de un sitio quirúrgico. Por ejemplo, un efector de extremo quirúrgico que puede ser colocado con seis grados de libertad en un sitio interno quirúrgico a través de una abertura mínimamente invasiva puede en algunas realizaciones tener nueve grados de libertad (seis grados de libertad del efector de extremo - tres para su localización, y tres para su orientación - además de tres grados de libertad para cumplir con las restricciones de acceso al sitio), aunque generalmente se tendrán diez o más grados de libertad. Los conjuntos de manipulador altamente configurables con más grados de libertad que se necesitan para una posición determinada de efector de extremo se pueden describir en términos de tener o proporcionar suficientes grados de libertad para permitir una amplia gama de estados de articulación para una posición de efector de extremo en un espacio de trabajo. Por ejemplo, para una posición determinada de efector de extremo, el conjunto de manipulador puede ocupar (y ser accionado entre) cualquiera de una variedad de posiciones alternativas de articulaciones de manipulador. De manera similar, para un vector de velocidad determinado de efector de extremo, el conjunto de manipulador puede tener una gama de diferentes velocidades de movimiento de articulaciones para las diversas articulaciones del conjunto de manipulador.

5 **[0049]** La invención proporciona estructuras de articulaciones robóticas que están particularmente bien adaptadas para aplicaciones quirúrgicas (y otras) en las que se desea una amplia gama de movimientos, y para las cuales hay disponible un volumen dedicado limitado debido a la presencia de otras articulaciones robóticas, personal y equipos quirúrgicos, y similares. La gran amplitud de movimiento y el volumen reducido necesarios para cada articulación robótica también puede proporcionar una mayor flexibilidad entre la ubicación de la estructura de soporte robótico y el espacio de trabajo quirúrgico u otro espacio de trabajo, lo que facilita y acelera el ajuste. Por lo tanto, mientras que las aplicaciones más inmediatas de la presente invención pueden incluir sistemas de telecirugía, las estructuras, dispositivos y sistemas descritos aquí también pueden encontrar aplicaciones en una amplia variedad de otras aplicaciones telerobóticas y robóticas.

10 **[0050]** El término "estado" de una articulación o similar se referirán a frecuencia en este documento a las variables de control relacionadas con la articulación. Por ejemplo, el estado de una articulación angular puede hacer referencia al ángulo definido por está articulación dentro de su intervalo de movimiento, y / o a la velocidad angular de la articulación. De manera similar, el estado de una articulación axial o prismática puede referirse a la posición axial de la articulación, y / o a su velocidad axial. Aunque muchos de los controladores descritos aquí comprenden controladores de velocidad, generalmente también tienen algunos aspectos de control de posición. Algunas realizaciones alternativas pueden depender mayoritariamente o totalmente de los controladores de posición, controladores de aceleración, o similares. Por lo tanto, siempre que los movimientos descritos se basen en los cálculos asociados, los cálculos de los movimientos de las articulaciones y los movimientos de un efector de extremo aquí descritos pueden ser realizados utilizando un algoritmo de control de posición, un algoritmo de control de velocidad, una combinación de ambos, y / o similares.

15 **[0051]** Algunas realizaciones de la invención pueden incluir un procesador configurado para sacar provecho de los grados de libertad de una estructura de manipulador para una pluralidad de tareas, metas o propósitos. Cuando se utiliza con manipuladores altamente configurables, estos procesadores pueden tener instrucciones o código de programación del controlador de articulaciones que les permita derivar órdenes de articulación generalmente adecuadas que podrían ser utilizadas para una tarea de control, tal como el movimiento del efector de extremo a una posición deseada. Sin embargo, como los manipuladores pueden tener más grados de libertad que los necesarios para realizar esta tarea, la solución generada por el controlador estará generalmente sub-restringida. En otras palabras, un controlador de articulación del procesador calculará generalmente un rango de posiciones y / o relaciones de articulaciones, cualquiera de las cuales podría resultar en la posición en el espacio deseada del efector de extremo.

20 **[0052]** Matemáticamente, el controlador puede realizar por lo menos algunos de los cálculos de las órdenes de articulación utilizando vectores y/o matrices, algunos de los cuales pueden tener elementos que corresponden a configuraciones o velocidades de las articulaciones. La gama de posibles configuraciones de articulaciones disponibles para el procesador pueden ser conceptualizadas como un espacio de articulación. El espacio de articulación puede tener, por ejemplo, tantas dimensiones como grados de libertad de manipulador, y una configuración particular del manipulador puede representar un punto particular en el espacio de articulación, correspondiendo cada coordenada a un estado de articulación de una articulación de manipulador asociada.

25 **[0053]** Cuando la solución calculada por un controlador de articulación del procesador está subrestringida, la solución proporcionada por este controlador de articulación puede representar un subconjunto del espacio de articulación. Para identificar qué órdenes específicas se han de transmitir a las articulaciones del manipulador cuando una solución primaria está subrestringida, unas instrucciones o código adicionales de programación del procesador pueden actuar de manera efectiva como un filtro de subespacio, seleccionando un estado de manipulador deseable y un conjunto específico de órdenes de articulación de la gama de alternativas generadas por el controlador de articulación. Ventajosamente, las órdenes seleccionadas se pueden utilizar para servir para un segundo objetivo, tarea o función. Por ejemplo, cuando un controlador de articulación principal se implementa como un controlador de velocidad, este filtro puede identificar una combinación lineal de las velocidades de articulación que son ortogonales a la función del controlador de articulación principal, con estas velocidades adicionales accionando el manipulador de forma que pase a través de una abertura, hacia una configuración deseada de elevada destreza, y / o para inhibir colisiones. El filtro será generalmente dependiente de la configuración, de modo que las órdenes de articulación seleccionadas por el filtro dependerán de la configuración o estado de las articulaciones, del manipulador, y / o del área de trabajo. De hecho, el controlador de articulación principal también puede comprender un filtro eficaz de selección de la solución principal de todo el espacio de articulación basado en una orden de entrada y / o similares.

30 **[0054]** Tal como se usa aquí el término "sobre restringido" abarca sistemas robóticos en los que una tarea o tareas de uno o más controladores, al menos a veces y si se mantienen como restricciones rígidas, sean capaces de superar los grados de libertad disponibles de un conjunto de manipulador asociado.

35 **[0055]** Tal como se usa aquí, una fuerza o articulación "externa" de un sistema robótico incluye fuerzas de movimiento del conjunto de manipulador que son aplicadas por un usuario del sistema u otra persona, un espacio de

trabajo o el medio circundante, una colisión involuntaria con otra estructura, y similares, pero generalmente no abarca fuerzas y movimientos deseados robóticamente calculados y aplicados por accionamiento del manipulador del sistema.

5 **[0056]** Tal como se usa aquí, el término "espacio nulo" se define como el subespacio S de un espacio de vectores entrada para un operador lineal (una matriz) M , tal que para cualquier vector x en S , $M \cdot x = 0$.

10 **[0057]** Aunque el procesador se suele describir aquí descrito como provisto de un controlador de articulación principal y / o un filtro dependiente de la configuración y / o como provisto de un primer módulo y un segundo módulo que realizan funciones relacionadas con dichos controlador y filtro, los procesadores descritos en este documento también pueden tener una pluralidad de filtros (opcionalmente tres o más filtros), tres o más módulos para tres o más tareas de control diferentes, y similares. El procesador suele definir una o más prioridades entre las tareas relacionadas con estos filtros y módulos, asignando un mayor peso o importancia a una tarea de mayor prioridad que una tarea de menor prioridad. En muchas realizaciones, incluso cuando una solución primaria está subrestringida, las tareas asociadas con el controlador de articulación y los filtro(s) pueden combinarse para sobre restringir el sistema si estas prioridades están ausentes, de modo que las tareas u objetivos de menor prioridad pueden tener poco o ningún efecto sobre al menos algunos movimientos de manipulador.

15 **[0058]** Haciendo referencia a la figura 1A de los dibujos, una estación de trabajo del operador o consola del cirujano de un sistema de telecirugía mínimamente invasivo se indica generalmente con el número de referencia 200. La estación de trabajo 200 incluye un visor 202 donde se muestra una imagen de un sitio quirúrgico en uso. Se prevé un soporte 204 en el que un operador, típicamente un cirujano, puede descansar sus antebrazos mientras agarra dos controles maestros 220 (ver la figura 2), uno en cada mano. Los controles maestros o dispositivos de entrada se colocan en un espacio 206 hacia el interior más allá del soporte 204. Cuando utiliza la estación de trabajo 200, en general el cirujano se sienta en una silla enfrente de la estación de trabajo, coloca sus ojos en la parte delantera del visor 202 y agarra los controles maestros, uno en cada mano, mientras descansa sus antebrazos en el soporte 204. Un procesador 210 de la estación de trabajo genera señales como respuesta al movimiento de los dispositivos de entrada.

20 **[0059]** En la figura 1B de los dibujos, una estación quirúrgica está indicada en general por el número de referencia 300. En uso, un paciente P está soportado por una tabla T adyacente a uno o más bases de soporte de manipulador 302. La base 302 está soportada en general desde arriba, y puede estar montada en el techo, soportada por una pared de una habitación en la que está dispuesta la estación quirúrgica 300, montada en una mesa de operaciones, montada en un brazo de un carro con ruedas o ruedas para mover los manipuladores dentro de la sala de operaciones o entre salas de operaciones, o similares. La estructura de soporte de la base 302 no se muestra. La base 302 permanecerá típicamente en una ubicación fija sobre el paciente P durante al menos una parte de un procedimiento quirúrgico. La estación de trabajo 200 (ver figura 1A) está típicamente colocada a cierta distancia de la estación quirúrgica 300, opcionalmente separada por unos pocos pies dentro de una sala de operaciones. En otras realizaciones, la estación quirúrgica 300 y estación de trabajo 200 pueden estar separadas por una distancia significativa, opcionalmente dispuestas en habitaciones separadas o incluso edificios diferentes.

25 **[0060]** La estación quirúrgica 300 incluye típicamente una pluralidad de manipuladores robóticos 304, con generalmente tres o más manipuladores robóticos, con un ejemplo de realización que incluye cuatro manipuladores robóticos soportados por la base 302. El ejemplo de base 302 comprende un cuerpo de base alargado apoyado con una orientación horizontal, con manipuladores 304 que se distribuyen horizontalmente a lo largo de la longitud de la base. En otras realizaciones, una pluralidad de bases separadas posicionables pueden soportar a los manipuladores.

30 **[0061]** Como puede verse en las figuras 1B y 1C, cada uno de los manipuladores robóticos soporta un instrumento quirúrgico asociado 306. Uno o más de los instrumentos pueden comprender un dispositivo de captura de imagen 308 tal como un endoscopio o similar. Cada uno de los otros tres manipuladores 304 puede soportar un instrumento adaptado para manipular tejidos en un sitio interno quirúrgico 310. El endoscopio 308 está conectado operativamente con un visor 202 para visualizar una imagen capturada en su extremo de visualización en el visor. Dos de los otros manipuladores robóticos 304 pueden estar cada uno conectado operativamente a uno de los controles maestros, y un procesador 210 puede controlar cual de los dos manipuladores está conectado operativamente con el control maestro. Así, el movimiento de todos los manipuladores pueden ser controlados mediante la manipulación de los controles maestros. En algunas realizaciones, se pueden proporcionar dispositivos de entrada adicionales para su uso por otro cirujano, un ayudante quirúrgico, o similar.

35 **[0062]** Un ejemplo de dispositivo de entrada 220 y de instrumento quirúrgico 306 se ilustran en las figuras 2 y 3, respectivamente. El dispositivo de entrada 220 incluye un brazo 222 y una muñeca 224 que permiten conjuntamente el movimiento de traslación y de orientación de un mango de entrada 226 con respecto a la estructura de la estación de trabajo 200 (ver la figura 1A). El mango 222 se moverá generalmente con una pluralidad de grados de libertad con respecto a la estructura de la estación de trabajo, el ejemplo de dispositivo de entrada 220 proporciona seis

grados de libertad de movimiento del mango 226. El enlace de soporte del mango puede incluir más o menos de seis grados de libertad. Los miembros de agarre están amoviblemente acoplados al mango 226 y el mango genera una señal de agarre que indica la separación entre los miembros de agarre.

- 5 **[0063]** Con referencia ahora a la figura 3, la herramienta quirúrgica o instrumento 306 incluye en general un efector de extremo quirúrgico 50 soportado con respecto a un alojamiento 53 por una porción intermedia del instrumento, comprendiendo generalmente la parte intermedia un eje alargado 14,1. El efector de extremo 50 puede estar soportado con respecto al eje por una articulación distal o muñeca con el fin de facilitar la orientación del efector de extremo dentro de un espacio de trabajo quirúrgico interno. El alojamiento próximo 53 incluirá generalmente una interfaz 232 adaptada para acoplarse con un soporte de manipulador 304. Tal como se describe con más detalle en la Patente americana 6.331.181, el instrumento 306 incluirá en general una memoria 230, con la memoria típicamente acoplada eléctricamente con una interfaz de datos (formando la interfaz de datos típicamente una porción de interfaz 232). Esto permite la comunicación de datos entre la memoria 230 y el procesador robótico quirúrgico 210 de la estación de trabajo 200 (ver la figura 1A) cuando el instrumento está montado sobre el manipulador.
- 10 **[0064]** Con referencia ahora a las figuras 3A-3F, se puede utilizar una variedad de alternativas de instrumentos robóticos quirúrgicos de diferentes tipos y diferentes efectores de extremo 50, con los instrumentos de al menos algunos de los manipuladores retirados y reemplazados durante un procedimiento quirúrgico. Varios de estos efectores de extremo, incluyendo fórceps DeBakey 56i, microforceps 56ii, tijeras Potts 56iii, y clip a plier 56iv alicates incluyen elementos de efectores de extremo primero y segundo 56a, 56b que pivotan entre sí para definir un par de mandíbulas de efectores de extremo. Otros efectores de extremo, incluyendo un bisturí 56v y una sonda electrocauterizadora 56vi tienen un único elemento efector de extremo. Para los instrumentos que tienen mandíbulas de efectores de extremo, las mordazas se accionan generalmente apretando los miembros de agarre del mango 226. También pueden accionarse instrumentos de efector de extremo individuales por agarre de los miembros de agarre, por ejemplo, con el fin de energizar una sonda electrocauterizadora.
- 15 **[0065]** Los ejes alargados 14,1 de los instrumentos 306 permiten que los efectores de extremo 50 y el extremo distal del eje se inserten distalmente en un lugar de trabajo quirúrgico a través de una abertura mínimamente invasiva, generalmente a través de una pared abdominal o similar. El sitio de trabajo quirúrgico puede ser insuflado, y el movimiento de los efectores de extremo dentro del paciente se efectuará generalmente, al menos en parte, por pivotamiento de los instrumentos 306 sobre la ubicación en la que el eje de 14.1 pasa a través de la abertura mínimamente invasiva. En otras palabras, los manipuladores 304 moverán el alojamiento proximal 53 fuera del paciente, de manera que el eje 14,1 se extienda a través de una ubicación de abertura mínimamente invasiva así como para ayudar a proporcionar un movimiento deseado del efector de extremo 50. Por lo tanto, los manipuladores 304 se someterán generalmente a un movimiento significativo fuera del paciente P durante un procedimiento quirúrgico.
- 20 **[0066]** Un ejemplo de estructura de manipulador 304 puede entenderse con referencia a las figuras 4A-4C, 5A y 5B, y la figura 6. Como se describió anteriormente, el manipulador 304 soporta en general a un instrumento 306 y realiza movimientos del instrumento con respecto a una base 302. Puesto que una serie de instrumentos diferentes que tienen diferentes efectores de extremo pueden ser secuencialmente montados en cada manipulador 304 durante un procedimiento quirúrgico (típicamente con la ayuda de un ayudante quirúrgico), un soporte de instrumento 320 permitirá preferentemente la rápida retirada y sustitución del instrumento montado. El manipulador será cubierto en general por un tejido estéril aunque no el instrumento. Un ejemplo de adaptador y tejido estériles se describen en la Patente US N° 6.331.181. Tal como puede entenderse con referencia las figuras 1B y 1C, los manipuladores 304 están montados en la base 302 mediante una articulación montada pivotante 322 a fin de permitir que el resto de manipulador 304 pueda girar alrededor de un primer eje de articulación J1, con la articulación 322 proporcionando en primer lugar la rotación alrededor de un eje vertical en el ejemplo de realización. La base 302 y la primera articulación 322 comprenden generalmente una porción proximal de manipulador 304, con el manipulador extendiéndose distalmente desde la base hacia el soporte del instrumento 320 y el efector de extremo 50.
- 25 **[0067]** Se describen a continuación los enlaces individuales de enlaces de manipulador 304 tal como se ilustra en las figuras 4A-C junto con los ejes de rotación de las articulaciones que conectan los enlaces tal como se ilustra en la figura 6. Un primer enlace 324 se extiende a distancia desde la base 302 y gira alrededor del primer eje de articulación pivotante J1 en la articulación 322. Muchas de las articulaciones restantes pueden ser identificadas por sus ejes de rotación asociados en la figura 6. Por ejemplo, un extremo distal del primer enlace 324 está acoplado a un extremo proximal de un segundo enlace 326 en una articulación proporcionando un eje de pivotamiento horizontal J2. Un extremo proximal de un tercer enlace 328 está acoplado al extremo distal del segundo enlace 326 en una articulación de rodillo de manera que el tercer enlace generalmente rota o rueda en la articulación J3 sobre un eje que se extiende a lo largo de (e idealmente alineado con) los ejes de ambos enlaces segundo y tercero. Procediendo distalmente, después de otras articulaciones pivotantes J4, el extremo distal de un cuarto enlace 330 está acoplado al soporte de instrumento 320 por un par de articulaciones pivotantes J5, J6 que definen
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

conjuntamente una muñeca de soporte del instrumento 332. Una articulación de traslación o prismática J7 del manipulador facilita el movimiento axial del instrumento 306 a través de la abertura mínimamente invasiva, y también facilita la fijación del soporte de instrumento a una cánula a través del cual se desliza el instrumento para insertarlo.

5 [0068] A distancia del soporte de instrumento, 320, el instrumento 306 puede incluir más grados de libertad. El accionamiento de los grados de libertad del instrumento será impulsado generalmente por motores del manipulador, y en realizaciones alternativas se pueden separar el instrumento de la estructura de soporte del manipulador en un soporte de instrumento / interfaz de instrumento rápidamente desmontable de modo que una o más articulaciones representadas como estando en el instrumento están en la interfaz, o viceversa. Dicho de otro modo, la interfaz entre el instrumento y el manipulador puede disponerse más proximal o distal a lo largo de la cadena cinemática del conjunto de manipulador (que puede incluir tanto el instrumento y el manipulador). En el ejemplo de realización, el instrumento 306 incluye un conjunto de rotación J8 proximal del punto de pivote PP, que en general está dispuesto en el sitio de una abertura mínimamente invasiva. Una muñeca distal del instrumento permite el movimiento pivotante del efector de extremo 50 alrededor de los ejes de articulación de la muñeca del instrumento J9, J10. Un ángulo α entre unos elementos de mandíbula del efector de extremo pueden ser controlados independientemente de la localización y la orientación del efector de extremo.

10 [0069] Con referencia ahora a las figuras 7A-7C, un conjunto de manipulador 502 incluye aquí un manipulador 504 y un instrumento 506 que tiene un efector de extremo 508. El término conjunto de manipulador, tal como se usa aquí, puede, en algunos casos también abarca el manipulador sin el instrumento montado sobre el mismo. El conjunto de manipulador ilustrado generalmente se extiende desde una base proximal 510 distalmente hasta el efector de extremo 508, con el efector de extremo y la porción distal del instrumento configurados para su inserción en un sitio interno quirúrgico 512 a través de un acceso quirúrgico mínimamente invasivo 514. La estructura de articulación del conjunto de manipulador 502 es similar a la descrita anteriormente con respecto a la figura 6, e incluye suficientes grados de libertad para permitir al conjunto de manipulador estar en cualquier lugar dentro de una gama de diferentes estados de articulación para una posición determinada del efector de extremo, incluso cuando el instrumento está restringido a su paso a través de la abertura mínimamente invasiva 514.

15 [0070] Uno de los desafíos de trabajar con el conjunto de manipulador altamente configurable de la figura 7A puede ser entendido con referencia a las figuras 7A y 7B. Específicamente, cuando el sitio de acceso en un procedimiento quirúrgico mínimamente invasivo se va a cambiar desde una ubicación de primera abertura 514a a una segunda ubicación de abertura 514b, generalmente será deseable reubicar manualmente todos o algunos de los enlaces de manipulador 502. De manera similar, al configurar inicialmente el conjunto de manipulador para la cirugía, el manipulador puede ser movido manualmente a una posición deseada alineada con la ubicación de abertura por la cual el instrumento asociado debe acceder a la zona quirúrgica. Sin embargo, en vista de la estructura de manipulador altamente configurable con un número relativamente elevado de articulaciones entre (por ejemplo) la base 510 y la interfaz del instrumento / manipulador (ver la figura 6), tal posicionamiento manual de los enlaces puede ser un reto. Incluso cuando la estructura de manipulador se equilibra con el fin de evitar los efectos gravitacionales, intentar alinear cada una de las articulaciones en una disposición apropiada puede ser difícil para una persona, llevar mucho tiempo, y puede implicar formación y / o habilidad significativos. Los desafíos pueden ser aún mayores cuando los enlaces del manipulador no están equilibrados sobre las articulaciones, ya que el posicionamiento de estas estructuras altamente configurables en una configuración adecuada para comenzar la cirugía puede ser problemático debido a la longitud del brazo del manipulador y su diseño pasivo y débil.

20 [0071] Con el fin de facilitar la puesta en marcha del conjunto de manipulador 502 y / o manipulador 504 para un procedimiento quirúrgico (o volver a configurar el conjunto de manipulador para acceder a un diferente tejido del paciente), el controlador 210 de la estación de trabajo 200 (ver la figura 1A) puede accionar activamente articulaciones del conjunto de manipulador durante el movimiento manual (y preferentemente en respuesta a) de al menos una articulación del manipulador. En la figura 7C, una mano H de un operador del sistema (opcionalmente, un cirujano, ayudante, técnico, o similares) mueve manualmente un enlace del manipulador 504 o instrumento 506 para alinearlos con la abertura mínimamente invasiva 514b que desee. Durante este movimiento, el procesador acciona las articulaciones proximales de la mano / manipulador. Como el manipulador tiene generalmente suficientes grados de libertad para estar en un rango de configuraciones alternativas, las articulaciones proximales pueden ser conducidas a un estado de manipulador deseada sin inhibir el posicionamiento manual de la porción distal del conjunto de manipulador. Opcionalmente, las articulaciones pueden ser accionadas a fin de compensar la gravedad, para inhibir los efectos de omento, para proporcionar (y generalmente fácilmente superar) una resistencia deseada al movimiento manual para dar a la mano la impresión de deformar plásticamente la estructura de manipulador en sus articulaciones, así como para mantener el conjunto de articulaciones configurable en una pose deseada, o similares. Aunque este movimiento se muestra en la figura 7C como realizado con el instrumento 506 conectado con el manipulador 504, el conjunto de manipulador se colocará generalmente manualmente antes de la fijación de instrumento 506 al manipulador.

5 [0072] Con referencia ahora a las figuras 7A y 7C, mover una ubicación de un sitio de acceso mínimamente invasivo con respecto a la base 510 puede alterar significativamente una pose o configuración deseada del manipulador a fin de mantener un nivel deseable de movimiento, evitar singularidades de la estructura de manipulador, y similares. Aprovechando el gran número de grados de libertad del conjunto de manipulador, el procesador puede reconfigurar los estados de articulación en una gran variedad de formas como respuesta al movimiento manual de un enlace y / o articulación de una o más articulaciones del conjunto de manipulador. El procesador accionará generalmente a otras articulaciones que estén articuladas de forma manual, opcionalmente en combinación con el accionamiento de la articulación manualmente articulado a fin de permitir mover el enlace. En algunas realizaciones, el movimiento de un sitio de acceso mínimamente invasivo puede resultar del movimiento del paciente, opcionalmente a través del movimiento de una mesa sobre la cual se apoya el paciente, debido al movimiento fisiológico tal como la respiración o similar, y, opcionalmente, puede ocurrir durante la manipulación de tejidos en el sitio quirúrgico interno por parte del efector de extremo.

15 [0073] Con referencia ahora a la figura 8, otra alternativa de conjunto de manipulador 520 incluye un brazo de enlace de manipulador 522 para soportar de forma amovible un instrumento quirúrgico 524. Una entrada de embrague de orificio 516 comprende un botón de entrada que puede ser accionado por una mano que encaja con un enlace 518 del manipulador que debe estar dispuesta adyacente al lugar de acceso 514 durante la cirugía, tal como el enlace al que está unido el soporte del instrumento. Esto permite a la mano accionar tanto la entrada como ayudar a maniobrar el manipulador hasta la configuración adecuada para la cirugía. En muchas realizaciones, el enlace 518 en el cual está dispuesta la entrada de embrague de orificio 516 será acoplable al eje del instrumento mediante una articulación de inserción axial (aunque el instrumento no pueda unirse al mismo tiempo). En algunas realizaciones, la mano que acciona la entrada de embrague de orificio 516 puede ser capaz de cambiar la posición del manipulador en el modo de embrague sin ayuda de otra mano. En otras realizaciones, el reposicionamiento del manipulador puede ser facilitado por tener el usuario tanto una primera mano en el enlace de manipulador 518 adyacente a la entrada de embrague de orificio 516, como una segunda mano a una distancia de la entrada de embrague de orificio, particularmente al reorientar el enlace con un ángulo de inserción axial deseado. A medida que la entrada de embrague de orificio 516 se acciona manualmente, el procesador del sistema accionará articulaciones de manipulador 520 en respuesta al movimiento manual del enlace 518. De este modo, el procesador proporcionará generalmente combinaciones de órdenes conjuntas y / o velocidades que limitan el movimiento del manipulador mientras está en el modo de embrague a uno o más grados de libertad efectivos. Sorprendentemente, el acoplamiento de los movimientos de la articulación entre sí (por ejemplo, por filtrado o permitiendo sólo combinaciones lineales deseadas de una velocidad de articulación manualmente articulada con una o más velocidades de articulación robóticamente accionadas) puede proporcionar uno o más grados de libertad de embrague eficaces que difieren de cada uno de los grados de libertad de las articulaciones individuales. En la mayoría de los casos, más de una articulación será articulada externamente, y se calculará más de una orden de velocidad de articulación asociada.

40 [0074] Tres ejemplos de modos de embrague (y algunos o todos de sus grados de libertad efectivos asociados) pueden entenderse con referencia a las figuras 8A-8D. En esta realización del manipulador 520, se muestran tres entradas de embrague, una entrada de embrague de orificio 516a y una entrada de embrague de instrumento 516b montada en un enlace 518 adyacente al eje de inserción axial del conjunto de manipulador, y una entrada de embrague de pose 516c montada a lo largo de un enlace del conjunto de manipulador entre (y cinemáticamente separado de) la base 510 y el soporte de instrumento. Son también posibles otros modos y combinaciones de embrague. El término "embrague" tal como se usa aquí abarca técnicas de procesamiento de señales y / o de datos que permiten, por ejemplo, que un conjunto de manipulador robótico sea articulado manualmente, proporcionando generalmente el procesador del sistema robótico señales de órdenes de articulación a al menos alguna de las articulaciones del conjunto de manipulador, y / o mientras una entrada a un controlador maestro / esclavo del procesador está temporalmente operativamente disociado del conjunto de manipulador, ya sea parcial o totalmente. Los términos "embrague de orificio", "embrague de instrumento", y "embrague de pose" en términos generales abarcan en embrague que implique a o se relacione con una abertura (por ejemplo, una apertura u orificio mínimamente invasivo, o cualquier otra abertura en cualquier estructura), un instrumento robótico o herramienta robótica, y una pose o configuración del manipulador, respectivamente.

55 [0075] Como se puede entender mediante la comparación de las figuras 8A y 8B, y tal como se ha descrito anteriormente de manera general, el accionamiento de entrada de embrague de orificio 516a permite que el conjunto de manipulador 520 sea reconfigurado manualmente, generalmente permitiendo que un usuario del sistema articule manualmente al menos una articulación (y típicamente una pluralidad de articulaciones) del conjunto de manipulador. En respuesta a la articulación manual, el procesador puede accionar una o más articulaciones del conjunto de manipulador mediante la transmisión de señales para efectuar combinaciones deseadas de velocidades de articulación de las articulaciones, con las combinaciones deseadas variando con cambios en la configuración de conjunto de manipulador. Por lo tanto, mientras al menos una articulación del conjunto manipulador está siendo externamente articulada (típicamente está siendo articulada por un usuario o similar, en vez del controlador y sistema de accionamiento robótico) al menos una articulación del conjunto manipulador está siendo accionada por el

robot. De este modo el procesador puede mantener una relación deseada entre los estados de articulación de modo que al menos una porción del manipulador se mueva con un movimiento deseado restringido.

5 [0076] En la figura 8B, por ejemplo, el procesador limita el movimiento manual de un soporte de instrumento para trasladar un eje de instrumento inicial 511A a un eje de instrumento deseado 511B, manteniendo una orientación del
 10 eje a través del movimiento. Cuando, por ejemplo, el conjunto de manipulador se mueve desde la alineación con el primera lugar de abertura 514a para la alineación con un segundo sitio de abertura 514b al menos en parte mediante la articulación manual de la articulación J2, el procesador calcula los movimientos coordinados de las articulaciones J5, J7, y similares, en respuesta al estado de articulación cambiante de la articulación J2. El procesador en el modo de embrague calcula órdenes para las articulaciones J5, J7, etc a fin de proporcionar sólo el movimiento deseado de
 15 traslación, de forma que el conjunto de manipulador tiene un grado efectivo de libertad de traslación que mantiene la orientación del eje del instrumento. El eje se puede trasladar con uno, dos o tres grados de libertad, y el instrumento no necesita ser montado en el manipulador al moverse el manipulador, puesto que el soporte del instrumento de enlace 518 puede definir el eje del instrumento. Una variedad de enlaces podría proporcionar un movimiento de ejes paralelos mecánicamente restringido similar, pero en esta realización no es necesario que ninguna unión (es) mecánica (s) del manipulador proporcione un tal grado de libertad de movimiento paralelo.

20 [0077] El de orificio y otros modos de embrague podrían proporcionar una variedad de grados de libertad de embrague alternativos, tales como mantener una pose deseada del conjunto de manipulador con rangos de movimientos maximizados para la configuración de conjunto de manipulador durante todo el movimiento de traslación y / o de rotación, y similares Se puede emplear una variedad de movimientos de articulación alternativas coordinados manualmente y accionados, con una, algunas o todas las articulaciones del conjunto de manipulador robótico accionadas en respuesta a la articulación manual de una, algunas o todas las articulaciones. Articulación de la articulación externa puede ser detectada o monitorizada con sensores de estado de articulación del sistema robótico.

25 [0078] Se pueden proporcionar aspectos adicionales de un modo de embrague de orificio, ya sea en lugar de o en combinación con los descritos anteriormente. Por ejemplo, una vez que el conjunto de manipulador está alineado con el sitio de apertura deseado, la articulación de entrada de embrague de orificio 516a (por ejemplo soltando el botón de entrada) puede solicitar al procesador que identifique una ubicación del orificio. El enlace 518 (que soporta a la entrada de embrague de orificio 516a) será en general acoplable al eje del instrumento mediante una articulación axial, y un extremo distal del enlace 518 (y / o una cánula fijada a éste), se colocará en general en o
 30 adyacente al lugar de abertura deseado 514b. El procesador puede determinar la ubicación del extremo distal del enlace 518 y/o de la cánula a partir de los estados de articulación del manipulador en respuesta al accionamiento de la entrada de embrague de orificio 516a, y, posteriormente, se puede utilizar esta información para calcular los movimientos del eje del instrumento de modo que pivote dentro del lugar de abertura deseado 514b. Por lo tanto, el conjunto de manipulador en el modo de embrague de orificio puede ser utilizado como una entrada para la ubicación del sitio abertura.

35 [0079] Un ejemplo de modo de embrague de instrumento puede ser entendido con referencia a la figura 8C. El embragado de instrumento es útil después de que el conjunto de manipulador quede alineado con el lugar de abertura, y puede facilitar la orientación manual de un instrumento, cánula, u otra estructura del conjunto de manipulador hacia un sitio interno de destino en el tejido, opcionalmente después de que la cánula y / o el efector de extremo haya sido al menos parcialmente insertado en el paciente. En respuesta a la actuación de la entrada de embrague de instrumento 516b, el procesador acciona el conjunto de manipulador para inhibir el movimiento lateral del eje del eje 511 sobre un pivote central 513 adyacente al lugar de abertura 514, permitiendo al mismo tiempo el movimiento lateral del extremo proximal del enlace 518. Por ejemplo, en respuesta a la articulación manual de articulaciones J6 y J7, el procesador puede accionar una combinación de las articulaciones del manipulador para
 40 efectuar movimientos pivotantes de enlace bidimensionales 518 centrados en el pivote central 513, tal como se ilustra esquemáticamente mediante las flechas 515 y el cono 517. En algunas realizaciones, se puede permitir el movimiento del enlace 518 y / o del instrumento a lo largo del eje, y en otras realizaciones se puede inhibir este movimiento axial del instrumento y / o del enlace 518. Independientemente, se puede simular un enlace mecánico central esférico remoto en el modo de embrague de instrumento sin limitar los movimientos de las articulaciones del conjunto de manipulador en otros modos.

45 [0080] En otro modo de embrague, aquí un modo de embrague de pose, puede entenderse con referencia a las figuras 8A y 8D. En respuesta al accionamiento de una entrada de embrague de pose 516c montada en el enlace 330 proximal al enlace 518, se puede articular de forma manual por lo menos una articulación de manipulador 520. En respuesta, el procesador acciona una o más articulaciones del conjunto de manipulador de modo que el enlace 518 (y su soporte de instrumento) se mantiene en una posición fija. Como el conjunto de manipulador 520 tiene un intervalo de configuraciones para una posición determinada del enlace 518 (y / o el eje del instrumento, efector de extremo, y similares), el procesador puede coordinar los movimientos de las articulaciones con la finalidad de
 50 mantener el conjunto de manipulador dentro de ese rango de configuraciones. Este modo de embrague de pose

podría permitir a un usuario del sistema reconfigurar manualmente el conjunto de manipulador 518 de una configuración en vértice orientada hacia abajo (tal como se muestra en la figura 8A) a una configuración con vértice orientado hacia arriba (tal como se ilustra en la figura 8D), mientras que el procesador mantiene una posición de una porción distal del conjunto de manipulador.

5 **[0081]** La entrada de embrague de pose 516c de entrada puede proporcionar un enfoque relativamente simple para permitir el ajuste manual de la pose. El procesador del sistema mantendrá en general las restricciones del orificio y / o del efector de extremo cuando el conjunto de manipulador esté en un modo de embrague de pose, pero no podrá aplicar ninguna restricción de pose. Los conjuntos de manipuladores accionables hacia atrás pueden beneficiarse de un sistema de compensación de la gravedad (hardware y / o software), durante el modo de embrague de pose, y este modo de embrague de pose puede permitir el ajuste manual de la pose, sin detectar las fuerzas (por ejemplo) entre la base y la cánula. En el modo de embrague de pose, el espacio nulo podría ser controlado por velocidad, y no puede controlado por posición.

10 **[0082]** Mientras que los ejemplos de entrada de embrague 516a, 516b, y / o 516c pueden proporcionar ventajas en la sencillez de implementación, facilidad de comprensión de los diversos modos de embrague, y similares, también pueden emplearse una variedad de otras interfaces de usuario del modo de embrague. Por ejemplo, se podrían implementar conjuntos de manipulador con sistemas capaces de indicar las fuerzas aplicadas a una cánula, un efector de extremo, o similar, una interfaz de usuario de embrague háptico sin botones. En lugar de pulsar un botón para cambiar el modo del procesador, el usuario puede articular de forma manual el conjunto de manipulador mediante la aplicación de fuerzas hápticas que excedan un umbral contra las estructuras pertinentes del conjunto de manipulador. El procesador puede contrarrestar las fuerzas por debajo de un umbral táctil apropiado, o puede tratar articulaciones externas que superen el umbral como entrada en el conjunto del manipulador, por ejemplo, por la saturación prioritaria de las restricciones del efector de extremo, el orificio y / o la pose para que el sistema se ajuste a la articulación externa.

15 **[0083]** Nótese que la saturación no implicará en general superar ninguna capacidad del hardware del conjunto de manipulador, sino que se implementará en el software. Por ejemplo, un procesador puede ser configurado para determinar que se ha excedido un umbral predeterminado de fuerza en una dirección lateral en la cánula para indicar que el cumplimiento de un cambio en la ubicación del orificio (y por tanto el pivote central para los movimientos futuros del efector de extremo) es apropiado. La posición del orificio podrá mantenerse a menos que las fuerzas aplicadas a la cánula excedan el umbral. La articulación externa del conjunto de manipulador puede ser inducida por un operador del sistema que trata de forma intencionada cambiar la posición del orificio, o por la pared del cuerpo del paciente, por ejemplo como cuando el paciente se mueve o se recoloca sobre la mesa. En cualquier caso, si las fuerzas externas de articulación contra el manipulador exceden el valor umbral, el procesador podrá permitir mover el orificio a una nueva posición, opcionalmente restringiendo el movimiento del manipulador a un modo de embrague de orificio deseado tal como se ha descrito anteriormente. Cuando las fuerzas se reduzcan por debajo del umbral, el procesador puede mantener la nueva posición del orificio.

20 **[0084]** Un umbral de fuerza háptica similar se podría aplicar a un modo de embrague de instrumento, especialmente teniendo en cuenta un sistema de detección de fuerza capaz de detectar momentos de articulación. De hecho, se podría implementar un embrague de instrumento de umbral de fuerza háptica en un sistema robótica con pivote central restringido mecánicamente. En cualquier caso, el accionamiento hacia atrás del manipulador utilizando fuerzas externas que superan el umbral harían que el procesador modifique el punto de ajuste del efector de extremo a fin de mantener la nueva posición, en lugar de devolver el instrumento a la posición anterior. Este embrague de instrumento puede ser más útil si se implementa con un sistema de detección de fuerza capaz de distinguir entre las fuerzas aplicadas en el cuerpo y las fuerzas ejercidas fuera del cuerpo. El embrague de instrumento solamente ocurriría entonces si las fuerzas aplicadas sobre el manipulador fuera del cuerpo excedieran el umbral.

25 **[0085]** El uso de umbrales de fuerza hápticos o pozos hápticos para alterar el modo de procesador puede ser combinado con procesadores configurados para (que típicamente usan código de software) priorizar tareas del controlador, tales como mantener la posición del orificio, la posición del efector de extremo, y la pose, opcionalmente con este orden de prioridad. Estos umbrales de fuerza (y las otras tareas de control del procesador descritas en este documento) se pueden incluir en sistemas que implementan las prioridades del controlador utilizando saturación de par de actuador prioritario. Los umbrales de fuerza también se pueden realizar utilizando procesadores que accionan manipuladores de acuerdo con una solución primaria y una tarea de control secundaria que tiene una prioridad entre los mismos, tal como se describe aquí. Opcionalmente, la principal prioridad puede incluir mantener la posición del orificio, y la prioridad secundaria puede comprender el mantenimiento de la posición del efector de extremo. Una prioridad terciaria puede comprender mantener la pose.

30 **[0086]** Con referencia ahora a las figuras 9A y 9B, el conjunto de manipulador 502 puede ser reconfigurado por el procesador por cualquiera de una variedad de diferentes razones. Por ejemplo, una articulación 526 puede ser accionada desde una configuración de vértice orientado hacia abajo a una configuración de vértice orientado hacia

arriba para inhibir las colisiones con un brazo, equipo o personal adyacente, para mejorar un rango de movimiento del extremo 508 efector; en respuesta al movimiento fisiológico del paciente tal como su respiración o similares; en respuesta al reposicionamiento del paciente, tal como mediante la reorientación de una mesa quirúrgica; y similares. Algunos, aunque no todos, de estos cambios en la configuración del conjunto de manipulador puede realizarse en respuesta a fuerzas externas aplicadas al conjunto de manipulador, con el procesador generalmente accionando una articulación diferente del manipulador que aquella que está siendo accionada por la fuerza externa. En otros casos, el procesador reconfigurará el conjunto de manipulador en respuesta a cálculos realizados por el procesador. En cualquier caso, el procesador puede variar desde un simple controlador maestro-esclavo con el fin de accionar el conjunto de manipulador en respuesta a una señal con el fin de proporcionar una configuración de conjunto de manipulador preferida. Tal configuración del conjunto de manipulador puede producirse durante los movimientos del efector de extremo maestro-esclavo, durante la reconfiguración manual u otra del conjunto de manipulador, y / o al menos en parte en un momento diferente, tal como después de liberar una entrada de embrague.

[0087] Con referencia ahora a la figura 10A, un diagrama esquemático simplificado del controlador 530 muestra un controlador maestro / esclavo 532 de acoplamiento de un dispositivo de entrada principal 534 a un manipulador esclavo 536. En este y en muchos de los otros controladores que se describen aquí, las entradas del controlador, salidas, y los cálculos se describen utilizando notación matemática vectorial en la que el vector x se refiere en general a un vector de posición en coordenadas cartesianas, y en la que el vector q se referirá a un vector de configuración de articulación de un enlace asociado (en la mayoría de los casos del enlace esclavo del manipulador), a veces referido como la posición de enlace en el espacio de articulación. Los subíndices se pueden anexar a estos vectores para identificar una estructura específica, cuando de lo contrario podría haber ambigüedad, de modo que x_m (por ejemplo) es una posición del dispositivo de entrada principal en el área de trabajo principal asociada o sistema de coordenadas, mientras que x_s indica una posición del esclavo en el área de trabajo. Los vectores de velocidad asociados con los vectores de posición están indicadas por un punto sobre el vector o la palabra "punto" entre el vector y el subíndice, tales como \dot{x}_m o $x_{m\dot{}}$ para el vector de velocidad principal, definiéndose los vectores de velocidad matemáticamente como el cambio en el vector de posición en un intervalo de tiempo (dx_m / dt para el ejemplo de vector de velocidad principal).

[0088] En la realización de la figura 10A, el controlador 532 comprende un controlador de velocidad jacobiano inverso. Donde x_m es una posición del dispositivo de entrada principal y $x_{m\dot{}}$ es la velocidad del dispositivo de entrada principal, el controlador 532 calcula órdenes al motor para su transmisión al manipulador 536 para efectuar los movimientos del efector de extremo secundario que corresponden al dispositivo de entrada de las velocidades principales. De manera similar, el controlador 532 puede calcular señales de retorno de fuerza para aplicar al dispositivo de entrada principal (y de ahí a la mano del operador) a partir de una posición esclava x_s y / o velocidad esclava $x_{s\dot{}}$. Es deseable una serie de mejoras en este esquema sencillo de controlador jacobiano maestro / esclavo inverso, incluyendo las que se ilustran en la figura 11 y describen en detalle en la Patente US N° 6.424.885, cuya descripción completa se incorpora aquí por referencia.

[0089] Con referencia ahora a la figura 10B, un procesador 542 puede caracterizarse por incluir un módulo de controlador primero 544 y un módulo de controlador segundo 546. El primer módulo 544 puede comprender un controlador de articulación principal, tal como un controlador maestro-esclavo jacobiano inverso. El controlador de articulación principal del primer módulo 544 puede ser configurado para generar los movimientos deseados del conjunto de manipulador en respuesta a las entradas del dispositivo de entrada principal 534. Sin embargo, tal como se señaló anteriormente, muchos de los enlaces de manipulador descritos aquí tienen una gama de configuraciones alternativas para una posición del efector de extremo en el espacio. Como resultado, una orden para que el efector de extremo adopte una posición dada podría resultar en una amplia variedad de diferentes movimientos y configuraciones de la articulación, algunos de las cuales pueden ser mucho más deseable que otros. Por lo tanto, el segundo módulo 546 puede ser configurado para ayudar a accionar el conjunto de manipulador a una configuración deseada, accionando en algunas realizaciones el manipulador hacia una configuración preferida durante los movimientos maestro-esclavo. En muchas realizaciones, el segundo módulo 546 comprenderá un filtro dependiente de configuración.

[0090] En amplios términos matemáticos, tanto el controlador de articulación principal del primer módulo 544 como el filtro dependiente de la configuración del segundo módulo 546 pueden comprender filtros utilizados por el procesador 542 para encaminar la autoridad de control a combinaciones lineales de articulaciones para el servicio a uno o más objetivos o tareas quirúrgicos. Si se supone que X es el espacio de movimiento de la articulación, $F(X)$ puede ser un filtro de control sobre las articulaciones para i) proporcionar un movimiento deseado del efector de extremo, y ii) proporcionar un movimiento pivotante del eje del instrumento en el lugar de la abertura. Por lo tanto, el controlador de articulación principal del primer módulo 544 puede comprender al filtro $F(x)$. Conceptualmente, $(1-F^{-1}F)(X)$ podría describir un filtro de subespacio dependiente de configuración que da autoridad de control de accionamiento para la combinación lineal de las velocidades de articulación que son ortogonales para servir a la meta del controlador de articulación principal (en este ejemplo, movimiento del efector de extremo y movimiento pivotante del eje del instrumento). Por lo tanto, este filtro dependiente de configuración podría ser utilizado por el

segundo módulo 546 de controlador 542 para dar servicio a un segundo objetivo, tal como mantener una pose deseada del conjunto de manipulador, inhibir colisiones, o similares. Ambos filtros pueden ser subdivididos en más filtros correspondientes para servir para tareas más específicas. Por ejemplo, el filtro $F(X)$ puede ser separado en $F_1(X)$ y $F_2(X)$ para el control del efector de extremo y el control del movimiento del eje de pivotamiento, respectivamente, cualquiera de los cuales puede ser elegida como la tarea del procesador de prioridad primaria o más alta.

[0091] Mientras que los cálculos matemáticos realizados por los módulos pueden (al menos en parte) ser similares, los procesadores robóticos y técnicas de control descritos en este documento generalmente utilizarán un controlador de articulación principal configurado para una primera tarea de controlador (a veces referida como un primaria), y un filtro dependiente de la configuración que utiliza una solución subrestringida generada por el controlador de articulación principal para una segunda (a veces referida como secundario) tarea. En gran parte de la descripción siguiente, el controlador de articulación principal se describirá con referencia a un primer módulo, mientras que el filtro dependiente de configuración se describirá con referencia a un segundo módulo. También se podrán incluir funciones adicionales (tales como filtros subespaciales adicionales) y o módulos adicionales de diferentes prioridades.

[0092] Tal como se ha señalado aquí en otra parte, el hardware y / o código de programación para realizar las funciones descritas con referencia a dichos módulos primero y segundo pueden ser totalmente integrados, integrados parcialmente, o separados completamente. El controlador 542 puede emplear las funciones de los dos módulos simultáneamente, y / o puede tener una pluralidad de diferentes modos en los que uno o ambos módulos se utilizan por separado o en formas diferentes. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el primer módulo 544 puede ser utilizado con poca o ninguna influencia del segundo módulo 546 durante las manipulaciones maestro-esclavo, y el segundo módulo 546 que tiene un papel más importante durante la instalación del sistema cuando el efector de extremo no está siendo impulsado robóticamente, tal como durante el embrague de orificio u otras articulaciones manuales del conjunto de manipulador. No obstante, en muchas realizaciones ambos módulos pueden ser activos durante casi todo o todo el tiempo en que está habilitado el movimiento robótico. Por ejemplo, mediante el ajuste de las ganancias del primer módulo a cero, estableciendo x_s a $x_{s,real}$, y / o reduciendo el rango de matriz en el controlador jacobiano inverso de modo que no controle tanto y dejando que los filtros dependientes de configuración tengan más autoridad de control, se puede reducir o eliminar la influencia del primer módulo sobre el estado del conjunto de manipulador con el fin de cambiar un modo de procesador 542 de un modo manipulador de tejido a un modo de embrague.

[0093] La figura 10C ilustra un refinamiento del esquema simplificado de control maestro-esclavo 540 de la figura 10B, y muestra cómo pueden ser utilizados diferentes módulos en los diferentes modos de procesador. Tal como se ilustra en la figura 10C, el primer módulo 544 puede, por ejemplo, comprender una cierta forma de un controlador jacobiano que tiene una matriz jacobiana relacionada. El segundo módulo 546 puede, en un modo de embrague de orificio, recibir señales desde el esclavo 536 que indican una posición o velocidad del esclavo generados al menos en parte por la articulación manual del enlace de manipulador esclavo. En respuesta a esta entrada, el segundo módulo 536 puede generar órdenes de motor adecuadas para el accionamiento de las articulaciones del esclavo con el fin de permitir la articulación manual el enlace esclavo al configurar el esclavo en la configuración de articulación deseada. Durante la manipulación del efector de extremo maestro-esclavo, el controlador puede usar un segundo módulo 546 para ayudar a definir las órdenes de motor sobre la base de una señal bq_o diferente. Esta señal de entrada alternativa para el segundo módulo 546 de controlador 542 puede ser utilizada para accionar el enlace de manipulador con el fin de mantener o mover la ubicación de pivote de abertura mínimamente invasiva a lo largo de la estructura de manipulador, a fin de evitar colisiones entre una pluralidad de manipuladores, así como para mejorar un rango de movimiento de la estructura de manipulador y / o evitar singularidades, así como para producir una pose deseada del manipulador, o similares. Por lo tanto, bq_o generalmente puede comprender y / o indicar (por ejemplo) un conjunto deseado de velocidades de articulación, que en general representan un objetivo de control secundario, típicamente en el espacio de articulación. En otras realizaciones, el procesador puede incluir módulos separados y / o filtros dependientes de configuración para el embrague, para tareas secundarias del controlador, y similares.

[0094] Con referencia ahora a la figura 12, un esquema de control parcial 550 ilustra modificaciones del controlador ilustrado en la figura 11. El esquema de control 550 representa muy aproximadamente una modificación de la porción 551 del controlador de la figura 11 para facilitar el control sobre los conjuntos de manipuladores tienen un gran número de grados de libertad. En la realización ilustrada en la figura 12, el primer módulo 544 comprende un controlador jacobiano inverso de velocidad, con la salida de los cálculos realizados utilizando una matriz inversa jacobiana modificada de acuerdo con un camino virtual de esclavo 552. Describiendo en primer lugar el camino virtual de esclavo, los vectores asociados con el esclavo virtual se indican generalmente con subíndice v , de modo que se integra una velocidad de esclavo virtual en el espacio de articulación $q_{\cdot v}$ para proporcionar q_v , que se procesa mediante un módulo de cinemática inversa 554 para generar una señal de posición de articulación esclava virtual x_v . La posición de esclavo virtual y la orden de maestro de entrada maestra x_m se combinan y se procesan utilizando cinemática directa 556. El uso de un esclavo virtual (generalmente con la dinámica simplificada) facilita un control y

5 retorno de fuerza suaves al acercarse a los límites duros del sistema, cuando se sobrepasan los límites blandos del sistema, y similares, tal como puede entenderse más completamente con referencia a la patente '885 anteriormente incorporada aquí por referencia. De manera similar, el cálculo de las órdenes al motor, tales como las señales de par de articulación o similares de los controladores de articulación en respuesta a la salida de la matriz Jacobiana inversa (modificado o aumentada por el segundo módulo 546) a través de controladores de articulación apropiados, de procesamiento de entrada y salida, y similares se describen más detalladamente en la patente '885.

10 **[0095]** En relación con la estructura indicada en general por los módulos de control primero y segundo 544, 546, y de los otros componentes del esquema de control 550 y otros controladores aquí descritos, estas estructuras comprenderán generalmente hardware de procesamiento de datos, software y / o firmware. Estas estructuras incluirán generalmente software reprogramable, datos, y similares, que pueden ser incluidos en el código legible por la máquina y almacenados en un medio tangible para su uso por el procesador 210 de la estación de trabajo 200 (ver la figura 1A). El código legible por la máquina puede ser almacenado en una amplia variedad de configuraciones diferentes, incluyendo ROM, RAM, memorias de una sola vez, medios magnéticos, medios ópticos de registro, y similares. Las señales que incorporan el código y / o los datos asociados al mismo pueden ser transmitidas por una amplia variedad de enlaces de comunicación, incluidos Internet, intranet, Ethernet, redes de comunicación y enlaces inalámbricos, señales y conductores eléctricos, fibra óptica y redes, y similares. El procesador 210 puede, tal como se ilustra en la figura 1A, comprender uno o más procesadores de datos de la estación de trabajo 200 y / o puede incluir circuitos de procesamiento de datos localizados de uno o más manipuladores, instrumentos, una estructura de procesamiento separada y / o ubicada a distancia, y similares, y los módulos que se describen aquí pueden comprender (por ejemplo) una sola placa de procesador común, una pluralidad de placas separadas, o uno o más de los módulos pueden estar separados en una pluralidad de placas, pudiendo algunas de ellas también ejecutar algunos o la totalidad de los cálculos del otro módulo. Del mismo modo, el código de software de los módulos puede ser escrito como un código de software integrado único, los módulos pueden ser separados cada uno en subrutinas individuales, o partes del código de un módulo pueden combinarse con algunos o la totalidad del código de otro módulo. Por lo tanto, las estructuras de datos y de procesamiento pueden incluir cualquiera de una amplia variedad de procesamiento de datos y / o arquitecturas de programación centralizadas o distribuidas.

30 **[0096]** Con referencia ahora a la salida del controlador de la figura 12 con más detalle, el controlador generalmente tratará de resolver un determinado vector q de configuración de conjunto de manipulador para su uso en la generación de órdenes para estos mecanismos manipuladores esclavos altamente configurables. Tal como se señaló anteriormente, los enlaces de manipulador suelen tener suficientes grados de libertad con el fin de ocupar una amplia gama de estados conjuntas para un estado determinado de efector de extremo. Estas estructuras pueden (pero no generalmente) comprender enlaces que tienen verdaderos grados de libertad redundantes, es decir, estructuras en las que el accionamiento de una articulación puede ser directamente reemplazada por un accionamiento similar de un conjunto diferente a lo largo de la cadena cinemática. No obstante, estas estructuras se denominan a veces como teniendo grados de libertad en exceso, adicionales, o redundantes, abarcando generalmente estos términos (en el sentido amplio) cadenas cinemáticas en las que (por ejemplo) los enlaces intermedios se pueden mover sin cambiar la posición (incluyendo tanto la ubicación como la orientación) de un efector de extremo.

40 **[0097]** Al dirigir el movimiento de los manipuladores altamente configurables utilizando el controlador de velocidad de la figura 12, el controlador de articulación primaria del primer módulo busca generalmente determinar o resolver un vector velocidad q_v de articulación virtual que puede ser utilizado para accionar las articulaciones de esclavo 536 de tal manera que el efector de extremo seguirá con precisión la orden principal x_m . Sin embargo, para los mecanismos esclavos con grados de libertad redundantes, una matriz Jacobiana inversa por lo general no define completamente una solución de vectores de articulación. Por ejemplo, el mapeo cartesiano de la orden x . Al movimiento de articulación q en un sistema que puede ocupar una serie de estados de articulación para de un estado determinado de efector de extremo es un mapeo de uno-a-muchos. En otras palabras, al ser el mecanismo redundante, hay matemáticamente un número infinito de soluciones, representadas por un subespacio en el que vive la inversa. El controlador puede incorporar esta relación utilizando una matriz Jacobiana que tiene más columnas que filas, el mapeo de una pluralidad de velocidades de articulación en comparativamente pocas velocidades cartesianas. Nuestra solución J^+x tratará generalmente deshacer este colapso de los grados de libertad del mecanismo esclavo en el espacio de trabajo cartesiano.

55 **[0098]** El controlador de articulación primaria del primer módulo puede emplear un número de técnicas diferentes para generar una solución primaria. Matemáticamente, cuando un mapa lineal (tal como una matriz jacobiana) es de muchos-a-uno, puede decirse que tiene un espacio nulo no trivial, comprendiendo el espacio nulo típicamente un subespacio del espacio de entrada que abarca una o más dimensiones. Para los mapas lineales con un espacio nulo no trivial, se pueden construir varias pseudo inversas para recoger una vector solución inverso aceptable que esté en el espacio nulo. Estos pseudo inversos tienen típicamente error residual cero, y la ecuación de solución de pseudo inversa puede escribirse como

$$\dot{q} = \dot{q}_{part} + \dot{q}_h$$

[0099] Aquí la solución seudo inversa q . es igual a la combinación de cualquier solución particular q_{part} añadida a la solución homogénea q_h . Con referencia al primer término o solución particular, como la solución particular resuelve el problema inverso, se sabe que la solución de mínimos cuadrados, a veces referida como la solución de dos normas mínima, es un ejemplo de elección para el primer término de la anterior ecuación general de solución de espacio de articulación, ya que proporciona una solución particular para el jacobiano. Esta pseudo inversa incluye el vector solución final con el $\|q_{part} + q_h\|_2$ minimizado, y está entre las seudo inversas alternativas que se describen a continuación. El término se solución segundo u homogéneo de la anterior ecuación solución seudo inversa es una asignación en el espacio nulo de la matriz Jacobiana J de manera que:

$$0 = J\dot{q}_h.$$

[0100] Se puede agregar cualquier cantidad de q_h a q_{part} y no afectar de modo alguno al movimiento del mecanismo con respecto al objetivo de control, x . Las seudo inversas adecuadas se diseñarán normalmente utilizando algún tipo de restricción adicional para determinar efectivamente cuál es la parte (si existe) del espacio nulo a añadir a una solución particular para definir completamente la solución utilizada para el cálculo de las órdenes al motor.

[0101] La inversa de mínimos cuadrados o normas mínimas se indica en este documento como $J^\#$. En el caso en que el jacobiano J es indeterminado, el $J^\#$ inverso normas mínimas se puede identificar a partir de:

$$J^\# = J^T (J J^T)^{-1}$$

Dónde J^T es la transpuesta de la matriz jacobiana. Esta inversa es de normas mínimas en el sentido en que las dos-normas del vector solución resultante $q = J^\# x$. es generalmente el de norma menor en el subespacio de los vectores solución (recordar que hay en un sub-espacio infinito de tales vectores). Para un robot quirúrgico (o para cualquier otro robot), esto corresponde generalmente a una solución que consigue el objetivo principal de control (tal como un movimiento maestro-esclavo del efector de extremo correspondiente al mango del dispositivo de entrada) con las velocidades de las articulaciones menores, un objetivo razonable para muchos de los sistemas robóticos. También es matemáticamente muy conveniente, ya que es una de las soluciones más fáciles de calcular. Sin embargo, este no es el único pseudo-inverso del jacobiano J , y de hecho pueden haber soluciones más adecuadas basadas en tareas, sobre todo cuando hay restricciones adicionales u objetivos para el movimiento de un sistema más allá (en nuestro ejemplo inicial) de un movimiento ordenado del efector de extremo con una velocidad de articulación mínima. Como la inversa de normas mínimas es sólo un ejemplo de una pseudo-inversa, donde J^{-1} o $J^\#$ aparece en este documento, generalmente será razonable pensar en ellos como represente en general a cualquier pseudo-inversa, no sólo la inversa de normas mínimas.

[0102] A partir de los mecanismos descritos anteriormente, se comprenderá que el espacio de control x . Deseado puede ser opcionalmente más complejo que el movimiento simple del efector de extremo, particularmente en sistemas en que se justifica la complejidad de los enlaces de manipulador redundantes. La combinación de tareas u objetivos del controlador empleará generalmente un filtro dependiente de la configuración del segundo módulo. Puede utilizarse una variedad de diferentes filtros. En algunos casos, se pueden adjuntar o aplicar objetivos múltiples para formar un vector aumentado deseado, especialmente si los objetivos son independientes. Por ejemplo, en el conjunto de manipulador robótico quirúrgico 502 ilustrado en la figura 7a, se puede apilar o aumentar el vector de efector de extremo ordenado con una ubicación deseada de la cánula o del punto de pivote, a fin de proporcionar un centro de movimiento pivotante inducido por software en un sitio de abertura mínimamente invasiva. Tal movimiento pivotante se refiere a veces como un movimiento del centro por software. Aumentar la exposición del problema de esta manera es más fácilmente aplicable cuando el conjunto de manipulador tiene suficientes grados de libertad para proporcionar una solución a la ecuación aumentada, ya que generalmente hay enlaces del conjunto de manipulador robótico como los antes descritos. Es decir, el vector de órdenes cartesiano aumentado (con la restricción de movimiento pivotante) q . sigue teniendo una dimensión menor que el vector velocidad de articulación q ., cuya dimensión es típicamente el número de articulaciones de manipulador.

[0103] Un ejemplo de formulación del problema de control de efector de extremo y cánula aumentado puede comprender el cálculo de un jacobiano J para cada objetivo de control. Para controlar el efector de extremo, se dispone de la cartografía $J_{eff}q$. a x_{eff} donde eff se usa aquí para indicar el vector y / o matriz que está asociado con el efector de extremo. Para el control de la cánula, también se construye un Jacobiano J_{can} que hace un mapa de las velocidades de articulación del conjunto de manipulador para las velocidades cartesianas de la cánula, llamadas x_{can} . Así, la cartografía se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{eff} \\ \dot{x}_{can} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{eff} \\ J_{can} \end{bmatrix} \dot{q}$$

5 **[0104]** Mediante el uso del mapa anterior, la pseudo inversa puede proporcionar una solución de normas mínimas para controlar tanto las velocidades del efector de extremo como de la cánula. Como se indica en el diagrama de control de la figura 12, los bucles de posición pueden ser cerrados mediante señales desde el conjunto de manipulador esclavo 536 para controlar también las posiciones (incluyendo la localización y orientación).

[0105] Los objetivos adicionales de control, tales como conducir hacia una pose preferida inhibidora de colisiones o similar, también se puede añadir de una manera similar. Sin embargo, a medida que se añaden estos objetivos la dimensión del espacio de vectores x . deseado puede igualar o superar a la del espacio solución q . Aquí, el filtro de subespacio del segundo módulo puede adoptar otra forma.

10 **[0106]** Cuando las dimensiones del espacio de vectores y el espacio solución son iguales, la pseudo inversa debe convertirse en una verdadera inversa, y la pseudo inversa de normas mínimas reduce convenientemente la inversa real. Si se buscan más soluciones aumentadas, sin embargo, el controlador y el robot en general no tienen suficientes grados de libertad para satisfacer todas las restricciones. Este problema se describe como sobre-restringido, de modo que puede crearse una nueva clase de pseudo inversa. Estos intentos de pseudo-inversa tratan de comprometer en cierto sentido matemático, devolviendo una solución que no satisface perfectamente todas las limitaciones, pero que aún puede ser matemáticamente determinada para ser la mejor solución en un cierto sentido identificable. Por ejemplo, se puede calcular un error residual resultante de la inversa imperfecta, por ejemplo utilizando una pseudo inversa de normas mínimas para devolver una solución que minimiza la norma de dos del error residual.

20 **[0107]** Algunos ejemplos de las limitaciones adicionales que pueden añadirse incluyen el mantenimiento de una restricción de pose, y / o evitar una colisión con un objeto que puede estar presente en el espacio de trabajo. En general, si una función de coste C que describe estos u otros objetivos puede escribirse en una forma cuadrática, por lo general se puede afirmar que:

$$C = r^T r = \left(\dot{x}_k - \sum_{j=1}^n J_{kj} \dot{q}_j \right)^2 .$$

25 Aquí x_k es la variable de control deseada;

q_j son las velocidades de articulación de las articulaciones 1, 2,... n;

J_{kj} son los jacobianos de la variable de control deseada para cada articulación, y

r es el error residual apropiado para nuestra función de coste cuadrática C . En general, las derivadas parciales se pueden tomar e igualar a cero, lo que nos permite resolver una solución de dos normas o de mínimos cuadrados:

30 **[0108]** Por lo tanto, tomando derivadas parciales de una función de coste cuadrática con la correspondiente matriz jacobiana puede conducir a la solución de normas mínimas, independientemente del número de limitaciones. Cuando el sistema es demasiado limitado, la solución resultante tiene una función de coste mínimo en la que se minimiza la norma de r . Si el sistema está sub-restringido, la solución resultante tiene función de coste cero y la solución toma la forma de la solución de dos-normas mínima, de modo que $q_{opcional} = J^T (JJ^T)^{-1} x$.

35 **[0109]** Como simple ejemplo de controlador aumentado, podemos controlar una articulación para mantener una pose utilizando el marco anterior mediante la creación de una variable de control deseada x_k y haciendo que sea idéntica a una articulación seleccionada q_j . A continuación, se escribe un controlador aumentado tal como se ha descrito anteriormente, pero aquí el control de la velocidad deseada del conjunto se selecciona para que sea igual a cero. En este ejemplo el jacobiano aumentado puede ser una matriz trivial con un uno en la columna para la articulación seleccionada. A continuación, se podría cerrar el bucle alrededor de un ángulo de articulación deseado, utilizando el diagrama de bloques de la figura 12 de una manera similar a la de la figura 11, accionando al mismo tiempo la articulación seleccionada hacia el ángulo deseado. En otras palabras, si se utilizara una forma de realización del controlador de la figura 12 para impulsar un conjunto de manipulador que tiene un grado de libertad extra, pero se accionara el grado de libertad extra a una configuración fija, el controlador podría dar resultados similares a los obtenidos mediante un conjunto de manipulador totalmente restringido accionado por el controlador de la figura 11, lo que indica que el controlador de la figura 12 es capaz de realizar la función primaria para producir un movimiento deseado de efector de extremo, junto con la tarea adicional (si es en cierto modo simple) de mantener una articulación fija.

5 **[0110]** El análisis es más complejo en un sistema sobre-restringido en comparación con un sistema subrestringido. Los robots en general, y los robots quirúrgicos, en particular, deben ser diseñados y controlados a fin de hacer un uso ventajoso de todas sus articulaciones. Como las exigencias al sistema cinemático de un robot manipulador pueden variar, no siempre es práctico o deseable incluir suficientes grados de libertad para estos manipuladores robóticos para realizar simultáneamente diversas tareas, aunque a veces es deseable llevar a cabo estas tareas diferentes al mismo tiempo. Como resultado, estos sistemas pueden ser generalmente sobre-restringidos durante al menos una porción de una manipulación robótica. Hay varios marcos matemáticos mediante los cuales agregar restricciones de uso utilizando filtros de subespacios diferentes. El primero es mediante vectores aumentados deseados, introducido anteriormente. También se describirán algunas técnicas de aumento adicionales que se pueden aplicar se discuten a continuación, después de los cuales se describirán también marcos matemáticos alternativos que incluyen al menos uno que tiene ventajas sobre el aumento.

10 **[0111]** Junto con combinaciones o aumentos de órdenes simples, puede combinarse una pluralidad de órdenes opcionalmente por el controlador de forma ponderada, por ejemplo, aplicando una solución de normas mínimas ponderada. La norma mínima puede ser calcularse con respecto a un conjunto de vectores de base que representan el espacio solución. La solución puede entonces comprender una combinación lineal de vectores de la base. Aunque a veces los vectores de base se visualizan como una unidad en la dirección x , una unidad en la dirección y , etc, ello no se requiere necesariamente. Por ejemplo, las articulaciones pueden diferir significativamente, siendo algunas axiales o prismáticas, siendo otras pivotantes o de rotación, y similares.

15 **[0112]** El uso de vectores de base puede entenderse a partir de un simple ejemplo, en el que e_1 es un grado / seg para un primer motor, e_2 es un grado / seg para un segundo motor, etc, y en el que se calcula un espacio solución de normas mínimas inicial. Este espacio solución puede ponderarse arbitrariamente eligiendo diferentes vectores de base. Por ejemplo, se podría igualar e_1 a diez grados por segundo para el primer motor, mientras que e_2 sigue siendo un grado / seg para el segundo motor. Una solución de normas mínimas tenderá a hacer que los coeficientes para e_1 no sea mayores, en promedio, que los de e_2 y el resto. Por lo tanto, este enfoque de ponderación puede tender a hacer que la velocidad del primer motor sea menor, debido a la ponderación de funciones de base que hemos escogido.

20 **[0113]** Además, se puede elegir que e_1 sea un grado / seg en la dirección positiva para el primer motor, y un grado / seg en la dirección positiva para el segundo motor. e_2 podría entonces ser de un grado / seg en la dirección positiva para el primer motor, y un grado / seg en la dirección negativa para el segundo motor. Una vez más, lo que efectivamente puede cambiar la ponderación y / o la forma en que los compromisos se proyectan en el espacio de interés del cirujano. En general, se puede abarcar cualquier transformación (es útil si la transformación es lineal, constante, e invertible) alrededor de la optimización, como en:

$$C_{\text{mejorada}} = r_{\perp} M_{\perp} M^{\perp}$$

25 donde W es una matriz de ponderación, y r es el error residual. En este sentido, se pondera el error residual tal como se desee, lo que contribuye a dar forma a la respuesta.

30 **[0114]** Por lo tanto, se puede utilizar la ponderación para hacer que algunas partes de la solución sean más importante que otras. Por ejemplo, W can diagonalizarse con grandes ponderaciones de los componentes importantes y pequeñas ponderaciones para los componentes de menor importancia del vector solución aumentado. Como alternativamente, se puede ponderar arbitrariamente las combinaciones lineales de cualquier componente de la solución.

35 **[0115]** Otra técnica que puede aplicarse para derivar órdenes de motor para sistemas sobre restringidos es hacer uso de técnicas para la optimización de mapas ruidosos y mal acondicionados. Todos los problemas inversos lineales de dimensiones finitas tienen un número de condiciones. Este número es una medida de la inclinación o desequilibrio del mapa lineal. Técnicamente, se trata de una relación entre el mayor valor singular de la aplicación lineal hacia los más pequeños, escrito de forma conceptual

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}, \text{ que describe cómo interactúan el ruido y la señal.}$$

40 **[0116]** Si una medida es ruidosa (tal como la medición de la velocidad de una articulación robotica o una orden maestra) y el ruido es independiente a través de las articulaciones, entonces podría ser tentador suponer que correría a cada componente de la solución casi por igual. Es decir, si la velocidad deseada del maestro, medida en la presencia de ruido, es $x_{k,\text{ruido}} = x_{k,\text{verdadero}} + GWN(\mu, \sigma)$, (donde μ y σ son la media y la varianza de un proceso de ruido blanco Gaussiano GWN , y se mantienen constantes a través de los diferentes elementos cartesianos $xdotk$), entonces uno podría esperar (aunque incorrectamente) que $x_{k,\text{ruido}} = x_{k,\text{verdadero}} + GWN(\mu, \sigma)$ donde μ, σ

son también constantes a través de las articulaciones. De hecho esto no es así, y tal suposición sería un error - el ruido aditivo está moldeado por la acción del mapa lineal, que añade algunos componentes juntos de una manera que tiende a acumular relación señal-ruido ("SNR"), y añade otros de una manera que tiende a erosionar el SNR. El examen de la acción de una matriz de ponderación mal diseñada dejará claro que esto es posible. La medida de este efecto es el número de condiciones.

[0117] Para sistemas robóticos, la pérdida de precisión asociada con un incremento en el número de condiciones ocurre cuando el jacobiano se vuelve mal condicionado, lo que a su vez ocurre cerca de las singularidades. A medida que crece el número de condición, el mapa actúa cada vez más como su espacio nulo está creciendo con una o más dimensiones, pero el efecto es continuo, no discreto. En cambio, un nuevo subespacio de vectores (solución) de articulación cartografía casi a cero en el espacio vectorial que deseado (maestro). Cualquier ruido, incluso el error de redondeo en los cálculos numéricos, puede y con frecuencia da lugar a soluciones fantasma, en las que se ordenan velocidades de articulación poco realistas para velocidades menores en el espacio de órdenes, incluidas las contribuciones de menor importancia debidas al ruido.

[0118] Un número de técnicas de filtrado subespaciales pueden abordar este efecto de mapa mal condicionado, incluyendo acondicionar la solución mediante el truncamiento de la descomposición de valor singular ("SVD") del jacobiano, forzando de forma efectiva que el espacio casi nulo adquiera una dimensión total. Las siguientes son breves descripciones de algunas de estas técnicas, incluyendo este truncamiento SVD.

[0119] Una de las técnicas para hacer frente a un mapa mal condicionado, que puede estar motivado por cercanía numérica o por cualquier otra cosa, es reducir el número de condiciones de una manera numéricamente tratable. Esta técnica resuelve un problema relacionado con el problema lineal inverso original, y se puede escribir como:

$$J^* = J^T (J J^T + \lambda I)^{-1}$$

J^* puede ser denominado como el jacobiano regularizado, e I es la matriz de identidad. La constante positiva λ es la constante de regularización. Tiene el efecto de incrementar todos los valores singulares de la aplicación lineal en una cantidad fija $\lambda^{1/2}$. Esto reduce el número de condición igual que una marea creciente levanta todos los barcos: el

número de condición original $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ se convierte en el número de condición reducido $\frac{\sigma_{\max} + \sqrt{\lambda}}{\sigma_{\min} + \sqrt{\lambda}}$. La desventaja de la inversa de regularización es que la elección de λ no siempre está bien motivada físicamente. Además, puede cambiar la solución para todos los componentes de la inversa, no sólo los que están absorbidos por el ruido.

[0120] Otro enfoque de filtro de subespacio para mejorar la condición de un mapa mal condicionada es la estimación bayesiana, que también se conoce como estimación a posteriori de máximo. En su forma más simple se reduce a algo equivalente a una inversa de regularización. El concepto principal es encontrar parámetros libres q_j que maximicen la función de densidad de probabilidad a posteriori de una medición de ruido $p(q_j, x_1, \dots, x_n)$. A través de la regla de Bayes, se puede escribir

$$p(\dot{q}_j, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n) p(x_1, \dots, x_n) = p(\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n, \dot{q}_j) p(\dot{q}_j)$$

de manera que el vector óptimo de velocidad de articulación q_j se obtenga por

$$\tilde{q}_j = \arg \max_{\dot{q}_j} p(\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n, \dot{q}_j) p(\dot{q}_j)$$

[0121] Aquí, la primera de las dos nuevas funciones de densidad de probabilidad ("PDFs") es el proceso de medición del ruido, y el segundo es la distribución a priori (o antes) para el vector solución. Se puede demostrar que, si los procesos de ruido son de promedio cero decir, independientes y Gaussianos, y si las estimaciones previas sobre la solución son también de media cero, independientes y Gaussianos, entonces la solución puede escribirse generalmente como:

$$\tilde{q} = J^T (J J^T + A A^T)^{-1} \dot{x}$$

donde A es una matriz formada por las variancias del proceso de medición divididas por las variancias de la distribución a priori. Igual que con la inversa de regularización, los procedimientos bayesianos cambian la solución. En este caso, el cambio está físicamente motivado por una técnica de optimización destinada a manejar las mediciones en presencia de ruido, y para manejar la disponibilidad de información previa sobre la solución probable.

- 5 [0122] Como nota final sobre el filtrado de subespacio de mapas mal condicionados, se pueden utilizar los mismos procedimientos de truncamiento utilizando descomposición del valor singular de con gran efecto. En particular, este enfoque puede ser aplicado en el sistema de control ilustrado en la figura 11 con un jacobiano de seis por seis. Estos procedimientos son también extensibles a los casos sub o sobre restringidos. Una desventaja de este enfoque es que la sobrecarga de computar el inverso puede ser mayor que otras técnicas discutidas aquí, aunque no necesariamente por mucho. Una ventaja es que el número de condiciones perjudicial puede ser inspeccionado y controlado directamente.
- 10 [0123] Otro enfoque de optimización de filtro de subespacio aún más aumentado que se puede aplicar a sistemas robóticos quirúrgicos con grados de libertad redundantes sobrerestringidos es la está optimización convexa restringida. Una solución de norma mínima basada en la minimización de una forma cuadrática tiene la elegancia matemática de reducir a un sistema de ecuaciones lineales. En general, estas ecuaciones lineales simultáneas se pueden resolver rápidamente y con gran precisión, y es accesible y fácil de entender, y sin duda esta facilidad de implementación alienta su uso. Es posible escribir otros enunciados de los problemas de optimización, incluyendo algunos que pueden ser bien planteado y también lograr soluciones casi tan fácilmente. Una clase de tales problemas se denomina optimización convexa, y hay una clase correspondiente de algoritmos que proporcionan soluciones eficaces, incluidos los algoritmos descritos por Boyd y Vandenberghe.
- 15 [0124] Además de (o, como alternativa a) los procedimientos descritos anteriormente, los controladores de sistemas robóticos quirúrgicos que tienen grados de libertad redundantes también podrían beneficiarse de procedimientos matemáticos para hacer frente a las restricciones que respetan las prioridades. La discusión anterior se ha centrado principalmente en la optimización de un problema en el que las restricciones se imponen mediante la optimización aumentada. Sin embargo, puede haber diferencias en importancia entre un problema de control principal y las soluciones deseables, pero no necesariamente requeridas que podemos añadir. A continuación se introducen varios mecanismos matemáticos para hacer más blandas las restricciones, de modo que se pliegan hacia atrás o se pueden relajar fácilmente a medida que el problema de control principal se hace más difícil, empleando más de los grados de libertad del sistema. Un ejemplo de una restricción blanda sería mantener un codo o vértice común de un manipulador apuntando hacia arriba, tal como se ha descrito anteriormente en relación con las figuras 5A y 5B. Otra limitación podría ser la de maximizar el destreza en el espacio de trabajo del robot, o alguna otra medida matemática o eficacia de robótica. Se podría, por ejemplo, ordenar a nuestro controlador abandonar gradualmente estos objetivos secundarios como tarea principal (por ejemplo, cumpliendo con un vector de orden de movimiento de efector de extremo), permitiendo así que el sistema alcance el objetivo primario con el coste de objetivos de prioridad inferiores. Por ejemplo, puede ser que necesite y utilice los grados de libertad adicionales de otro modo para evitar una singularidad o similares.
- 20 [0125] Una manera de establecer un sistema que tiene una pluralidad de restricciones, tareas u objetivos con prioridades entre sí es la construcción de la tarea secundaria como una parte aumentada de la solución, según la discusión anterior. A continuación, se puede utilizar una matriz de ponderación para reducir la importancia de la restricción secundaria en comparación con la de la tarea principal. También puede ajustarse esta matriz de ponderación durante el uso, para que la ponderación sea neutral cuando el robot se encuentra en su punto óptimo, mientras que la ponderación podría ejercer una pinza muy fuerte en cualquier solución aumentada (haciendo que la restricción secundaria apenas contribuya a la solución final) a medida que uno se acerca a la región difícil. También es posible activar y desactivar la ponderación por completo, a fin de lograr un interruptor discreto que respete la prioridad. Se pueden utilizar técnicas similares para la solución regularizada y el enfoque bayesiano. Por ejemplo, el parámetro λ , así como la distribución anterior, pueden ajustarse en una forma dependiente de la configuración.
- 25 [0126] Un enfoque alternativo matemático que puede permitir a un sistema de control aplicar una pluralidad de restricciones en el que las restricciones tienen una prioridad entre sí se denomina a veces como procedimiento proyector. Estos procedimientos ventajosos en general utilizan una matriz de proyección para añadir restricciones, y se puede utilizar en lugar de y / o además de los procedimientos de aumento descritos anteriormente.
- 30 [0127] Haciendo referencia de nuevo al diagrama de bloques de la figura 12, los procedimientos de proyección pueden utilizar el vector de entrada bq_o . Se puede determinar en primer lugar que nuestra principal restricción o tarea es que el movimiento maestro-esclavo del efector de extremo generado por el conjunto de manipulador debería, si es posible, corresponder siempre al movimiento ordenado por el dispositivo de entrada principal. Para cualquier mapa lineal de esta restricción principal u optimización del movimiento del efector de extremo, J_{eff} (mapeo q_o a x para el efector de extremo) se puede construir un filtro para una o más restricciones secundarias o de vector de orden q_o de modo que esta(s) restricción (es) secundaria (s) no puedan interferir con el movimiento ordenado primario x_m . Evitar la interferencia entre las restricciones se puede lograr mediante la construcción o limitación q_o de modo que esté enteramente dentro del espacio nulo de J_{eff} . Este límite o filtro funciona como un proyector matemático, proyectando una restricción general u objetivo q_o en el el objetivo prioritario especial q_o con la propiedad de que $J_{eff} q_o = 0$. Hay muchos de estos proyectores, exactamente uno de los cuales no tiene pérdidas. Algunos proyectores P incluyen el proyector sin pérdidas:
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

$$P = I - J_{eff}^{-1} J_{eff}$$

donde J_{eff}^{-1} es cualquier pseudo-inversa para su uso.

5 [0128] Si se considera ahora cualquier tarea que se pueda escribir como un controlador lineal de las tasas con una retroalimentación de posición, tal como la tarea de movimiento a distancia de cánula central que se ha descrito anteriormente. El jacobiano se puede formar como antes, y las velocidades de articulación responsables de lograr la tarea se pueden calcular (por ejemplo) como:

$$\dot{q}_{can} = J_{can}^{\#} \dot{x}_{can} .$$

10 [0129] Las tasas propuestas para la tarea de cánula se proyectan a fin de no tener efecto alguno sobre las tasas de las tareas de los efectores de extremo, y después se añaden a la tarea de efector de extremo para generar la solución virtual o propuesta:

$$\dot{q}_v = \dot{q} + P\dot{q}_{can} .$$

15 [0130] En general, se puede escribir cualquier tarea secundaria (como el movimiento del centro de software del manipulador) de modo que su jacobiano proyectado tenga autoridad sólo sobre aquellas combinaciones lineales de articulaciones que están en el espacio nulo de la tarea primaria (tales como J_{eff}) proyectando el jacobiano de la tarea secundaria (en nuestro ejemplo J_{can}) a través del proyector P antes de encontrar los movimientos de manipulador de tareas secundarias (\dot{q}_{can}). Estos cálculos pueden ser recurrentes, y los detalles adicionales con respecto a las técnicas de cálculo matemáticos aplicables han sido descritos por Sicilliano y Slotine.

20 [0131] Además de los ejemplos específicos de procedimientos de proyector descritos anteriormente, se pueden emplear proyectores similares para una amplia variedad de usos en controladores maestro-esclavo robóticos y / o quirúrgicos. Los proyectores desarrollados anteriormente son muy potentes y pueden ser utilizados en el controlador para dar un mecanismo dirigido para el control de ciertos grados de libertad en ciertas maneras. Por ejemplo, a la derecha de " J^T " en el diagrama de bloques de la figura 12 es el grueso del sistema de controlador de articulación 558. Utilizando las técnicas anteriores, se podría duplicar esta parte, obteniéndose dos controladores con la velocidad deseada u ordenada a cada uno. Supongamos que además se filtra, o proyecta, la velocidad deseada de acuerdo con la tarea. De este modo se podría crear un controlador para cada tarea, cada uno con su propio conjunto de restricciones, ganancias, saturaciones, y similares. De esta manera es posible hacer que diferentes tareas pierdan la prioridad o cedan en condiciones apropiadas.

25 [0132] Aún se pueden realizar más tareas secundarias usando proyección, aumento, y / u otros procedimientos, incluyendo todas o algunas de las manipulaciones robóticas y / o procedimientos de ajuste descritos anteriormente. La generación de tareas secundarias para realizar la evitación de colisiones descritas aquí y en otros lugares en la literatura (véase Sicilliano y Slotine y referencias ahí citadas) puede, por ejemplo, ser revisada con el fin de inhibir las colisiones entre dos conjuntos de manipulador simultáneamente en movimiento. Una solución será utilizar el formalismo general de las tareas aumentadas para generar los controladores de tasa, tal como se mencionó anteriormente.

30 [0133] Otros enfoques de control modificados se pueden aplicar para otros modos de operación. Por ejemplo, para bloquear un brazo o conjunto de manipulador, o un subconjunto de los grados de libertad de tal estructura (véase el embragado más adelante), que deliberadamente puede sujetar algunos o la totalidad del vector de salida del primer módulo 544 a cero. Para restablecer el maestro-esclavo que sigue, se suelta la abrazadera, preferentemente después de cumplir con las condiciones elementales correspondientes para descartar discontinuidades de salto en la orden de entrada.

35 [0134] Utilizando los algoritmos de control descritos anteriormente, también se puede ahora entender cómo embragar un subconjunto de articulaciones o un subespacio del espacio de velocidades a fin de proporcionar un modo de embrague de instrumento y / o de embrague de orificio. En un sistema de cirugía robótica mínimamente invasivo, un modo de embrague de instrumento permitirá generalmente la articulación manual del conjunto de manipulador con grados de libertad limitados. Por ejemplo, al eliminar y sustituir un primer instrumento con un segundo instrumento que tiene un efector de extremo quirúrgico diferente, un asistente podría desear ser capaz de mover manualmente el conjunto de manipulador a fin de extender y retraer el instrumento a través del sitio de acceso, para pivotar el instrumento sobre el sitio de acceso para orientar y colocar el nuevo efector de extremo, y similares. Estos grados de libertad de embrague deseados no suelen estar alineados con los grados de libertad de las articulaciones mecánicas del sistema, por lo que simplemente la liberación de una o más articulaciones puede permitir el movimiento no deseado o incluso peligroso del sistema de manipulación. Este embrague de sustitución de

instrumento podría ser facilitado, sin embargo, si el sistema inhibido matemáticamente describiera movimientos del conjunto de manipulador, tales como el movimiento lateral de un eje o cánula insertada en el sitio de acceso mediante la generación y uso de una matriz de proyección o una de las soluciones aumentadas descritas anteriormente en el segundo módulo 546 para accionar una o más articulaciones en respuesta al movimiento manual del conjunto de manipulador. De manera similar, un modo de embrague de orificio puede permitir que la cánula o el sitio de acceso sea movido (y, opcionalmente, para identificar la localización del nuevo sitio de acceso cuando se ha completado el movimiento), aunque puede mantener una orientación y / o pose de algunos o la totalidad del conjunto de manipulador durante el movimiento manual.

[0135] Si los grados de libertad embragados del enlace de manipulador esclavo coinciden con uno o más grados de libertad de articulación (es decir, si algunas de las articulaciones están bloqueadas y algunas articulaciones son libres de moverse en el modo de embrague), entonces el embrague es directo: simplemente se vuelve a apagar el controlador para aquellas articulaciones que están libres para moverse. Sin embargo, generalmente será ventajoso embragar las articulaciones de una manera dependiente, donde se vincula el movimiento de una articulación por el controlador de movimiento de por lo menos otra articulación de modo que puedan ser manualmente articuladas juntas como un solo grado de libertad. Esto puede lograrse por el accionamiento de al menos una articulación de un conjunto de manipulador robótico en respuesta a la articulación externa de al menos otra articulación. El controlador puede efectuar este movimiento, que generalmente será diferente de cualquier grado de libertad del sistema mecánico, mediante la definición de cualquier combinación lineal arbitraria deseada de velocidades que pueden ser tratadas como un solo grado de libertad que el operador puede manipular, opcionalmente mientras algunos o todos los otros grados de libertad mecánicos permanecen bloqueados. Este concepto general incluye embrague de orificio, embrague de instrumento, embrague de codo (en el que se permite moverse a un codo intermedio, por ejemplo, de una configuración de vértice orientado hacia arriba a una configuración de vértice orientado lateralmente mientras el movimiento en efector de extremo permanece inhibido), y otros modos de embrague normales. El embrague de articulación a articulación normal queda excluido como caso especial.

[0136] Con referencia a un ejemplo de un sistema de controlador para efectuar el embrague que de nuevo puede ser entendido con referencia a la figura 12, al comienzo del embrague, la orden de entrada virtual x_v sigue a x_m y el brazo aparece bloqueado. Cuando el sistema cambia a modo de embrague, se crea un proyector P que describe la combinación lineal de las velocidades de articulaciones que no deben tener libertad de movimiento:

$$P_{lock} = J_{lock}^{\#} J_{lock} ; P_{free} = I - P_{lock} .$$

Si este proyector se inserta en el camino después del bloque "544 (J^1)" en el diagrama de bloques, entonces esas velocidades están ocultos desde el controlador.

[0137] Si este proyector se implementa mientras el brazo está siguiendo, el brazo seguirá intentando seguir pero esta combinación lineal de articulaciones no tendrá orden. Por otra parte, en caso de que esta combinación lineal de articulaciones de pase a moverse (accionada desde atrás por el operador o similares), el controlador se quedará ciego para este y no lo corregirá.

[0138] Hay más tareas u objetivos adicionales del sistema que pueden ser implementados utilizando las técnicas de controlador aquí descritas. A continuación se describe el filtrado adaptativo y el aprendizaje de un lugar de acceso al sitio pivotante de movimientos de instrumentos. Además, las restricciones hápticas pueden ser implementadas utilizando otra variación en estas técnicas.

[0139] En cuanto a las restricciones hápticas, generalmente es útil proporcionar indicaciones al operador durante la manipulación del brazo esclavo a través del dispositivo de entrada principal. Por ejemplo, puede ser deseable indicar al operador que se mantenga lejos de configuraciones subóptimas que más tarde puedan causar problemas de controlabilidad. Un procedimiento simple para proporcionar tales restricciones hápticas es poner en práctica una técnica de límite de articulación. Otro procedimiento consiste en activar un servo de un solo lado cuando se cruza un umbral. Esto se puede hacer utilizando cualquiera de los procedimientos de proyector o de aumento antes descritos.

[0140] Un servo de una cara hará generalmente retroceder hacia o desde un punto de control si los sensores indican que se cruza el umbral y el movimiento está además dirigido en la dirección equivocada. Una velocidad que es paralela a la frontera puede ser descrita por cada punto a lo largo de la frontera. Un producto escalar del vector velocidad y el umbral indican a continuación si el operador está alejándose o acercándose a la frontera, y se resiste la proyección en la dirección equivocada. Todo esto se puede hacer con los operadores de proyector descritos anteriormente y una comparación con cero.

[0141] Con referencia ahora a la figura. 13, un conjunto de manipulador robótico quirúrgico con centrado por software 560 de montaje tiene ventajas particulares relacionadas con el movimiento de un pivote central de movimiento 562 de un instrumento robótico 564 con movimiento de un sitio de orificio asociado o acceso quirúrgico

mínimamente invasivo en un paciente 566. El conjunto de manipulador 560 puede ser montado en una mesa adyacente al paciente, en el techo o en el suelo, y puede compensar el movimiento del sitio del orificio (por ejemplo, la respiración del paciente) controlando independientemente la ubicación del sitio del orificio. En el ejemplo de realización de la figura 13, la ubicación del sitio de orificio puede ser controlada en respuesta a la información de fuerza cartesiana en el punto central de pivotamiento de cánula detectado por una cánula sensora de fuerza 568.

[0142] El marco de coordenadas unido a la cánula se designa como Ocan en la Figura 13. Este marco es distinto de un marco de base, Obase, en la base del manipulador y la punta de marco, Otip, en la punta del instrumento. Las fuerzas cartesianas sobre la cánula pueden ser resueltas para controlar la posición de la cánula (Ocan). Los pares sobre Ocan no son necesarios para el control de dicha posición. Algunas o todas las fuerzas en el orificio pueden ser resueltas mediante un sistema de detección de fuerza de cánula 568, y / o al menos algunas de las fuerzas pueden resolverse utilizando un sistema de detección de fuerzas del instrumento 564, el conjunto de manipulador 560 (por ejemplo, sensores de par de articulación del manipulador), o similares.

[0143] Dada la geometría y la posición del conjunto de manipulador y mediante la detección de las fuerzas de cánula, las leyes de control pueden mover la posición de la cánula en respuesta a las fuerzas de reacción en la cánula. Un ejemplo de una ley de control como esta es establecer una fuerza cartesiana sobre la cánula a cero. El controlador intentará entonces mover el conjunto de manipulador de tal manera que se minimice la fuerza cartesiana resultante sobre la cánula. También es posible ordenar una fuerza de cánula no nula, por ejemplo, de 22,2 N (5 libras) en la dirección de cánula Z positiva para que el brazo ayude a retraer la cánula del paciente. Esto también se puede lograr utilizando el mismo controlador.

[0144] Un controlador representativo 570 para accionar el conjunto de manipulador 560 en respuesta al movimiento de la zona de acceso mínimamente invasiva se muestra en las figuras 13A-13C. La figura 13A muestra el diagrama de bloques global para el controlador de movimiento de cánula tal como se encajaría en un conjunto de controlador remoto de centrado. Las señales de los sensores de fuerza 572 se pueden derivar de las características del sensor y su colocación en el brazo. Un módulo de transformación 574 (normalmente un operador Jacobiano) transforma la información de medición de fuerza del sensor en el marco de referencia de las fuerzas de cánula cartesianas. La fuerza de cánula ordenada 576 se puede proporcionar paramétricamente (por ejemplo, como un valor programado). En el caso de compensación de la respiración, esta fuerza ordenada podría, por ejemplo, ser cero ($f_x = 0$, $f_y = 0$, $f_z = 0$). En el caso de retracción, podría ser ($f_x = 0$, $f_y = 0$, $f_z = a$) donde a es un valor de retracción (por ejemplo, en Newtons). El módulo de filtro 578 crea una señal de error filtrada de la fuerza de cánula real y la fuerza de cánula ordenada. La posición de punta esclava ordenada 580 viene del lado maestro del bucle de control remoto (véase, por ejemplo, la figura 11) y también se puede proporcionar una velocidad de punta esclava ordenada 582.

[0145] El módulo de controlador híbrido 584 acepta órdenes y la posición esclava real y señales de velocidad, junto con señales de error filtradas de fuerza de cánula, y crea señales de par motor de articulación. La dinámica del conjunto de manipulador centrado por software se muestra como 586, que interactúa con la dinámica del entorno del paciente 588.

[0146] Las figuras 13B y 13C muestran disposiciones o algoritmos de control representativos para el módulo de filtro 578 y el controlador híbrido 584, respectivamente. En el caso de la orden de fuerza filtrada, un módulo de comparación simple 590 puede crear una señal de error entre la fuerza de cánula ordenada y la real. El error filtrado puede ser a continuación generado por un filtro pasa-bajos 592. En el caso del controlador híbrido 584, un buen procedimiento de control podría ser convertir la fuerza de cánula ordenada en un movimiento de cánula ordenado 594. Esto puede hacerse mediante la creación de una posición incremental ordenada proporcional al error de fuerza de cánula y la adición de esta posición de cánula incremental a la posición actual de cánula (real) para crear una posición de cánula ordenada. La posición de cánula ordenada se dispone en el vector 596 con la posición de punta esclava ordenada, para crear un vector de posición ordenada para el conjunto de manipulador. Esto se combina con posiciones y velocidades de articulación reales y se introduce en el controlador esclavo de centrado por software 598 para crear pares de motor ordenados, que a su vez se utilizan para accionar los motores del conjunto de manipulador.

[0147] Se hace referencia ahora a las figuras 14A y 14B que ilustran un marco de coordenadas de instrumento y un eje del instrumento que se mueve pivotante sobre un sitio de acceso mínimamente invasivo, respectivamente. Tal como se muestra en la figura 14A, el punto de pivote PP es la posición relativa al sitio de acceso mínimamente invasivo en el cual pivota el eje del instrumento. El punto de pivote PP puede, por ejemplo, calcularse determinando inicialmente una posición original de la interfaz entre el instrumento manipulador 14.1 y un vector unidad U_0 que tiene la misma orientación que el eje del instrumento. Los valores de la posición del punto de pivote PP (x , y , z) pueden derivarse de varios sensores del conjunto de manipulador.

[0148] Haciendo referencia a la figura 14A, el instrumento puede estar dentro de un primer marco de coordenadas (x , y , z) que tiene los ángulos θ_4 y θ_5 . El vector unidad U_0 puede ser calculado por la matriz de transformación:

$$U_0 = \begin{bmatrix} \cos \Theta_5 & 0 & -\sin \Theta_5 \\ -\sin \Theta_4 \sin \Theta_5 & \cos \Theta_4 & -\sin \Theta_4 \cos \Theta_5 \\ \cos \Theta_4 \sin \Theta_5 & \sin \Theta_4 & \cos \Theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

[0149] Después de cada movimiento del efector de extremo se puede calcular un movimiento angular del instrumento $\Delta\Theta$ tomando el arcsen de producto cruzado de los vectores unidad U_0 y U_1 primero y segundo del instrumento de acuerdo con las siguiente de ecuaciones lineales L_0 y L_1 .

5

$$\Delta\Theta = \arcsin([T])$$

$$T = U_0 \times U_1$$

donde:

T = a vector que es un producto cruzado de los vectores unidad U_0 y U_1 .

10

[0150] El vector unidad de la nueva posición del instrumento U_1 puede determinarse usando los sensores de posición y la matriz de transformación descritos más arriba. Si el ángulo $\Delta\Theta$ es mayor que un valor umbral, entonces se puede calcular un nuevo punto de pivote y U_0 se establece como U_1 . Tal como se muestra en la figura 14B, se pueden definir las orientaciones primera y segunda del instrumento por las ecuaciones lineales L_0 y L_1 :

15

L_0

$$x_0 = M_{x0} \cdot Z_0 + C_{x0}$$

$$y_0 = M_{y0} \cdot Z_0 + C_{y0}$$

y L_1 :

20

$$x_1 = M_{x1} \cdot Z_1 + C_{x1}$$

$$y_1 = M_{y1} \cdot Z_1 + C_{y1}$$

donde:

Z_0 = una coordenada Z a lo largo de la línea L_0 con respecto al eje z del primer sistema de coordenadas.

Z_1 = una coordenada Z a lo largo de la línea L_1 con respecto al eje z del primer sistema de coordenadas.

25

M_{x0} = una pendiente de la línea L_0 como una función de Z_0 .

M_{y0} = una pendiente de la línea L_0 como una función de Z_0 .

M_{x1} = una pendiente de la línea L_1 como una función de Z_1 .

M_{y1} = una pendiente de la línea L_1 como una función de Z_1 .

C_{x0} = una constante que representa la intersección de la línea L_0 y el eje x del primer sistema de coordenadas.

30

C_{y0} = una constante que representa la intersección de la línea L_0 y el eje Y del primer sistema de coordenadas.

C_{x1} = una constante que representa la intersección de la línea L_1 y el eje x del primer sistema de coordenadas.

C_{y1} = una constante que representa la intersección de la línea L_1 y el eje Y del primer sistema de coordenadas.

[0151] Las pendientes se pueden calcular utilizando los algoritmos siguientes:

$$M_{x0} = U_{x0}/U_{z0}$$

$$M_{y0} = U_{y0}/U_{z0}$$

$$M_{x1} = U_{x1}/U_{z1}$$

$$M_{y1} = U_{y1}/U_{z1}$$

5

$$C_{x0} = P_{ox} - M_{x1} \cdot P_{oz}$$

$$C_{y0} = P_{oy} - M_{y1} \cdot P_{oz}$$

$$C_{x1} = P_{1x} - M_{x1} \cdot P_{1z}$$

$$C_{y1} = P_{1y} - M_{y1} \cdot P_{1z}$$

10 Dónde:

U₀ (x, y, z) = los vectores unidad del instrumento en la primera posición dentro del primer sistema de coordenadas.
 U₁ (x, y, z) = los vectores unidad del instrumento en la segunda posición dentro del primer sistema de coordenadas.
 P₀ (x, y, z) = las coordenadas de la intersección del efector de extremo y el instrumento en la primera posición dentro del primer sistema de coordenadas.

15 P₁ (x, y, z) = las coordenadas de la intersección del efector de extremo y el instrumento en la segunda posición dentro del primer sistema de coordenadas.

[0152] Para encontrar una ubicación de punto de pivote aproximada del PP, se pueden determinar los puntos de giro del instrumento en la primera orientación L₀ (punto de pivote R₀) y en la segunda orientación L₁ (punto de pivote R₁), y se calcula y almacena la mitad de la distancia entre los dos puntos R₀ y R₁ como el punto de pivote R_{ave} del instrumento. El punto de giro R_{ave} se determina mediante el vector producto cruzado T.

20

[0153] Para encontrar los puntos R₀ y R₁ las siguientes igualdades se pueden ajustar para definir una línea con la misma orientación que el vector T que pasa a tanto de través de L₀ como de L₁.

$$t_x = T_x/T_z$$

$$t_y = T_y/T_z$$

25 donde:

t_x = la pendiente de una línea definida por el vector T con respecto al plano Z-x del primer sistema de coordenadas.
 t_y = la pendiente de una línea definida por el vector T con respecto al plano Z-y del primer sistema de coordenadas.
 T_x = la componente x del vector T.

T_y = la componente y del vector T.

30 T_z = la componente z del vector T.

[0154] Al elegir dos puntos para determinar las pendientes T_x, T_y y T_z (por ejemplo, T_x = X₁-x₀, T_y = y₁-y₀ y T_z = z₁-z₀) y la sustitución de las ecuaciones lineales L₀ y L₁, se consigue una solución para las coordenadas del punto para R₀ (x₀, y₀, z₀) y R₁ (x₁, y₁, z₁) de la siguiente manera.

$$z_0 = ((M_{x1}-t_x)z_1 + C_{x1} - C_{x0}) / (M_{x0} - t_x)$$

$$z_1 = ((C_{y1} - C_{y0})(M_{x0}-t_x) - (C_{x1}-C_{x0})(M_{y0}-t_y))$$

$$((M_{y0}-t_y)(M_{x1}-t_x) - (M_{y1} - t_y)(M_{x0} - t_x))$$

35

$$y_0 = M_{y0} \cdot z_0 + C_{y0}$$

$$y_1 = M_{y1} \cdot z_1 + C_{y1}$$

$$x_0 = M_{x0} \cdot z_0 + C_{x0}$$

$$x_1 = M_{x1} \cdot z_1 + C_{x1}$$

- 5 La distancia media entre el pivote puntos R_0 y R_1 puede ser calculada con la ecuación siguiente y puede ser almacenada como el punto de pivote del instrumento.

$$R_{ave} = ((x_1 + x_0) / 2, (y_1 + y_0) / 2, (z_1 + z_0) / 2)$$

[0155] La ubicación del punto de pivote se puede actualizar regularmente continuamente con los cálculos anteriormente descritos.

- 10 [0156] Refiriéndonos ahora a las figuras 14A, 14B, y 15, otro esquema del sistema de control 400 ilustra cómo puede utilizarse un movimiento del controlador o manipulador maestro para calcular un movimiento correspondiente de un instrumento quirúrgico de manera que el instrumento pivote sobre un punto de pivote utilizando una arquitectura de controlador alternativo. De conformidad con el sistema de control mostrado en la figura 15, el procesador calcula las señales de salida para los manipuladores de modo que los instrumentos se mueven en conjunto y de forma coordinada con los movimientos de la palanca de entrada principal. Muchos de los aspectos del sistema de control 400 se describen más completamente en la Patente de americana N ° 6.699.177. En el sistema de control 400 ilustrado en la figura 15, la localización de un punto de pivote en el cual se inserta un instrumento en un sitio quirúrgico interno puede calcularse mediante un módulo de cálculo de punto de pivote 404 a partir de los movimientos del instrumento. Los distintos módulos mostrados en las figuras 15 y 16 pueden de nuevo comprender hardware, software, firmware, una combinación de hardware y software, o similares. Los módulos generalmente comprenden hardware de procesamiento de datos configurado para realizar los cálculos descritos en este documento empleando software, y los cálculos de múltiples módulos pueden ser integrados juntos en un programa o módulo común, y / o el cálculo de un solo módulo puede separarse en múltiples programas o subprogramas que se ejecutan en tarjetas de procesador por separado.

- 25 [0157] En resumen, las descripciones anteriores permiten determinar / estimar el punto de pivote (centro), mediante software. Al tener la capacidad para calcular los puntos de pivote de software, pueden implementarse de forma selectiva diferentes modos que se caracterizan por el cumplimiento o rigidez del sistema. Más particularmente, los diferentes modos de sistema en un intervalo de puntos o centros de pivote (es decir, desde un punto de pivote pasivo a uno que tiene un punto de pivote fijo / rígido) se pueden aplicar después haberse calculado un punto de pivote estimado. Por ejemplo, en una aplicación de pivote fijo, el punto de pivote estimado puede ser comparado con un punto de pivote deseado para generar una salida de error que se puede utilizar para llevar el pivote del instrumento a la ubicación deseada. A la inversa, en una aplicación de pivote pasiva, aunque la ubicación de pivote deseada no puede ser un objetivo primordial, puede utilizarse un punto de pivote estimado para la detección de errores y en consecuencia para la seguridad porque los cambios en ubicaciones de punto de pivote estimados puede indicar que el paciente se ha movido o que un sensor no funciona correctamente dando al sistema una oportunidad para tomar medidas correctivas.

- 40 [0158] La interacción entre el instrumento en movimiento y el tejido de la abertura mínimamente invasiva puede ser determinada al menos en parte por el procesador, permitiendo al procesador opcionalmente cambiar el cumplimiento o la rigidez del sistema a través de una gama que se extiende desde un punto de pivote pasivo a un punto de pivote fijo. En el extremo pasivo de la gama pasiva / rígida, el extremo proximal del instrumento puede ser movido en el espacio, mientras los motores de la articulación de la muñeca del instrumento aplican un poco o ningún par, de modo que el instrumento actúa eficazmente como si estuviera acoplado al manipulador o brazo robótico por un par de articulaciones pasivas. En este modo, la interacción entre el eje del instrumento y el tejido a lo largo de la abertura mínimamente invasiva induce el movimiento pivotante del instrumento sobre el punto de pivote PP. Si el instrumento quirúrgico no fue insertado en la abertura mínimamente invasiva o de otro modo restringido, puede apuntar hacia abajo bajo la influencia de la gravedad, y el movimiento del brazo manipulador trasladaría el instrumento de soporte sin movimiento giratorio alrededor de un sitio a lo largo del eje del instrumento. Hacia el extremo rígido de la gama pasiva / rígida, la ubicación de la abertura mínimamente invasiva puede ser entrada o calculada como un punto fijo en el espacio. Los motores asociados con cada articulación de la cadena cinemática dispuesta proximal al punto de pivote puede a continuación accionar el manipulador de manera que cualquier fuerza lateral lateralmente contra el eje en el punto de pivote calculado resulte en una fuerza de reacción para mantener el eje a través del punto de pivote. Este sistema puede, en cierto modo, comportarse de forma similar a enlaces

centrales remotamente restringidos mecánicamente. Muchas formas de realización se encuentran entre estos dos extremos, proporcionando movimiento calculado que por lo general pivotan sobre el lugar de acceso, y que se adapta o mueve el centro de pivotamiento del movimiento dentro de un rango aceptable cuando el tejido se mueve a lo largo del sitio de acceso mínimamente invasivo, sin imponer fuerzas laterales excesivas en ese tejido.

5 **[0159]** Se debe entender que muchos de los cálculos descritos en este documento con respecto a la arquitectura de controlador de la figura 14 pueden, al menos en parte, ser intercambiables con los cálculos del controlador descritos anteriormente con respecto a las arquitecturas de control alternativos. Por ejemplo, un controlador de conjunto de manipulador con software de centrado tal como el ilustrado en la figura 12 puede salir del centro de software más bien blando o ligeramente mantenido de manera que las fuerzas de tejido aplicadas por la interacción con el
10 paciente permiten dominar las órdenes enviadas a los motores del manipulador. Se puede permitir esta saturación calculada de los pares de accionamiento del manipulador controlando al mismo tiempo la posición del efector de extremo con tolerancias muy estrechas, ya que todos los movimientos del conjunto de manipulador puede determinarse a partir de los sensores del manipulador. Se pueden aplicar varios mecanismos para aumentar gradualmente la rigidez del control del centro por software, incluyendo las soluciones de aumento ponderadas discutidas anteriormente. Al comenzar con un valor de ponderación pequeño para el centro controlado remotamente, y aumentando gradualmente las ponderaciones para estar a la par con los pesos efector de extremo, se podría (por ejemplo) controlar la rigidez gradualmente sobre la ubicación del centro de pivote.

20 **[0160]** La pared del cuerpo y cualquier otra fuerza exógena aplicada al conjunto de manipulador pueden afectar al movimiento del pivote central, si el centro de pivote se mantiene suavemente por el controlador. Se pueden aplicar los cálculos descritos anteriormente para determinar la ubicación del centro controlado remotamente si se permite al instrumento pivotar pasivamente adyacente a la interfaz con el manipulador, por ejemplo. A medida que decrece la varianza de las estimaciones para el centro movimiento de pivotamiento, el factor de ponderación o ganancia puede aumentar. El seguimiento de los cambios de la ubicación del centro de pivote puede permitir la identificación y la compensación de los movimientos cíclicos fisiológicos tales como la respiración del paciente, el latido del corazón, o similares. En algunas realizaciones, unos cálculos similares permitirán al controlador compensar el movimiento del paciente, tales como mediante la reorientación de una mesa quirúrgica, reposicionando un paciente en la mesa quirúrgica, o similar.

30 **[0161]** Para proporcionar un movimiento pivotante calculado de un instrumento en el espacio, independientemente de si se inserta o no el instrumento a través de una abertura mínimamente invasiva, los sistemas descritos en este documento pueden incluir opcionalmente un módulo de control de manipulador modificado 406 de controlador 400 que tiene un módulo de cálculo de órdenes de articulación de centrado por software 410 tal como se ilustra en la figura. 16. El módulo de centrado por software 410 del procesador 210 recibe una orden de entrada correspondiente a un movimiento deseado de efector de extremo, típicamente en forma de señal generada en respuesta a un movimiento de mango de entrada maestra. El módulo de centrado por software 410 calcula el movimiento o vector deseado correspondiente del efector de extremo con el módulo de cálculo 412, usando opcionalmente transformaciones de coordenadas del sistema, tales como los descritos en las patentes N° 6.424.885 y / o 6.699.177. El movimiento del efector de extremo deseado se transmite a un resolvidor de cinemática inversa 414. El movimiento deseado del efector de extremo también es utilizado por un localizador de centro remoto 416 con el fin de generar un centro resuelto sobre el cual el instrumento girará.

40 **[0162]** Junto con el movimiento del efector de extremo deseado, el localizador de centro remoto 416 hace uso de la información real de movimiento de la articulación del manipulador esclavo 418. La información del manipulador 418 puede comprender movimientos de articulación reales a partir de movimientos anteriores del efector de extremo. Los datos pueden originarse en la forma de posiciones de cada una de las articulaciones individuales a partir de potenciómetros o similares, los pasos discretos de las articulaciones individuales a partir de *encoders* o similares, o una amplia variedad de indicadores de movimiento alternativos. Opcionalmente, también se pueden proporcionar los pares de articulación tal como son detectados en las articulaciones del manipulador, y tanto las posiciones como las velocidades de las articulaciones pueden ser transmitidas a un módulo de cinemática hacia adelante 420. El módulo cinemático hacia adelante 420 puede calcular una ubicación de centro de pivote de abertura mínimamente invasiva del manipulador esclavo durante los movimientos anteriores del instrumento.

50 **[0163]** Junto con el movimiento alrededor de un punto de pivote, el módulo de centrado por software 410 también puede determinar las fuerzas asociadas con el pivotamiento alrededor de la abertura mínimamente invasiva, las propiedades del tracto de tejido (por ejemplo, las fuerzas elásticas laterales o de pivote aplicadas por el tracto de tejido al instrumento durante el movimiento del eje del instrumento y / o cualquier movimiento lateral de la anatomía del paciente adyacente a la abertura) y similares. Incluso se pueden determinar las propiedades del pivote central observadas. Por ejemplo, el módulo de centrado por software 410 puede determinar los movimientos cíclicos del pivote central observados debidos a una actividad fisiológica tal como la respiración o el latido del corazón. También se puede identificar el desplazamiento del centro de pivote con el cambio de los ángulos pivotaes u orientaciones. Por ejemplo, el acceso intercostal a la cavidad torácica puede resultar en un primer centro de pivote cuando un
55

- instrumento insertado entre las costillas se pivota en general a través de la orientación de la costilla, y un pivote central ligeramente diferente cuando el instrumento forma un ángulo a lo largo de las longitudes de las costillas adyacentes. La rigidez del tejido también puede variar a lo largo del tracto de tejido y / o a distancias diferentes desde el tracto de tejido, de modo que el pivoteamiento de un eje insertado a través de una abertura mínimamente invasiva en un ángulo relativamente pequeño puede resultar en un pivote central que está dispuesto en un primer punto a lo largo de un tracto tejido que se extiende a través de la pared abdominal, mientras que aumentar el ángulo del eje insertado a través del mismo tracto puede desplazar el pivote central axialmente a lo largo del tracto de tejido ya sea de forma proximal o distal.
- [0164]** La información observada del pivote central a partir del módulo de cinemática futura 420 (junto con cualquier fuerza asociada) puede combinarse con el movimiento ordenado del efector de extremo a partir del módulo de efector de extremo deseado 412 a fin de generar un centro resuelto o deseado del movimiento deseado. El centro de pivoteamiento observado y el movimiento de punta ordenado pueden combinarse con un filtro adaptativo, y la entrada al resolvidor de cinemática inversa a partir de la combinación del centro de pivoteamiento observado y el movimiento ordenado del efector de extremo pueden un movimiento de centro remoto 422.
- [0165]** En general, los enlaces de manipulador que no son fácilmente accionados hacia atrás tenderán a mantener una localización de centro remoto en una posición calculada. Suponiendo que el sistema de accionamiento del enlace no está dominado, el centro remoto observado permanecerá dentro de una estrecha proximidad a la ubicación central remota deseada o calculada, con la diferencia entre el centro observado y el centro deseado generalmente en un error de servo relativamente pequeño del manipulador. Sin embargo, el sistema puede determinar que el centro remoto deba ser eliminado para aliviar las fuerzas y / o pares aplicados a la estructura de manipulador. Por ejemplo, las fuerzas o pares de torsión pueden ser aplicados a y medidos en la cánula, por ejemplo, mediante las fuerzas reactivas del tejido contra la cánula, por el movimiento fisiológico del paciente durante la respiración o reposicionamiento del paciente, o similares. En algunas realizaciones, un operador puede empujar manualmente el brazo para mover el centro de control remoto a una nueva ubicación, opcionalmente antes, durante o después de transmitir una señal de reposicionamiento de pivote central al procesador, tal como pulsando un botón de embrague de orificio. Como se describió anteriormente, se puede utilizar un gran número de procedimientos de cálculo para elegir un nuevo centro remoto basado en los datos proporcionados por dicho movimiento manual del enlace de manipulador. La salida de estos cálculos pueden denominarse como centro resuelto o centro deseado, y representa generalmente una entrada de un usuario del sistema al procesador, opcionalmente mediante la liberación de la entrada del embrague de orificio cuando la estructura apropiada a lo largo de la cadena cinemática del conjunto manipulador (tal como una cánula) está dispuesta en el lugar de acceso al sitio deseado.
- [0166]** En brazos accionados hacia atrás con mayor facilidad, un centro resuelto o deseado puede ser simplemente una versión filtrada de un centro observado. Estos enlaces accionables hacia atrás tienden ellos mismos de manera más directa a la observación de los movimientos reales del centro remoto y a ajustar el control de manera adecuada. Como los enlaces de manipulador más fuertes o menos accionables hacia atrás tenderán a exhibir poco movimiento del centro observado, emplear un sensor de par o de fuerza para medir las fuerzas de perturbación que actúan sobre el brazo en el pivote central (tal como un sensor de fuerza de cánula) puede facilitar este movimiento de localización del pivote, en lugar de confiar únicamente en las medidas de par o de posición de las articulaciones.
- [0167]** Tal como se describió anteriormente, el eje del instrumento entre el efector de extremo y el alojamiento de instrumento proximal se extenderán típicamente a través de la abertura mínimamente invasiva. El movimiento de esta parte intermedia del instrumento se calcula de manera que el instrumento no imponga lesiones al paciente, sino que permanezca dentro de la zona de acceso mínimamente invasiva. Junto con el movimiento pivotante del eje del instrumento, el instrumento puede girar alrededor de su eje, y el eje puede ser insertado distalmente o retirado proximalmente a lo largo del eje.
- [0168]** Para permitir al resolvidor de cinemática inversa 414 calcular los movimientos de articulación para efectuar el movimiento de efector de extremo ordenado mientras se mantiene el instrumento dentro del sitio de abertura mínimamente invasiva, el vector de velocidades cartesianas y velocidades angulares ordenado de la punta del efector de extremo puede ser proporcionada por el calculador de vector esclavo 414, comprendiendo el ejemplo de vector de efector de extremo un vector de 1×6 , siendo la actuación de agarre sobre el efector de extremo generalmente se maneja por separado de los cálculos de cinemática inversa. La entrada del movimiento deseado de centro remoto 422 en el resolvidor de cinemática inversa puede comprender un vector de velocidades cartesianas del pivote central, tales como un vector 1×3 . Se pueden ajustar algoritmos que calculan el movimiento del pivote central (por ejemplo, basado en la medición de fuerzas en el pivote central de una alta impedancia o brazo rígidamente accionado) o la ubicación efectiva de un pivote central (basado en movimientos de pivoteamiento observados utilizando una baja impedancia o más un brazo pivotante pasivamente) utilizando estas entradas vector. Por lo tanto, se puede utilizar el resolvidor de cinemática inversa 414 para estructuras de manipulador que son una combinación de un centro de rotación compatible o pasivo y un centro de rotación calculado más rígidamente.

5 [0169] Tal como se señaló anteriormente, los enlaces de manipulador / instrumento tienen generalmente un mayor número de grados de libertad que el efector de extremo tiene en el espacio de trabajo quirúrgico. No obstante, el resolvidor de cinemática inversa 414, puede hacer uso de esquemas de controlador similares a los de los sistemas mecánicos más restringidos, tales como los descritos en la Patente americana 6.493.608. Más específicamente, el uso de cinemáticas inversas modificadas con una realimentación ajustada para corregir la deriva de integrador puede tener algunos beneficios para el calculador de movimiento de la articulación 410 de la figura 16. Sin embargo, se pueden emplear ciertas modificaciones al resolvidor de cinemática inversa 414 para adaptar el calculador de articulación para su uso con un mayor número de grados de libertad y / o para el uso de un centro remoto calculado.

10 [0170] Algunos ejemplos de cálculos realizados con resolvidor de cinemática inversa 414 se ilustran con más detalle en la figura 17. Usando el movimiento del efector de extremo deseado y el movimiento de pivote central deseado, el resolvidor de cinemática inversa 414 determina en primer lugar las velocidades del instrumento. En el ejemplo de realización las velocidades incluirán un vector de las velocidades deseadas cartesianas del efector de extremo, las velocidades angulares deseadas del efector de extremo, y las velocidades cartesianas del pivote central, generalmente en la forma de un vector $V \in \mathbb{R}^{1 \times 9}$. a partir de este vector, el vector de velocidades de articulación que hará que la punta del efector de extremo y el eje del instrumento intermedio adyacente a la apertura alcancen las velocidades cartesianas y angulares deseadas, \dot{q}_{base} pueden calcularse tal como sigue:

$$\dot{q}_{base} = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T)^{-1} V$$

Donde W es una matriz de ponderación y J es la matriz jacobiana. Para el ejemplo de cadena cinemática ilustrada en la figura 6, la matriz jacobiana es una matriz 9×10 .

20 [0171] Los ejemplos de brazos también comprenden generalmente más grados de libertad que la combinación de los grados de libertad del efector de extremo en el espacio (generalmente 6) y la restricción de mantener el eje del instrumento en la abertura (3), de manera que están subrestringidos para las del tareas del efector de extremo y del eje pivotante. Por lo tanto, estos sistemas de enlaces pueden tener más de 10 grados de libertad, y sus cadenas cinemáticas definir generalmente un espacio nulo o gama de configuraciones alternativas y / o velocidades de articulaciones que la cadena cinemática puede tener para una posición determinada del efector de extremo. Un vector proyector P en el espacio nulo de la matriz jacobiana se puede calcular de la siguiente manera:

$$P = (I - J_{rpi} * J)$$

donde I es la matriz de identidad y J_{rpi} es la pseudo inversa correcta de la matriz jacobiana.

30 [0172] Se puede calcular un conjunto deseado de velocidades de articulaciones auxiliares \dot{q}_{aux} que minimizan una o más funciones de coste y, teniendo generalmente la función de coste una configuración que acciona el manipulador lejos de las limitaciones de rangos de movimiento de articulaciones, lejos de las singularidades, libres de obstáculos, y similares. Estas velocidades de articulación auxiliares pueden ser proyectadas en el espacio nulo de la matriz jacobiana. El vector de velocidad final puede ser entonces calculado mediante la adición de los vectores de base y auxiliares de las velocidades de articulación tal como sigue:

35
$$\dot{q} = \dot{q}_{base} + P * \dot{q}_{aux}$$

40 [0173] Haciendo referencia nuevamente a la figura 9, el resolvidor de cinemática 414 puede calcular los movimientos de articulación basados al menos en parte en la información relativa a los movimientos de otros manipuladores. En el ejemplo de realización, un módulo optimizador de pose 430 recibe los datos reales de movimiento de la articulación del manipulador, y también recibe información real de movimiento de articulaciones de otros manipuladores. A partir de los movimientos de los manipuladores, el optimizador calcula restricciones cinemáticas inversas adicionales que deben ser introducidas en el resolvidor de cinemática inversa 414. El optimizador de pose puede llevar de nuevo la configuración de articulación de la cadena cinemática utilizando una función objetivo, tales como para mejorar la separación entre manipuladores adyacentes mientras se efectúa el movimiento ordenado del efector de extremo, y manteniendo al mismo tiempo una parte intermedia del instrumento dentro del sitio de apertura mínimamente invasiva. De este modo el optimizador de pose 430 aprovecha los grados de libertad en exceso del enlace cinemático (más allá de los del efector de extremo en el sitio quirúrgico), tal como puede entenderse con referencia a las figuras 5A y 5B.

50 [0174] En la figura 5A, el manipulador 304 sostiene el instrumento 306 en un lugar determinado en el espacio. Una articulación intermedia J_4 del manipulador está configurada de manera que los ejes de los enlaces acoplados entre sí en la articulación J_4 define generalmente un vértice orientado hacia abajo 350. Como el manipulador 304 está

montado de forma pivotante en la base de una primera articulación pivotante 322, está montado pivotante en un soporte de instrumento 320 en una muñeca de instrumento 332, e incluye una articulación de rodillo y dos articulaciones pivotantes entre sí, el brazo de manipulador puede ser accionado a partir de esta configuración de vértice hacia abajo a una configuración de vértice orientado hacia arriba ilustrada en la figura 5B, con el vértice orientado hacia arriba indicado por el número de referencia 352. Hay que destacar que el efector de extremo (y de hecho, todo el instrumento) puede estar en la misma ubicación en el espacio con relación a la base de soporte del manipulador cuando el manipulador está en cualquiera de estas dos configuraciones, y mientras el manipulador se mueve entre estas dos configuraciones.

[0175] Con el fin de mantener un control preciso sobre los instrumentos quirúrgicos y evitar el desgaste o daños en el sistema, será ventajoso generalmente configurar manipuladores adyacentes de tal manera que se inhiban las colisiones entre los manipuladores. Por ejemplo, cuando dos manipuladores están soportados por una o más bases de tal manera que los brazos manipuladores son adyacentes entre sí, y cuando los instrumentos quirúrgicos soportados por los manipuladores se insertan a través de aberturas mínimamente invasivas adyacentes, tener los manipuladores en configuraciones similares puede conducir a configuraciones con manipuladores que se mueven uno hacia el otro. Si al contrario se tienen manipuladores adyacentes alternados entre una configuración de vértice hacia abajo orientada tal como se ilustra en la figura 5A y una configuración de vértice orientado hacia arriba tal como se ilustra en la figura 5B, la configuración global del sistema de manipulador puede tener menos colisiones o ninguna.

[0176] Haciendo referencia nuevamente a la figura 15, el optimizador de pose 430 y el calculador de articulación 410 pueden ser implementados en diferentes realizaciones para un sistema de manipulador múltiple. Por ejemplo, se pueden realizar un cálculo de articulación y de optimización de pose individualmente para cada movimiento de manipulador. Los cálculos se realizarán iterativamente para cada manipulador, y los cálculos de articulación podrán ser realizados por un solo programa que se ejecuta en una placa de procesador única, por programas separados que se ejecutan en placas de procesador dedicadas, o similares. Independientemente, al menos algunos de los programas de optimización de pose podrán ejecutar una rutina de optimización de pose específicamente para un manipulador único. Alternativamente, un único optimizador de pose global puede tomar datos de movimiento esclavo observados de una pluralidad de manipuladores, opcionalmente, de todos los manipuladores del sistema de manipulador. A partir de esta información, se puede calcular una solución globalmente optimizada para la pose de manipulador. Entonces esta solución globalmente optimizada se puede utilizar como una entrada para el resolvidor de cinemática inversa 414 para cada uno de los manipuladores. También son posibles otras alternativas, incluyendo el uso de un resolvidor de cinemática inversa para determinar simultáneamente movimientos de articulación reales de todas las articulaciones a lo largo de los brazos del manipulador.

[0177] Con referencia ahora a la figura 18A, para la utilidad de un conjunto de manipulador en un sistema de manipulador quirúrgico múltiple (véase la figura 1B, por ejemplo) cada conjunto de manipulador debe ser compacto y altamente diestro. El tamaño compacto permite a múltiples brazos compartir un espacio limitado disponible en una vecindad de un paciente y reducir al mínimo las colisiones entre conjuntos de manipulador durante un procedimiento quirúrgico. Su tamaño compacto también reduce las especificaciones de par y la potencia de los motores y actuadores, y ayuda a hacer el sistema más seguro para el personal quirúrgico y el paciente. Las estructuras compactas de conjunto de manipulador también tienden a tener un peso más ligero, lo cual reduce el tamaño del soporte de manipulador y el ajuste del sistema, y puede hacer que un proceso de configuración manual sea más fácil para un equipo quirúrgico. Una alta destreza permite generalmente que el efector de extremo quirúrgico sea localizado, orientado, y trasladado dentro del cuerpo del paciente de la manera más ventajosa clínicamente.

[0178] La estructura cinemática de un conjunto de manipulador puede afectar a la compacidad y la destreza en un grado significativo. La figura 18A ilustra un ejemplo de estructura cinemática que proporciona una compacidad y destreza altas. Estos beneficios se logran mediante la consideración de una variedad de relaciones y restricciones cinemáticas, incluyendo el equilibrado de longitudes de segmento principales, la reducción de ajustes cinemáticos laterales, y proporcionando al menos una distancia mínima de movimiento de las articulaciones seleccionadas. Estos tres criterios se describirán con más detalle en el párrafo siguiente.

[0179] En cuanto al segmentado de longitudes de porción del conjunto de manipulador, y con referencia a las figuras 18A, 4A-4C, 5A y 5B, y 6, el ejemplo de conjunto de manipulador 304 incluye una cadena cinemática de enlaces y articulaciones que definen dos porciones de brazo. Una primera porción de brazo se extiende entre la articulación pivotante J2 y la articulación pivotante J4 y tiene una longitud L1. Una segunda porción de brazo se extiende entre la articulación pivotante J4 y la articulación pivotante J6 y tiene una longitud L2. Las longitudes L1 y L2 de estas porciones de brazo primera y segunda 602, 604 se extienden cada una a lo largo de un eje asociado de la porción de brazo asociada, y hay una articulación de rodillo a lo largo de cada porción de brazo (véanse las articulaciones j3 y j5 en la figura 6).

[0180] El volumen de trabajo útil del conjunto de manipulador 304 se mejora generalmente manteniendo las longitudes L1 y L2 dentro de aproximadamente 20% de una con respecto a la otra. Si estas longitudes difieren

significativamente en más de esta cantidad, los agujeros volumétricos o áreas inaccesibles en el volumen de trabajo pueden llegar a ser problemáticos. El equilibrado de las longitudes L1 y L2 también contribuye a equilibrar el rango angular del movimiento para el accionamiento de las articulaciones J2 y J4. Como el diseño mecánico de las articulaciones se vuelve significativamente más complejo cuando el rango de movimiento aumenta excesivamente, es generalmente beneficioso evitar diseños que implican rangos muy grandes de movimientos sobre estas articulaciones pivotantes.

[0181] Con referencia ahora a desplazamientos cinemáticos laterales, y con referencia aquí a las figuras.18B, 18C, y 18D, el diseño cinemático, estructural y mecánico de manipulador 304 tal como se ve en estas vistas superiores presenta un perfil delgado con una anchura limitada, medida a partir de un plano central PL. En el ejemplo de realización ejemplar una anchura distal Wd es menor que una anchura proximal WP. Aunque el conjunto de manipulador 304 se moverá desde la configuración plana durante la operación robótica, generalmente será ventajoso accionar los enlaces con la finalidad de mantener un perfil sustancialmente plano a lo largo del plano PL, y / o minimizar que el brazo sobresalga desde plano central en una dirección de un conjunto de manipulador adyacente. Tal limitación de los desplazamientos cinemáticos laterales en el diseño del brazo y / o de la lógica de control de accionamiento puede evitar protuberancias mecánicas o golpes que puedan chocar con otros conjuntos de manipulador, el ajuste y la estructura de soporte del manipulador, el paciente, el personal quirúrgico, y similares. La reducción de los ajustes desde el plano PL también puede ayudar a evitar los agujeros o espacios inaccesibles en el volumen de trabajo del brazo. El accionamiento del manipulador para evitar desplazamientos laterales innecesarios desde una configuración plana se puede lograr con las soluciones aumentada y de proyector descritas anteriormente, con esta restricción o tarea siendo generalmente de menor prioridad que el seguimiento, pivotamiento sobre la cánula del efector de extremo y similares.

[0182] En el ejemplo de realización ilustrado en la figura 18B (y refiriéndose a las articulaciones y sus ejes asociados ilustrados en la figura 6), cuando el brazo está en una pose neutra, el eje de pivotamiento de la articulación 1, el eje de pivotamiento de la articulación 3, el eje de pivotamiento de la articulación 5, y el eje lineal de la articulación 7, se encuentran todos lo largo del plano PL. Esta condición cambia a medida que se mueve el brazo, pero en el ejemplo de realización, los ejes de las articulaciones J3 y J5 permanecen coplanares. En otras palabras, los desplazamientos en la cadena cinemática a lo largo de estas articulaciones debe ser idealmente cero por diseño.

[0183] Tal como se ilustra en las figuras 18C y 18D, el uso de los brazos adyacentes 304a y 304b que están diseñados para su uso a lo largo de un plano asociado PL 1 y PL2, cuando es accionado por controladores tienen un objetivo de mantener una configuración plana de cada brazo en planos que están lateralmente y / o angularmente desplazados, puede inhibir las colisiones entre estos brazos adyacentes. Tal como se señaló anteriormente, también se pueden emplear alternar los brazos adyacentes entre configuraciones de vértice orientado hacia arriba y vértice orientado hacia abajo, tal como se ha descrito anteriormente.

[0184] En cuanto a las distancias mínimas de movimiento para las articulaciones del conjunto de manipulador, el rango de movimiento puede aumentarse proporcionando por lo menos uno de los rangos mínimos de movimiento en la tabla siguiente para la articulación asociada, preferentemente algunos de los rangos de movimientos en esta tabla, e idealmente todos los rangos mínimos de los movimientos ("ROM") en la siguiente tabla:

articulación	Min ROM
1	90°
2	135°
3	180°
4	180°
5	180°
6	90°
7	8 pulgadas (20,3cm)

[0185] Se consigue un beneficio particular en la destreza global del conjunto de manipulador altamente configurable 304 con atención a las articulaciones J3, a veces denominadas rodillo de brazo superior, y J6, que se denomina a veces como la muñeca. En muchos sentidos, la articulación de rodillo de brazo superior J3 puede considerarse como el grado redundante o adicional de libertad del brazo. Sin esta, el conjunto de manipulador de 304 funcionaría con mucha eficacia en el espacio tridimensional. Al proporcionar este grado de libertad adicional, el brazo es capaz de alcanzar un número infinito de poses o configuraciones para una posición determinada del efector de extremo,

incluso mientras el eje del instrumento permanece restringido al movimiento pivotante alrededor de una abertura mínimamente invasiva. Esto puede permitir al brazo evitar obstáculos, evitar colisiones con otros brazos, y similares. Esta flexibilidad también puede utilizarse para optimizar la cinemática del enlace de manipulador para evitar límites de articulación, singularidades, y similares.

5
 [0186] Cuando se usa para los sistemas quirúrgicos robóticos que tienen una pluralidad de conjuntos de manipulador, el enlace de manipulador 304 será idealmente capaz de invertirse desde una configuración de vértice orientado hacia abajo a una de vértice orientado hacia arriba y hacia atrás, tal como se ilustra en las figuras 5A y 5B. Esto puede permitir que los brazos adyacentes se alternen entre estas dos configuraciones en la pose primaria (por ejemplo, pose de partida nominal), dando a cada brazo un mayor espacio de trabajo libre de obstáculos en el cual moverse, por ejemplo. Esta capacidad de invertir el brazo se facilita proporcionando una articulación de rodillo de brazo superior J3 con al menos 180 grados de desplazamiento, preferiblemente con 360 grados o más de desplazamiento.

10
 [0187] Con referencia ahora a las figuras 18E y 18F, la capacidad de invertir el brazo entre las configuraciones de vértice orientado hacia arriba y de vértice orientado hacia abajo también se ve facilitada al proporcionar la articulación de muñeca J6 con un rango de movimiento suficiente para permitir que el eje del instrumento 612 se pueda mover bastante cerca al eje primario distal adyacente 614 del conjunto de manipulador 304, idealmente en ambas direcciones. En otras palabras, el ángulo J6A cuando el efector de extremo del instrumento esté lo más cerca posible del vértice del brazo de manipulador, será preferentemente de 45 grados o menos, mientras que el ángulo J6B será preferentemente de 135 grados o más cuando el efector de extremo se mueva tan lejos como sea posible desde el vértice del brazo 304.

15
 [0188] Con referencia ahora a la figura 18G, puede ser deseable instalar sensores de colisión 622 en uno o más puntos en el conjunto de manipulador 304. Los sensores se dispondrán generalmente sobre las superficies exteriores del conjunto de manipulador. Los sensores pueden comprender sensores de contacto y / o de proximidad, y pueden ser monitorizados en tiempo real o una casi en tiempo real por el controlador. En el caso de contacto de brazo a brazo (o contacto cercano), el sistema de control puede tomar las medidas apropiadas, tales como conducir el manipulador a una pose diferente, generando un fallo suave, generando un fallo duro, o simplemente generando algún tipo de alerta, tal como un pitido audible, una luz de aviso, o similar, para el operador del sistema. En algunas realizaciones, la acción adecuada puede depender de la ubicación del sensor y / u otras características de la señal de detección de colisiones.

20
 [0189] Unos sensores adecuados de colisión pueden emplear interruptores de cinta, como los disponibles comercialmente de Tape Switch Corporation of New York; matrices de sensores flexibles, tales como las desarrolladas por la Universidad de Tokio (incluyendo Takao Someya), y descritas en un artículo titulado " Flexible Sensors Make Robot Skin "en www.trnmag.com del 22 al 29 de septiembre de 2004; resistencias de detección de fuerza individuales o matrices de resistencias de detección disponibles comercialmente de Interlink Electronics, sistemas de detección capacitivos activos o pasivos capaciflectores, tales como los desarrollados por John Vranish de NASA-Goddard, o similares.

25
 [0190] Aunque los ejemplos de realizaciones se han descrito con cierto detalle para mayor claridad de comprensión, y a modo de ejemplo, una variedad de adaptaciones, modificaciones y cambios serán evidentes para los expertos en la técnica. Por lo tanto, el alcance de la presente invención está limitada únicamente por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

- 5 1. A sistema robótico (200, 300) que comprende : un conjunto de manipulador (304) para desplazar robóticamente un efector de extremo distal (50) con respecto a una base proximal (302), el conjunto de manipulador (304) teniendo una pluralidad de articulaciones (J1-J10), las articulaciones (J1-J10) teniendo grados de libertad redundantes para desplazar robóticamente el efector de extremo distal (50) ; un dispositivo de entrada (220) para recibir una indicación de un movimiento deseado del efector de extremo distal (50) ; y un procesador (210) configurado para de forma concurrente en un modo de manipulación del efector de extremo distal (50) en el que el procesador (210) determina un movimiento deseado de las articulaciones (J1-J10) para efectuar el movimiento deseado del efector de extremo (50) y un modo de embrague en el que el procesador (210) determina un movimiento deseado de al menos una de las articulaciones (J1-J10) como respuesta a una articulación manual de otra articulación del conjunto de manipulador (304).
- 10 2. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 1, en el cada articulación (J1-J10) del conjunto de manipulador (304) tiene un grado de libertad de articulación asociado, y en el que el procesador (210) en el modo de embrague está configurado para accionar la al menos una articulación como respuesta a la articulación manual de la otra articulación para proporcionar al conjunto de manipulador (304) un grado de libertad de embrague efectivo, el grado de libertad de embrague difiriendo de cada uno de los grados de libertad de articulación.
- 15 3. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 2, en el que alguna o todas las articulaciones (J1-J10) del conjunto de manipulador (304) están configuradas para ser accionadas por el procesador (210) en el modo de embrague, y el procesador (210) en el modo de embrague está configurado para accionar el conjunto de manipulador (304) como respuesta a una articulación manual de una pluralidad de las articulaciones (J1-J10) del conjunto de manipulador (304) de modo que el conjunto de manipulador (304) tiene una pluralidad de grados de libertad efectivos cuando el procesador (210) está en el modo de embrague.
- 20 4. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 1, en el que el conjunto de manipulador (304) comprende un instrumento quirúrgico (306) que tiene un eje (14.1) que se extiende entre una interfaz de montaje (232) y el efector de extremo (50), en el que el procesador (210) en el modo de manipulación comprende un controlador máster-esclavo (550) configurado para derivar el movimiento deseado del efector de extremo (50) dentro de un espacio quirúrgico interno de modo que el eje (14.1) pasa a través de un lugar de abertura mínimamente invasivo.
- 25 5. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 4, en el que el controlador máster-esclavo (550) comprende a controlador de velocidad (544), y en el que el procesador (210) en el modo de embrague está configurado para usar un filtro dependiente de la configuración (546) para accionar las articulaciones (J1-J10) con las combinaciones deseadas de velocidades de articulación que están permitidas en el modo de embrague.
- 30 6. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 4, en el que el modo de embrague comprende un modo de embrague pose, el procesador (210) en el modo de embrague pose, como respuesta a una articulación manual de al menos una primera articulación del conjunto de manipulador (304), estando configurado para efectuar un movimiento de al menos una segunda articulación del conjunto de manipulador (304), el movimiento de la segunda articulación manteniendo una posición del conjunto de manipulador (304) distal de las articulaciones primera y segunda (J1-J10).
- 35 7. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 4, en el que el modo de embrague comprende un modo de embrague de instrumento, el procesador (210) en el modo de embrague de instrumento estando configurado para accionar al menos alguna de las articulaciones (J1-J10) de modo que el conjunto de manipulador (304) pivota sobre el lugar de abertura mínimamente invasivo cuando el conjunto de manipulador (304) es articulado manualmente.
- 40 8. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 4, en el que el modo de embrague comprende un modo de embrague de orificio, el procesador (210) en el modo de embrague de orificio estando configurado para permitir un reposicionamiento manual del conjunto de manipulador (304) adyacente al eje (14.1) para posicionar lateralmente un eje (14.1) adyacente al lugar de abertura.
- 45 9. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 4, en el que el modo de embrague comprende un modo de embrague de orificio, el procesador (210) estando configurado para determinar un emplazamiento del lugar de abertura al menos en parte desde la configuración del conjunto de manipulador (304) cuando el procesador (210) cambia del modo de embrague de orificio al modo de manipulación del efector de extremo.
- 50 10. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 9, que comprende una entrada de embrague de orificio (516a) adyacente a la interfaz de montaje de instrumento (232).
11. El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 10, en el que el conjunto de manipulador (304) tiene una articulación axial adyacente a la entrada de embrague de orificio (516a) para la inserción axial del eje (14.1) a través del lugar de acceso.

5 **12.** El sistema robótico (200, 300) de la reivindicación 9, en el que el procesador (210) está configurado para accionar el conjunto de manipulador (304) en el modo de embrague de orificio para efectuar al menos uno de entre : equilibrar las fuerzas gravitatorias que actúan sobre el conjunto de manipulador (304) ; amortiguar el momento del conjunto de manipulador (304) durante el movimiento ; o empujar el conjunto de manipulador (304) hacia una pose deseada para cirugía.

10 **13.** Procedimiento robótico implementado en un sistema robótico (200, 300) que tiene un conjunto de manipulador (304) para desplazar robóticamente un efector de extremo distal (50) con respecto a una base proximal (302), teniendo el conjunto de manipulador (304) una pluralidad de articulaciones (J1-J10), teniendo las articulaciones (J1-J10) grados de libertad redundantes para desplazar robóticamente el efector de extremo distal (50), comprendiendo el procedimiento robótico : recibir una indicación de un movimiento deseado del efector de extremo distal (50) ;
15 determinar de forma concurrente el movimiento deseado de las articulaciones (J1-J10) para efectuar el movimiento deseado del efector de extremo (50) y movimiento deseado de al menos una de las articulaciones (J1-J10) como respuesta a una articulación manual de otra articulación (J1-J10) del conjunto de manipulador (304) ; y accionar la pluralidad de articulaciones (J1-J10) para efectuar los movimientos deseados del efector de extremo (50) y la al menos una articulación (J1-J10).

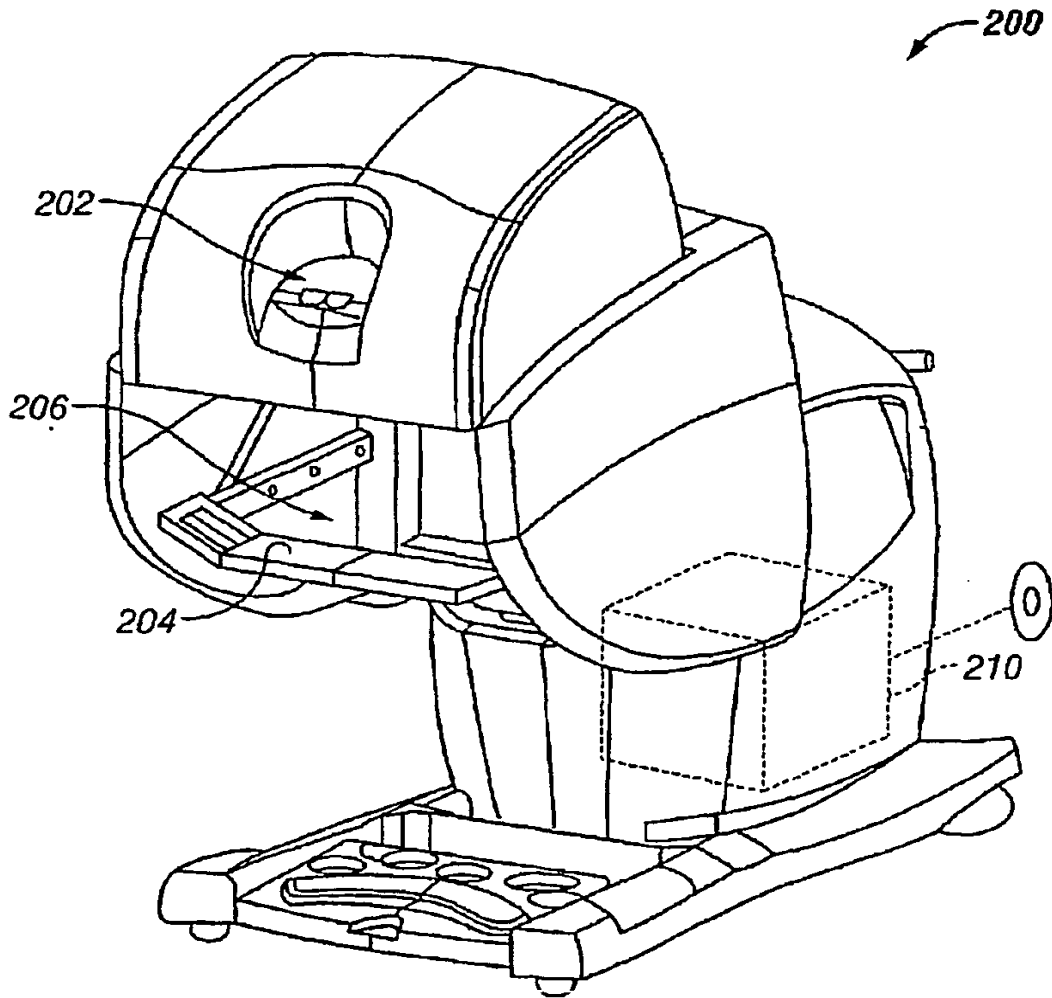


FIG. 1A

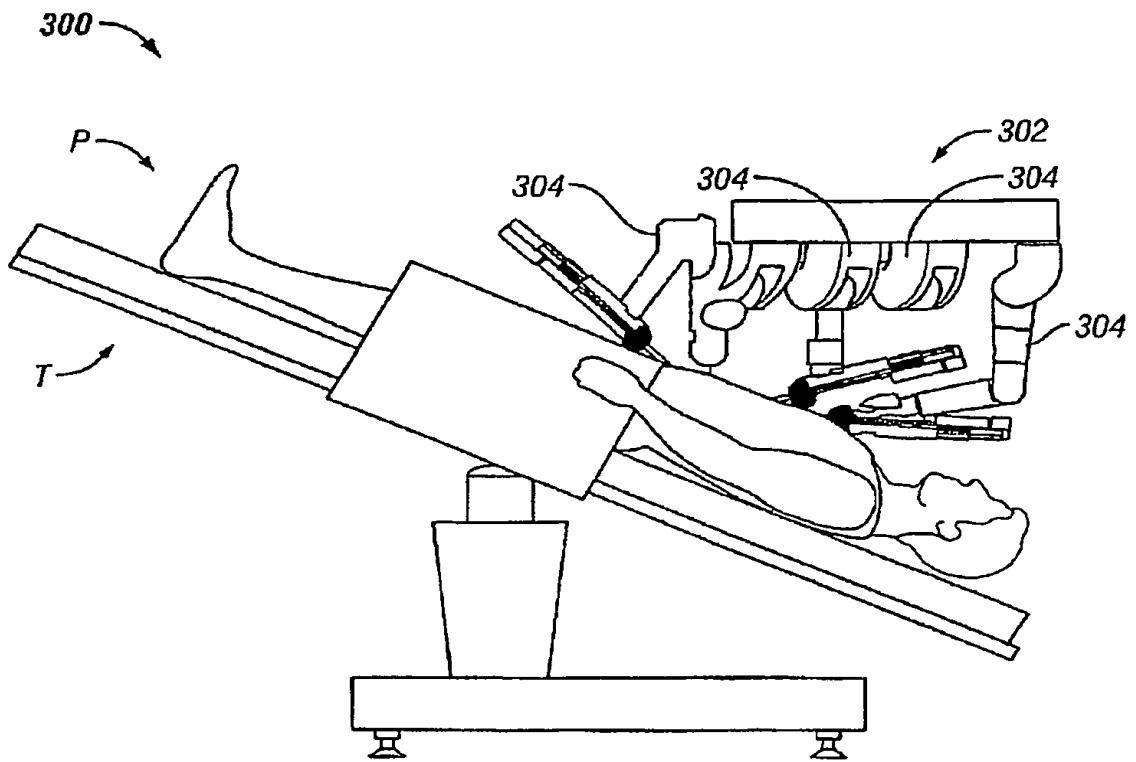


FIG. 1B

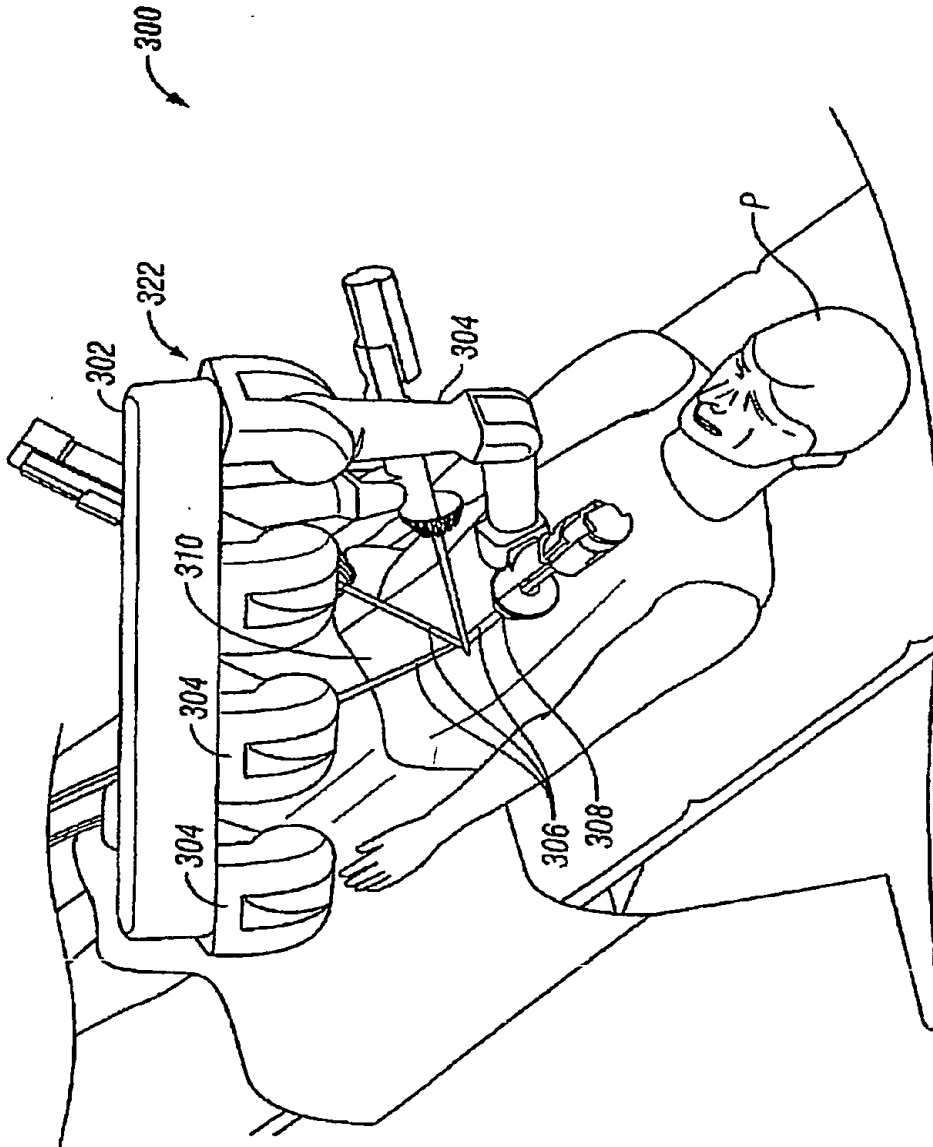


FIG. 1C

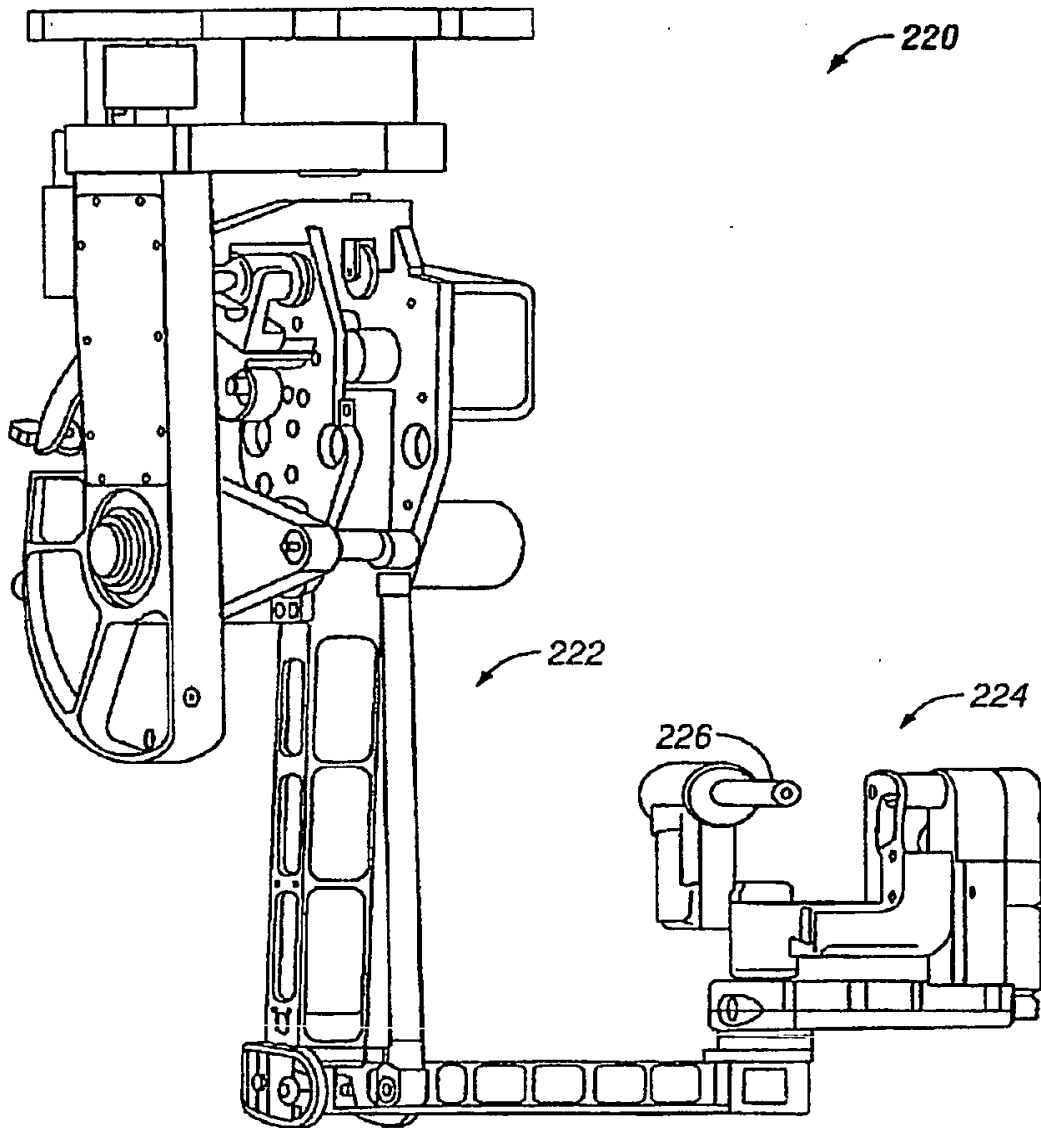


FIG. 2

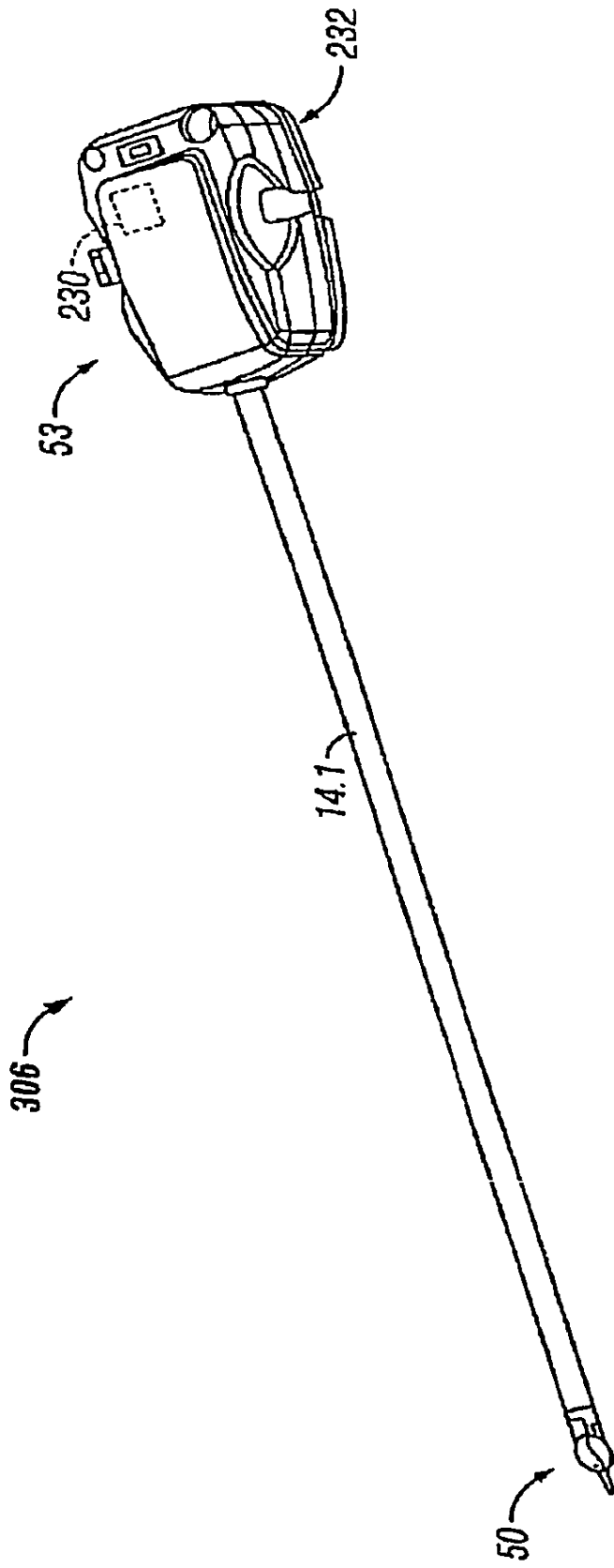


FIG. 3

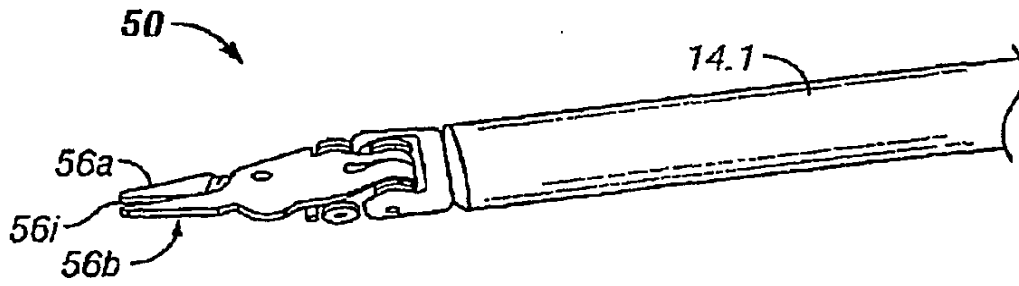


FIG. 3A

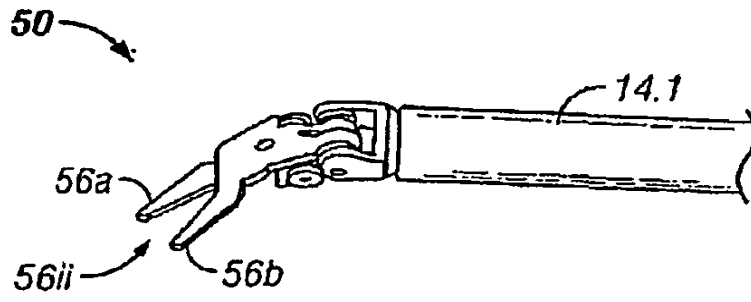


FIG. 3B

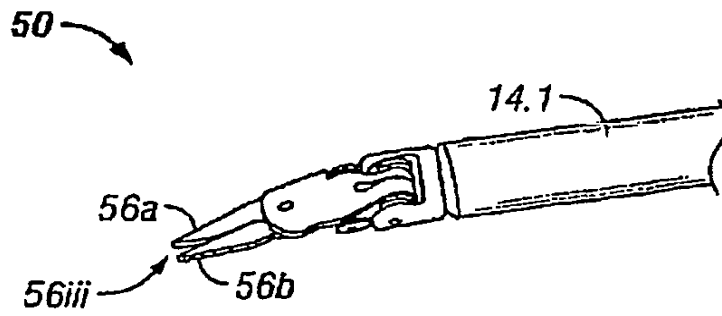


FIG. 3C

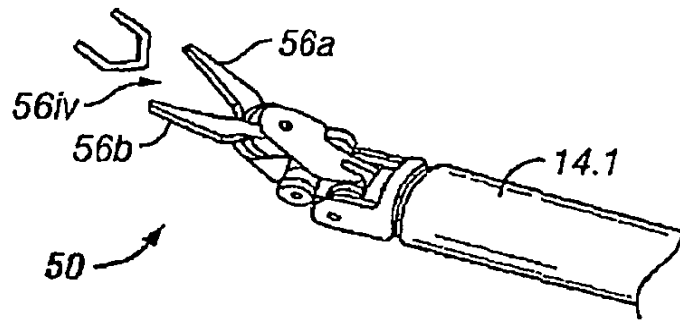


FIG. 3D

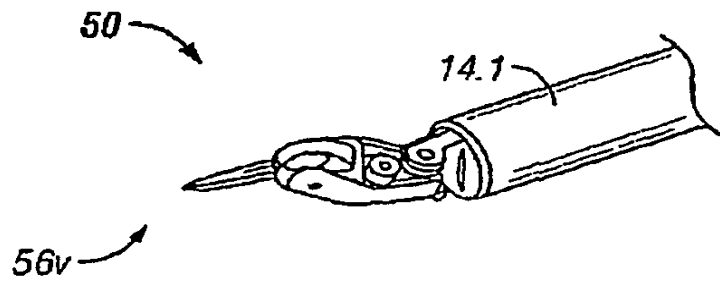


FIG. 3E

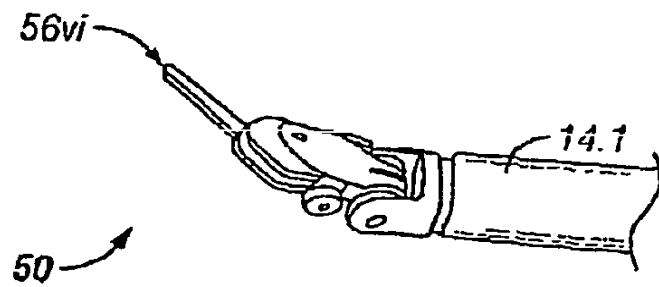


FIG. 3F

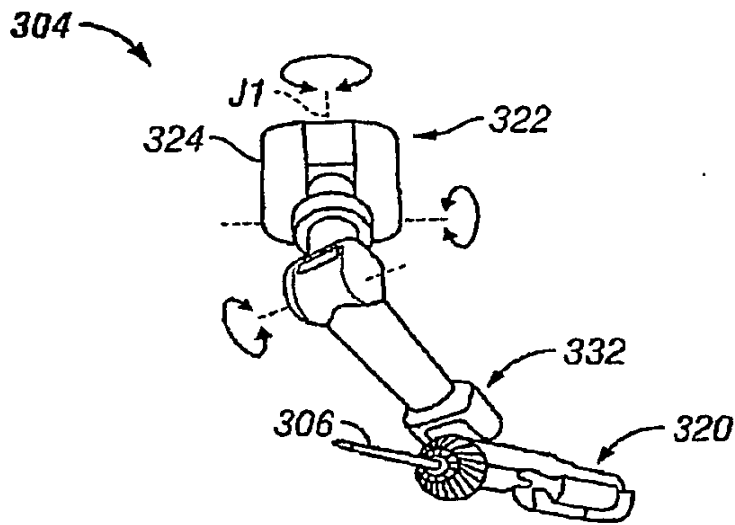


FIG. 4A

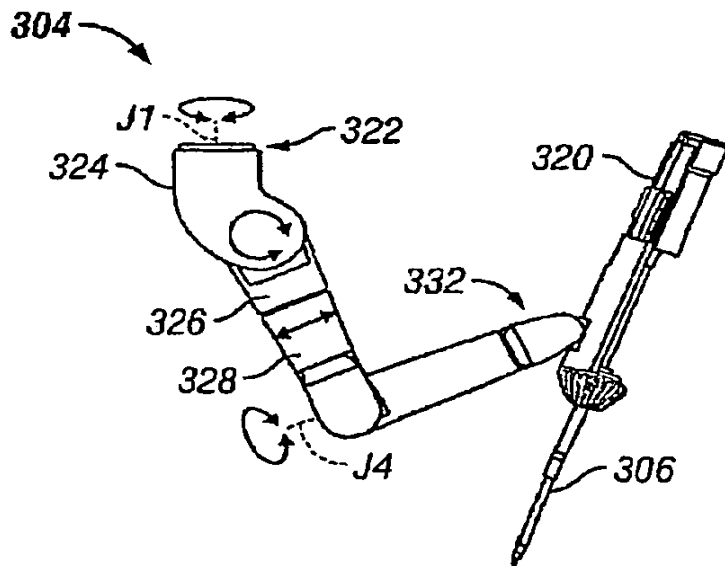


FIG. 4B

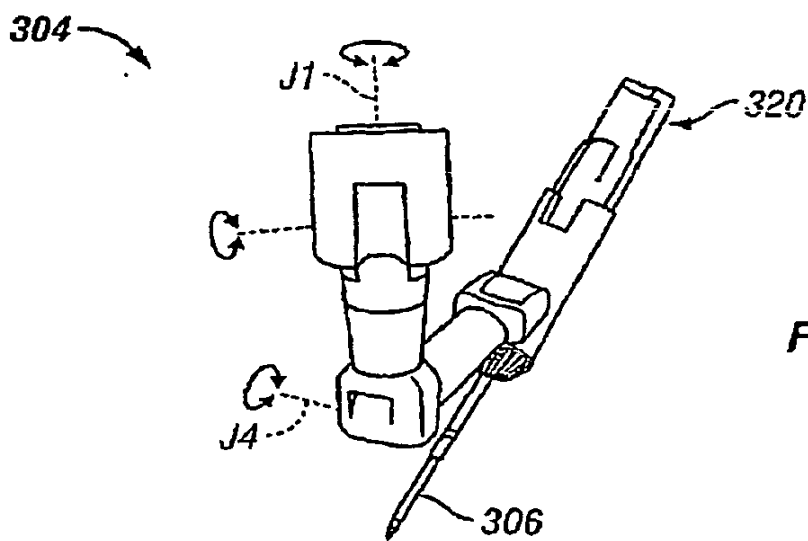


FIG. 4C

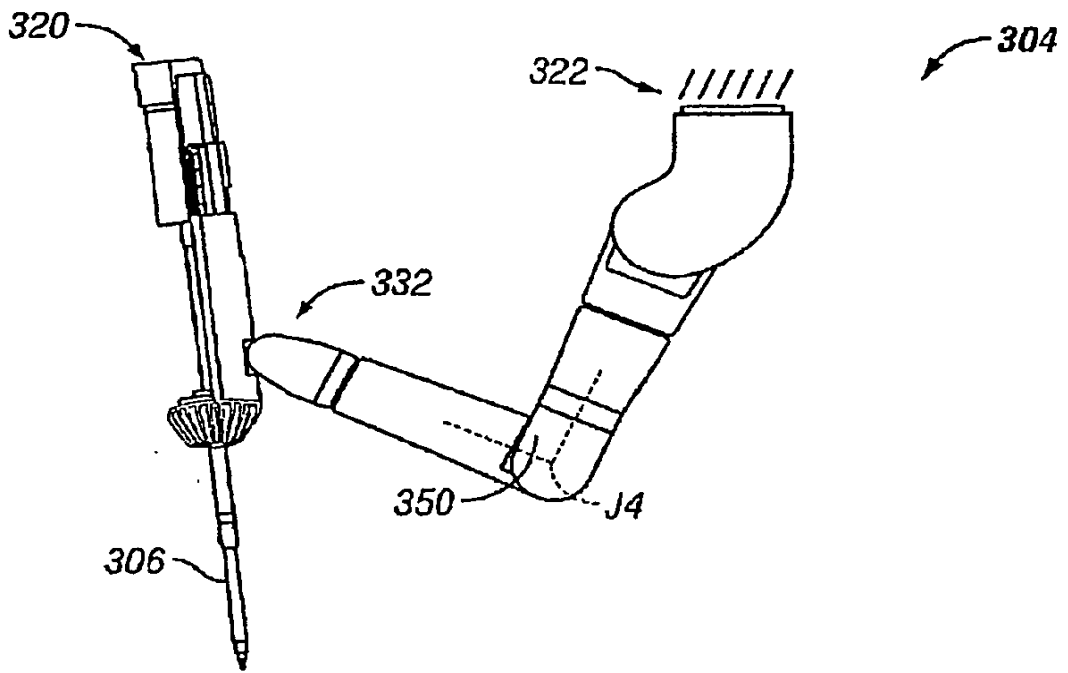


FIG. 5A

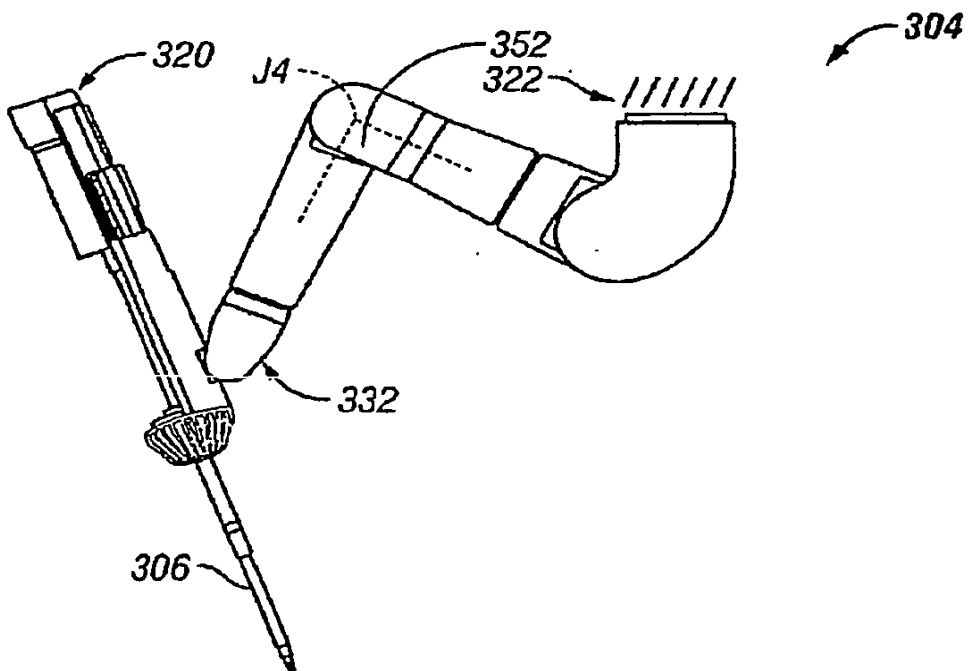


FIG. 5B

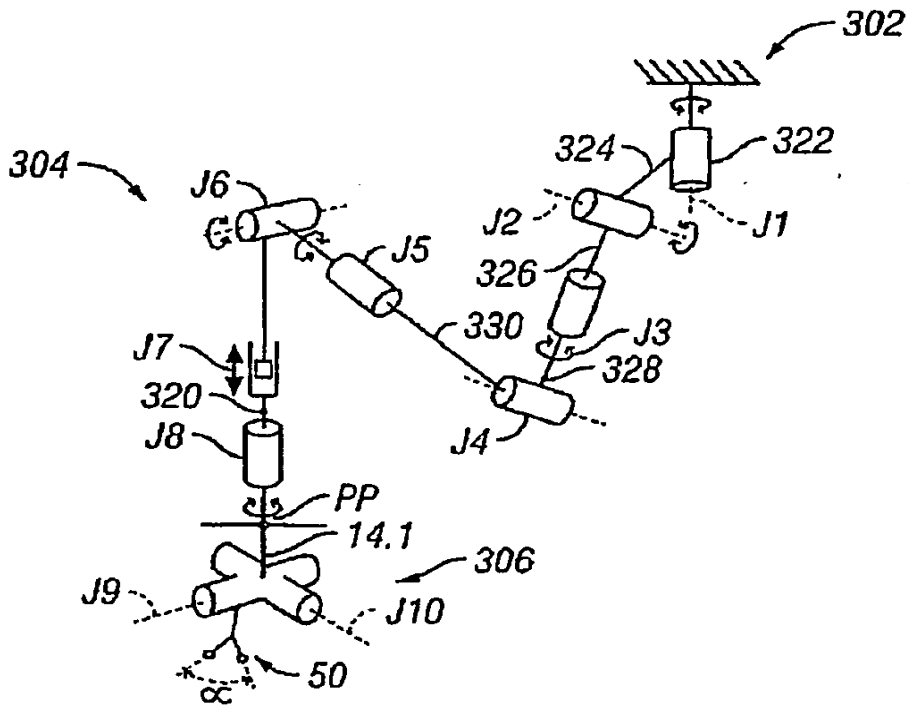


FIG. 6

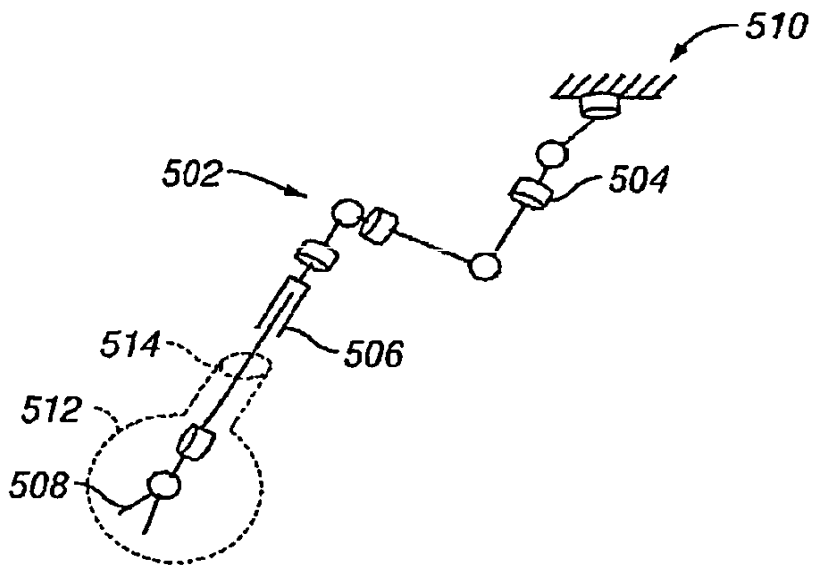


FIG. 7A

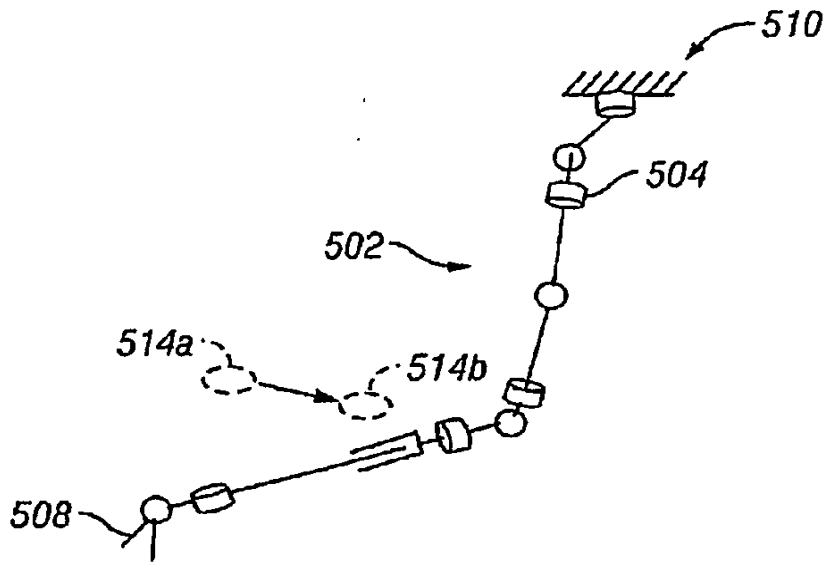


FIG. 7B

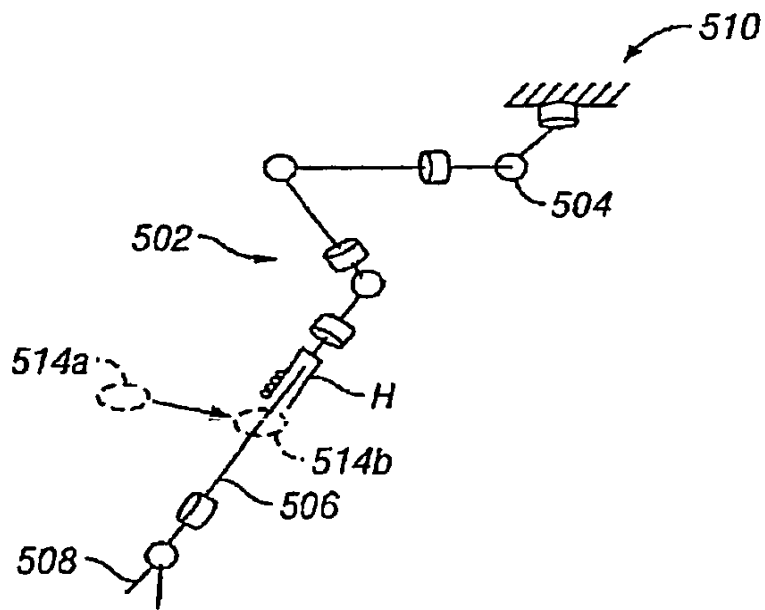


FIG. 7C

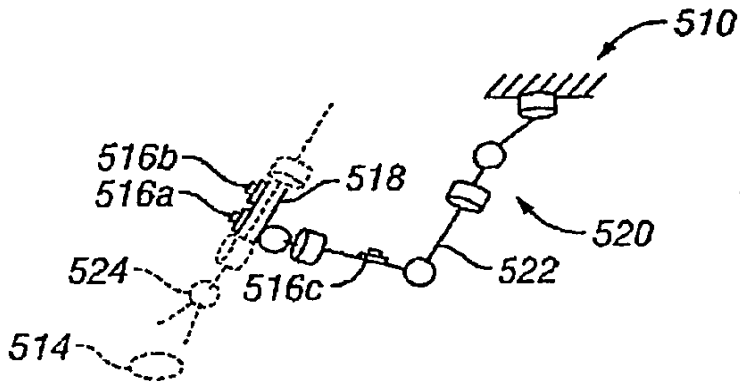


FIG. 8A

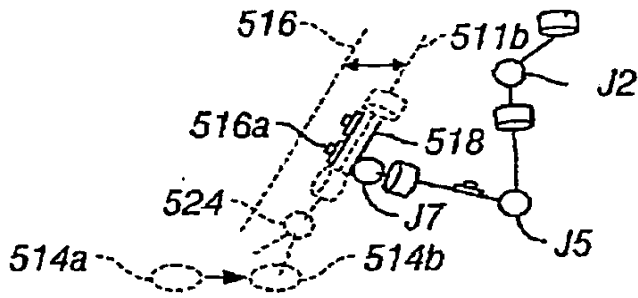


FIG. 8B

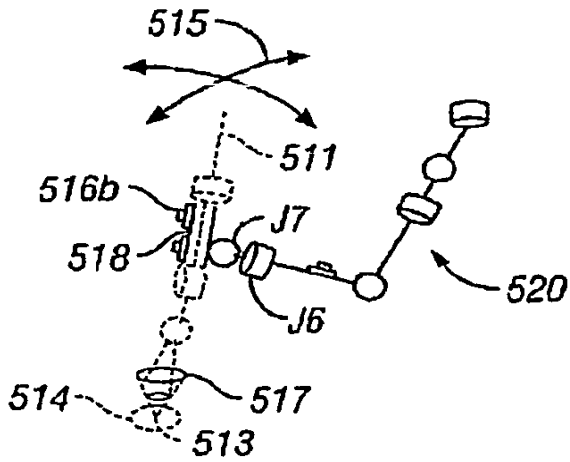


FIG. 8C

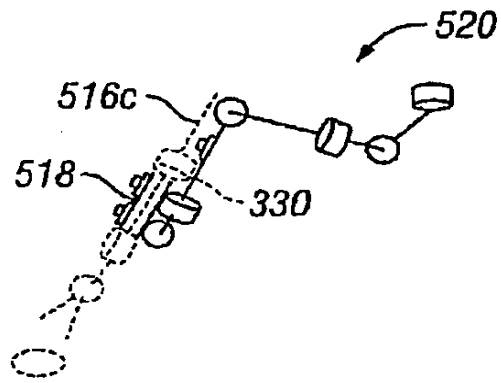


FIG. 8D

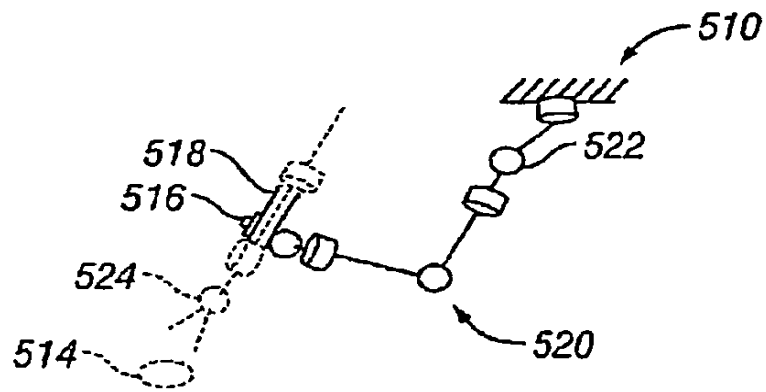


FIG. 8E

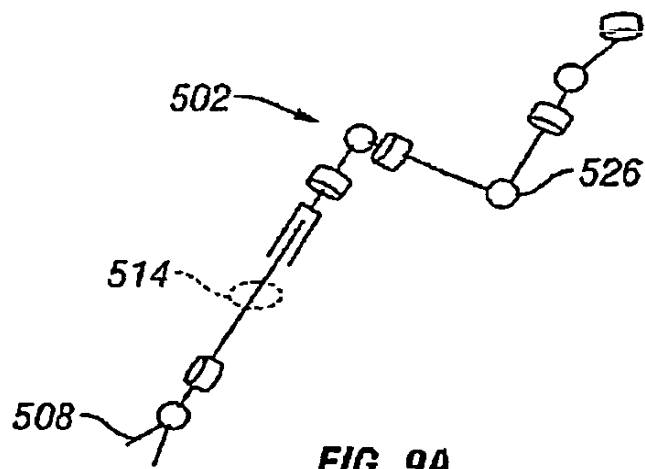


FIG. 9A

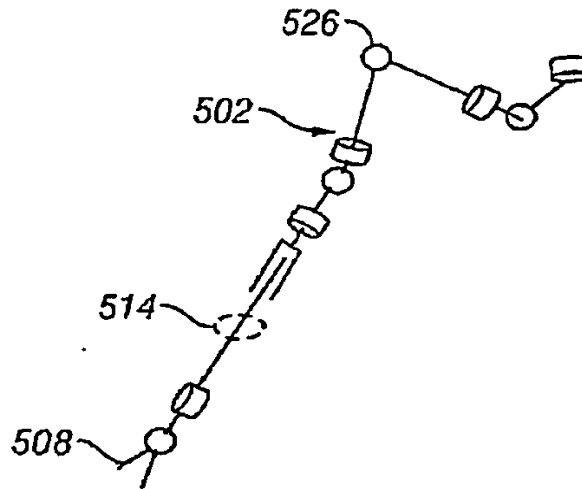


FIG. 9B

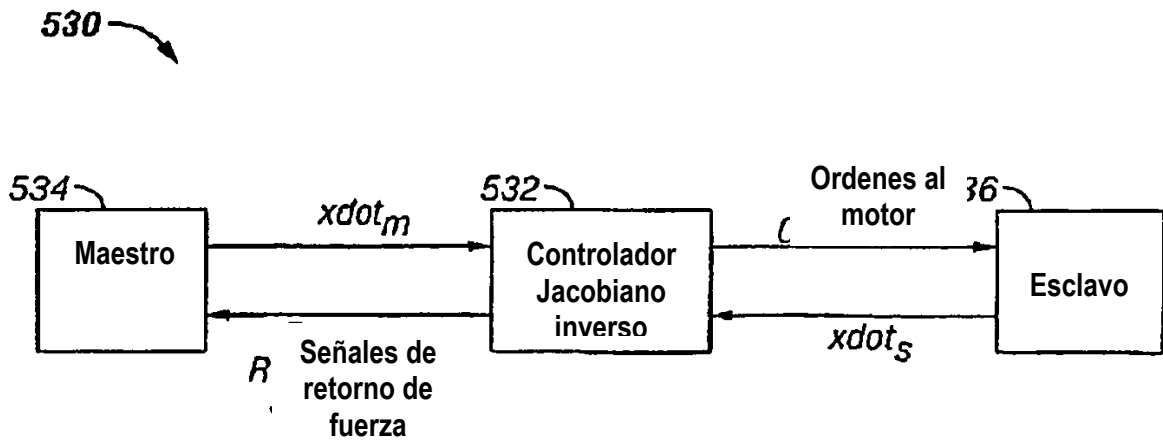


FIG. 10A

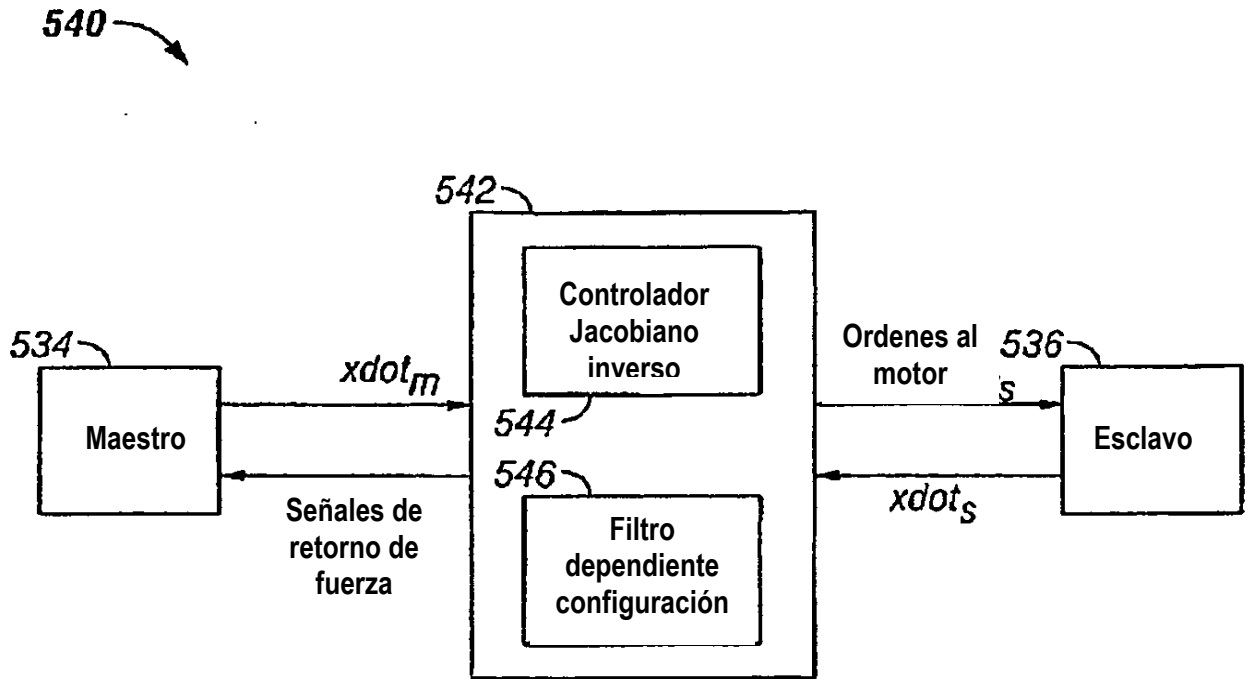


FIG. 10B

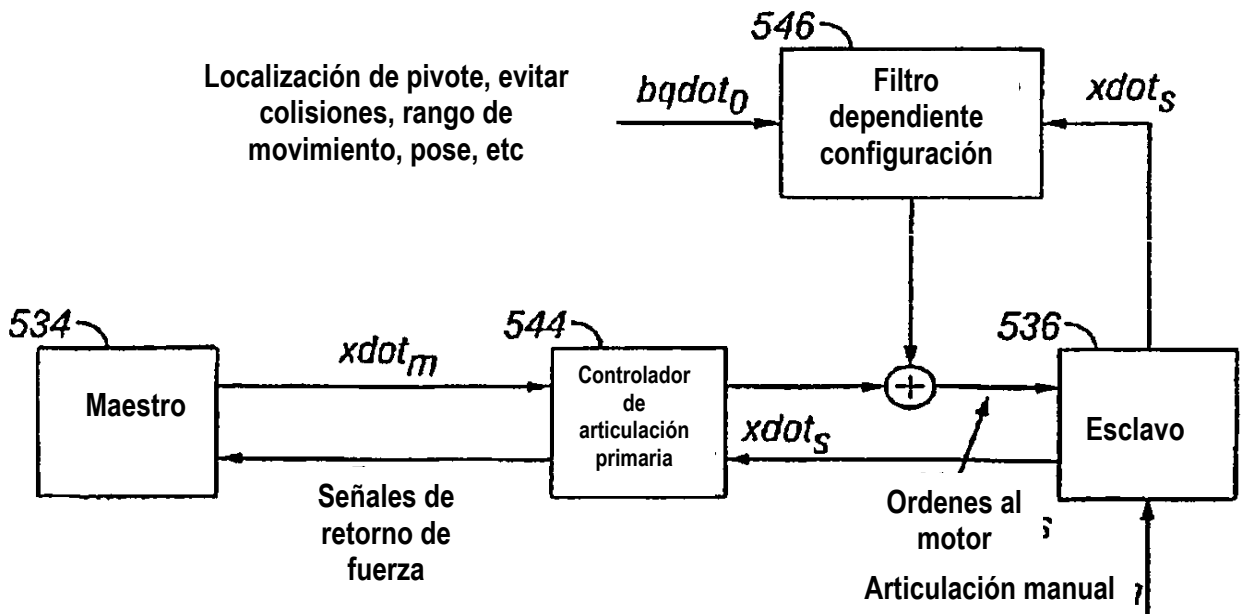


FIG. 10C

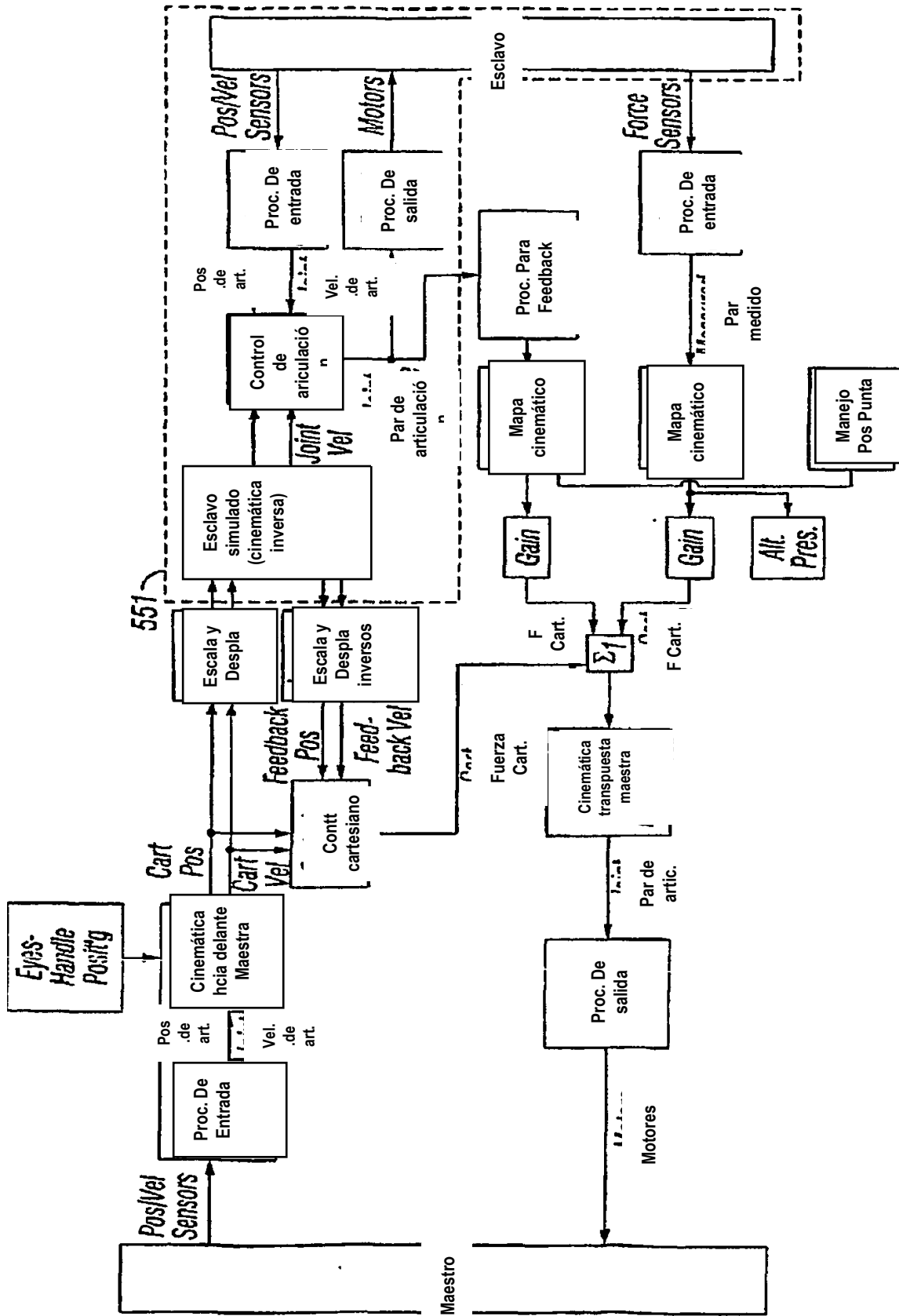


FIG. 11

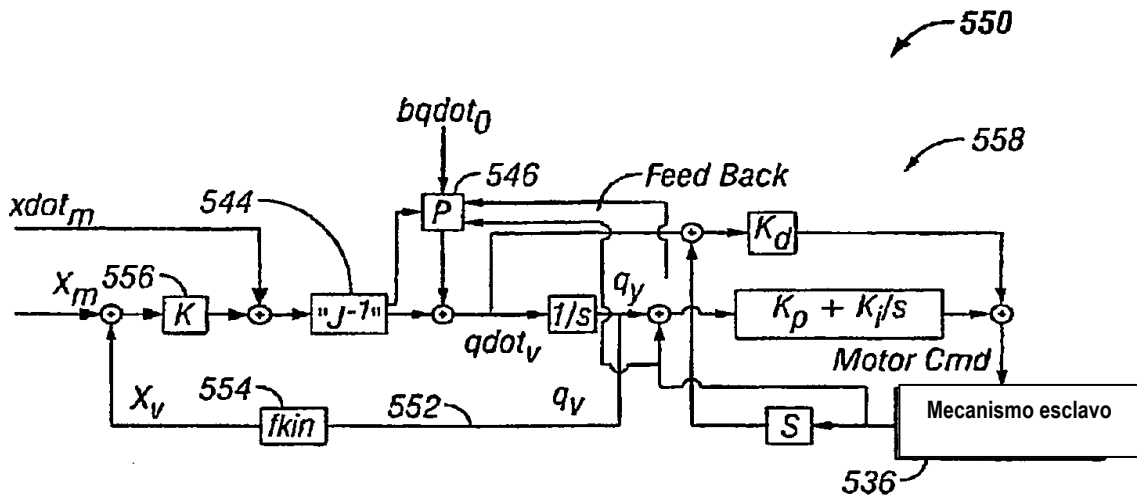


FIG. 12

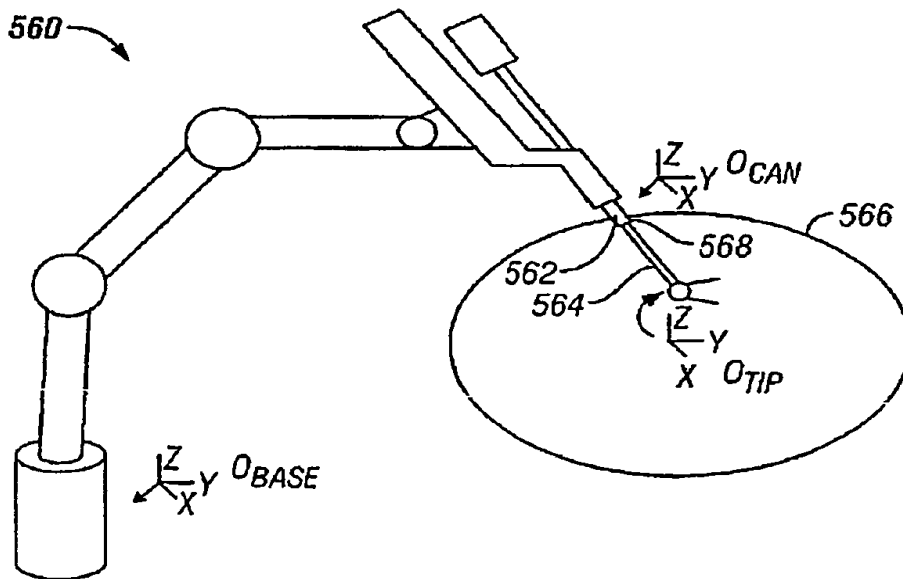


FIG. 13

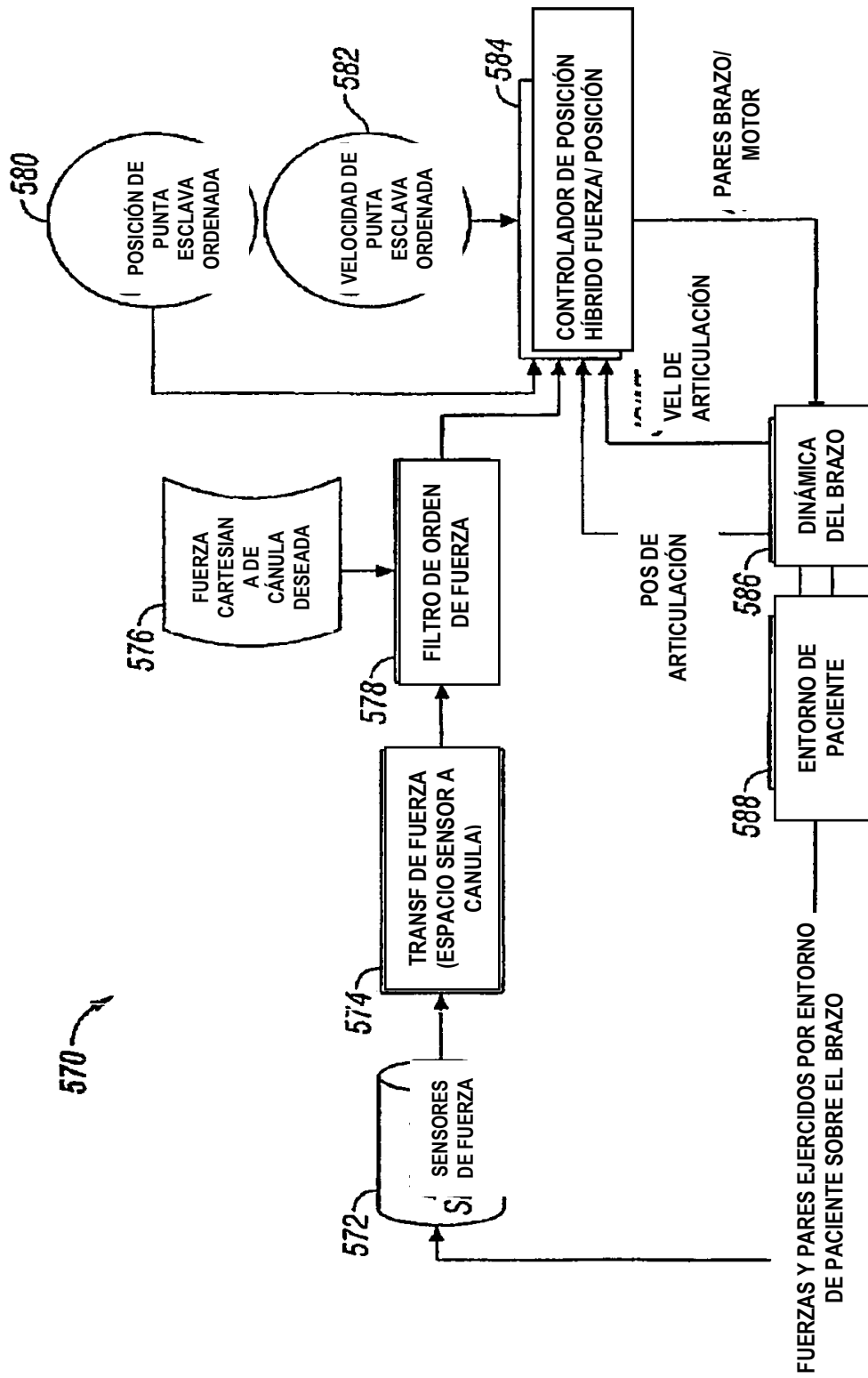


FIG. 13A

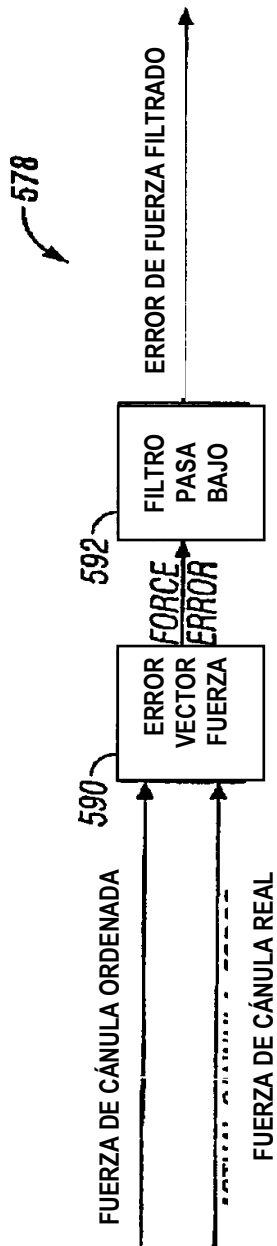


FIG. 13B

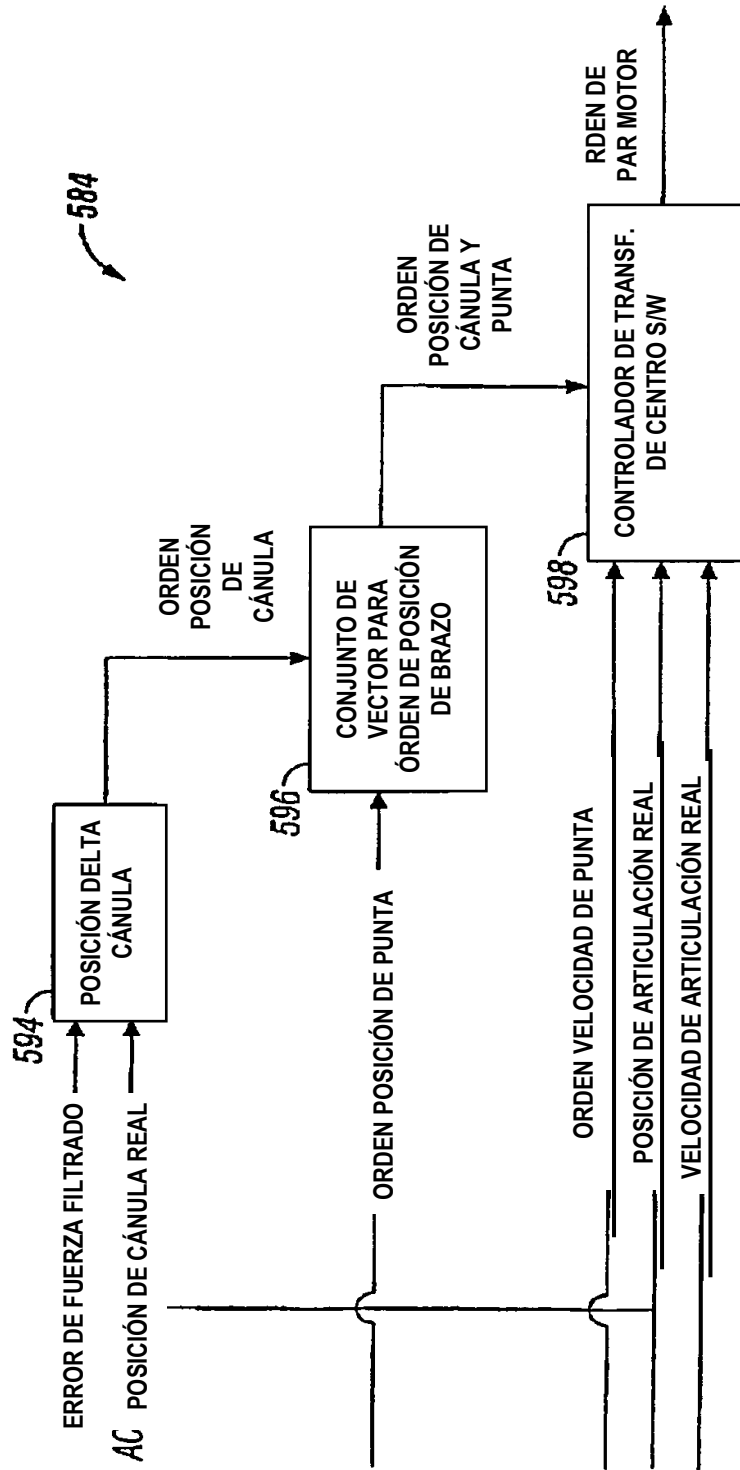


FIG. 13C

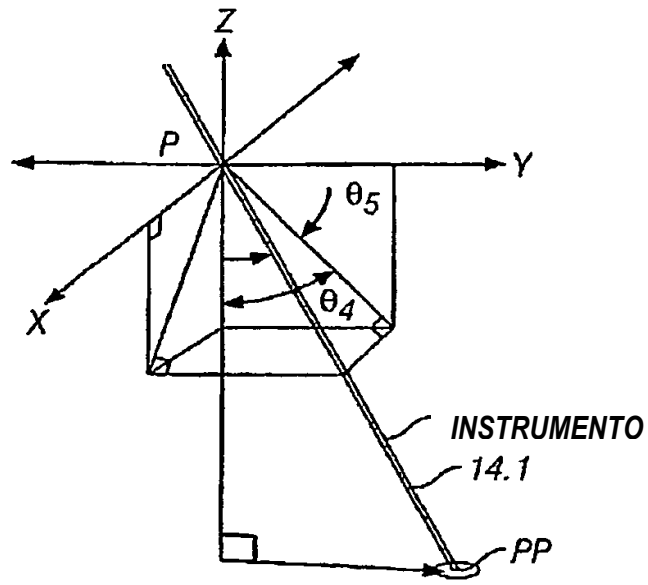


FIG. 14A

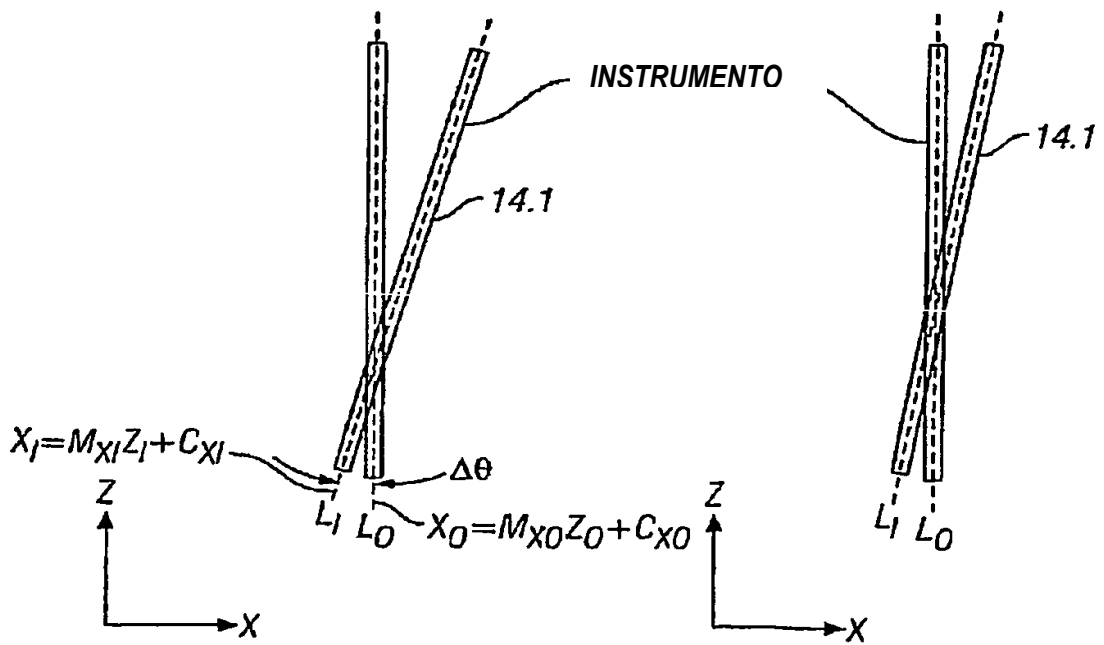


FIG. 14B

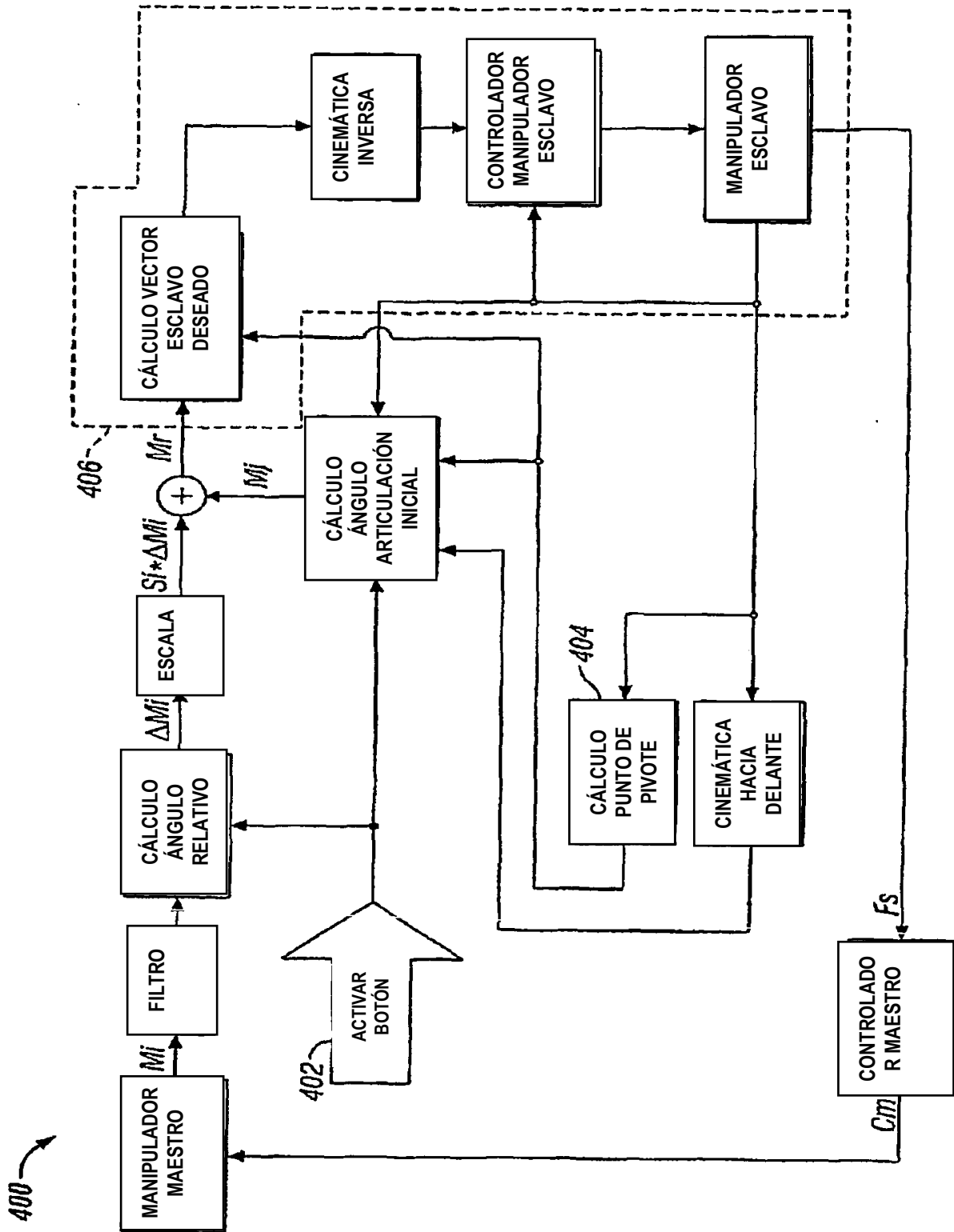


FIG. 15

414 →

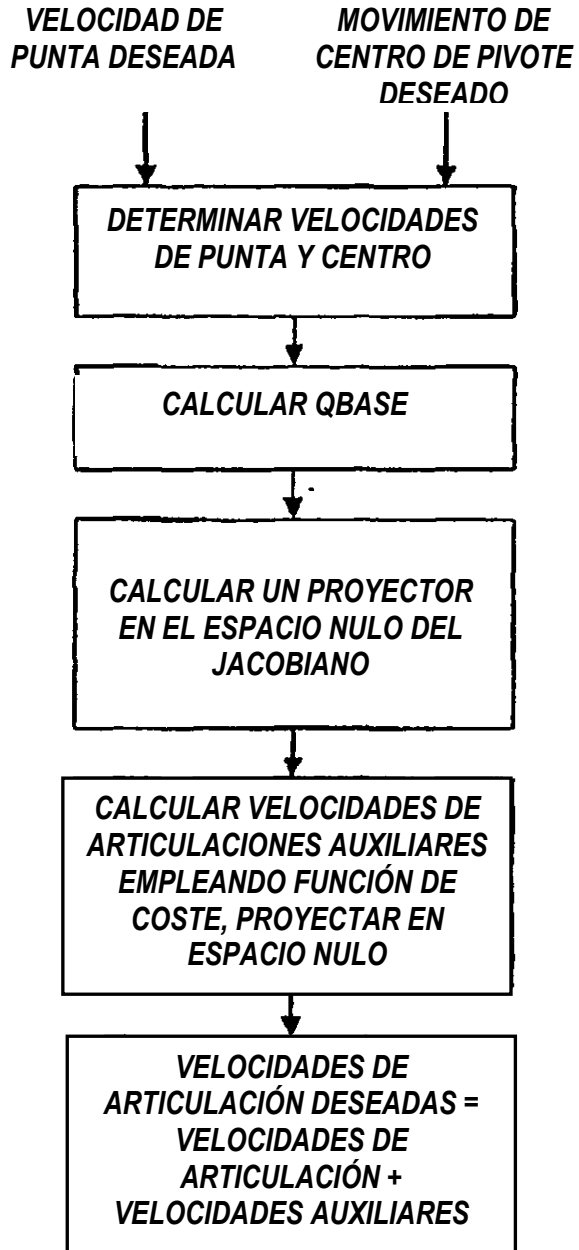


FIG. 17

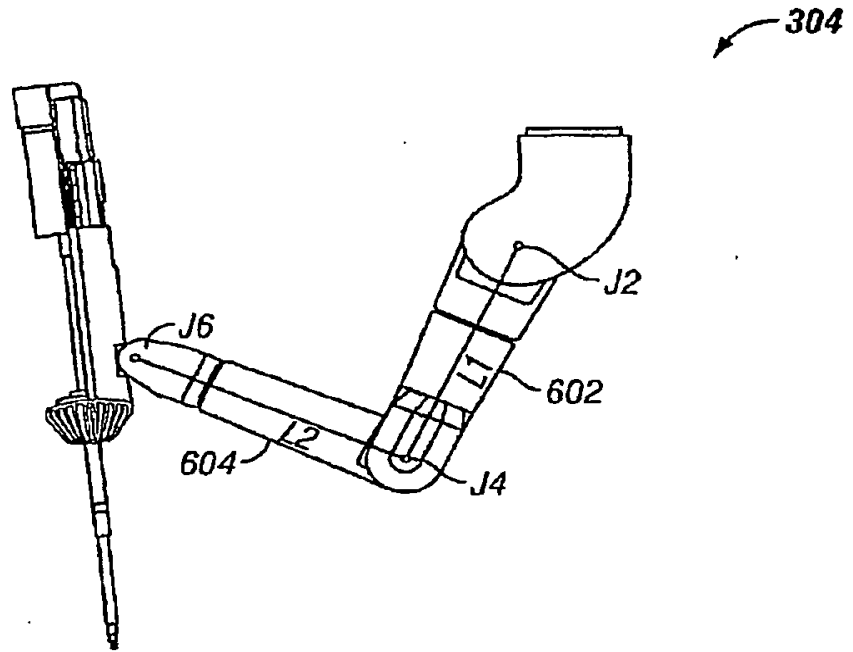


FIG. 18A

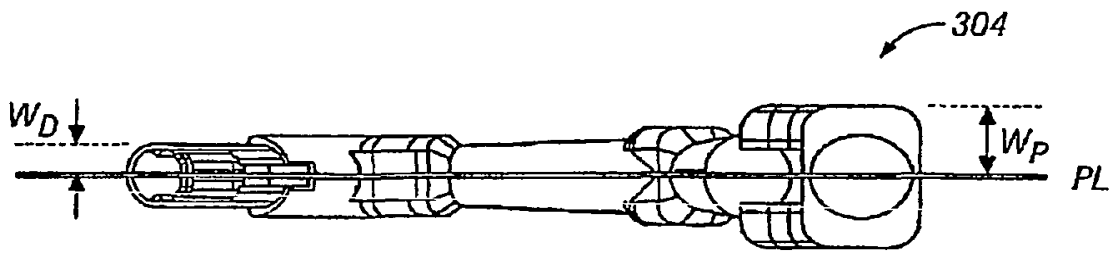


FIG. 18B

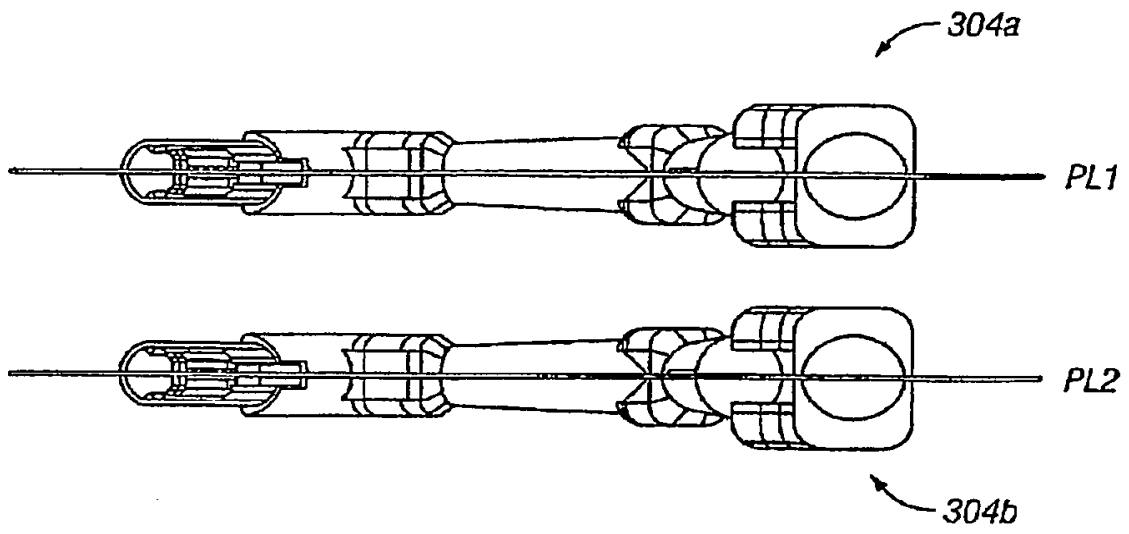


FIG. 18C

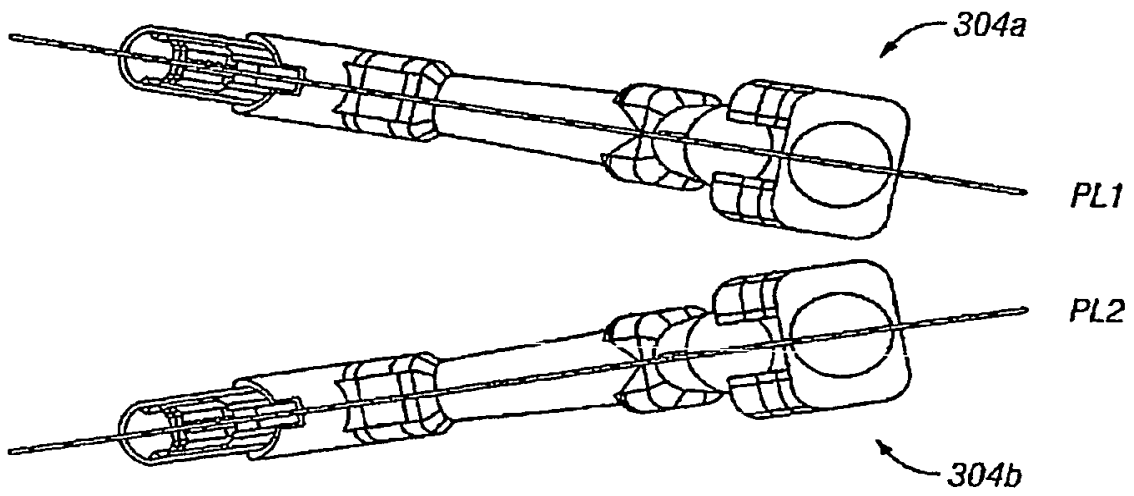
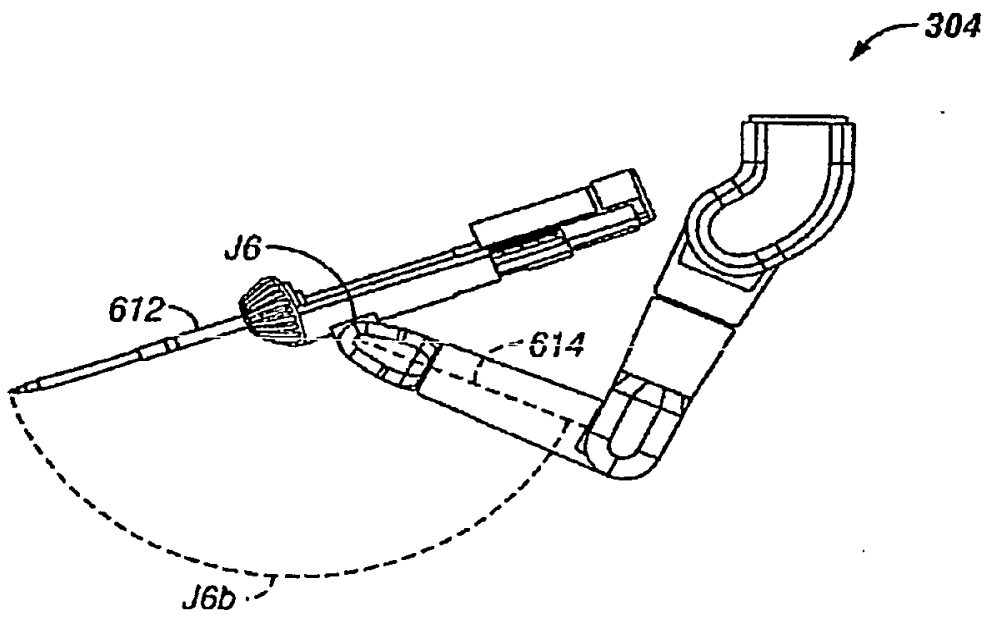
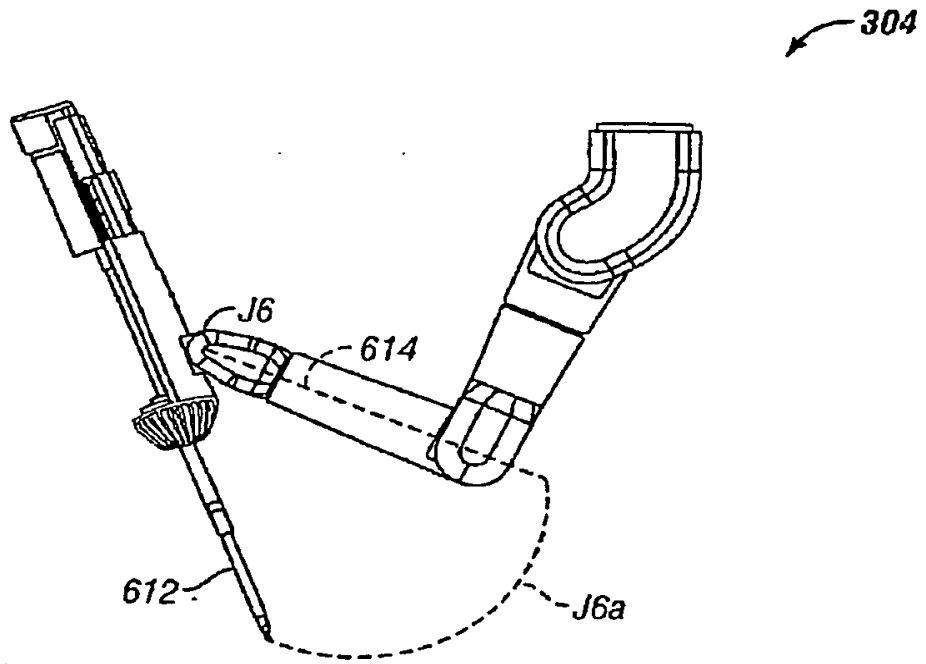


FIG. 18D



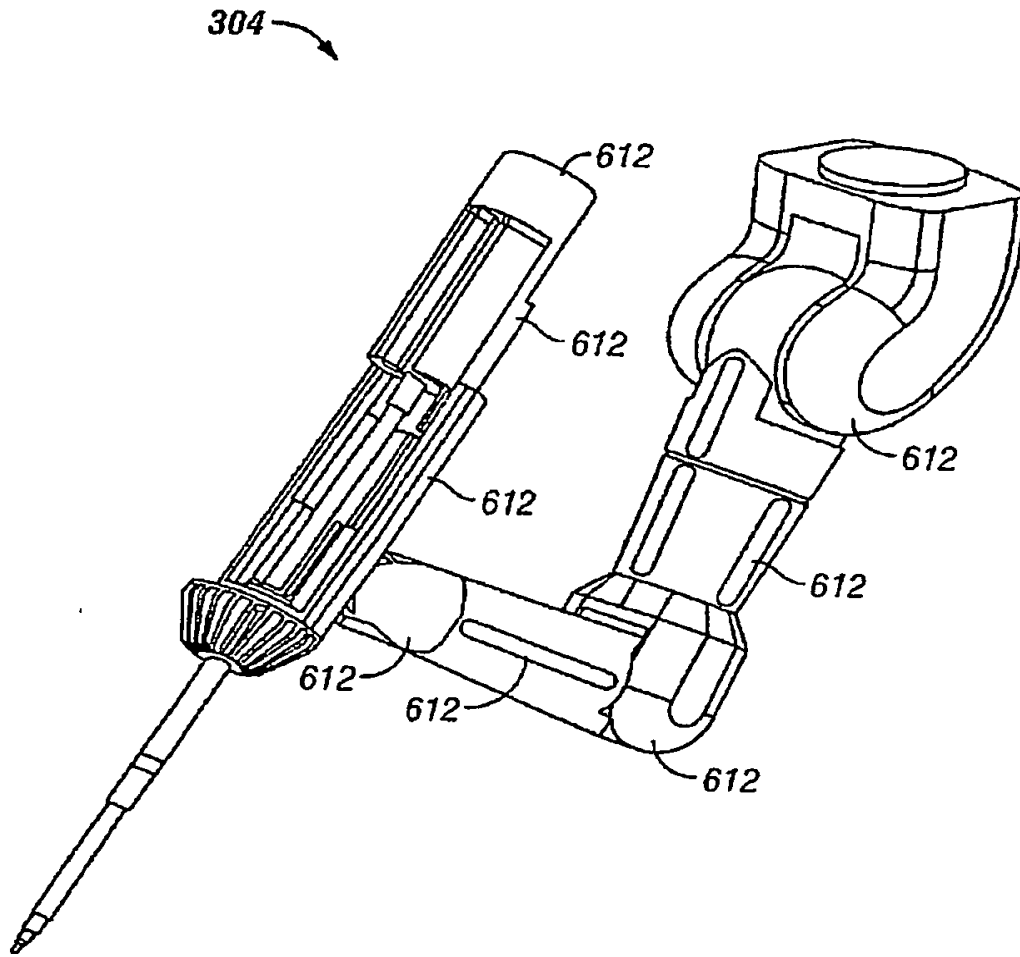


FIG. 18G