(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 496 615**

(51) Int. CI.:

A61B 5/11 (2006.01)
A61H 1/00 (2006.01)
B25J 3/00 (2006.01)
B25J 3/02 (2006.01)
A61H 1/02 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.05.2008 E 08748241 (0)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.07.2014 EP 2150175**

(54) Título: **Exoesqueleto robótico para movimiento de un miembro**

(30) Prioridad:

01.05.2007 US 924135 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.09.2014

(73) Titular/es:

QUEEN'S UNIVERSITY AT KINGSTON (100.0%)
Kingston, ON K7L 2N6, CA

(72) Inventor/es:

SCOTT, STEPHEN H.;
BROWN, IAN E. y
BALL, STEPHEN J.

(74) Agente/Representante:

LAZCANO GAINZA, Jesús

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

Exoesqueleto robótico para movimiento de un miembro

Campo de la invención

Esta invención se refiere generalmente a un exoesqueleto robótico que se sujeta a un miembro de un sujeto, para usar en áreas tales como de evaluación, rehabilitación, y/o investigación que involucran la función motora. En particular, la invención se refiere a un exoesqueleto robótico que proporciona acoplamiento mecánico fuera del eje de una o más uniones de un miembro de un sujeto. La invención se refiere además a un exoesqueleto robótico que tiene acoplamiento entre dos o más uniones, en donde la separación entre las uniones es fácilmente ajustable para acomodar diferentes tamaños de miembros. La invención se refiere además a exoesqueletos robóticos que tienen combinaciones de tales características.

Antecedentes de la invención

El accidente cerebrovascular, lesión física, y enfermedad son causas de deficiencia de la función motora que involucran uno o más miembros. Frecuentemente es posible recuperar un poco de función motora a través de la rehabilitación, y la práctica de movimientos funcionales de múltiples uniones con el miembro deficiente como una parte importante de la recuperación motora (Dobkin, 2004). Las técnicas terapéuticas actuales por lo tanto se enfocan en el entrenamiento con movimientos funcionales frecuentes repetitivos (Teasell y otros, 2003).

Proporcionar a los pacientes la atención que ellos necesitan es un reto. Cada paciente requiere atención uno a uno extensiva, y los programas terapéuticos son físicamente extenuantes para el terapeuta. El uso de dispositivos robóticos para proporcionar terapia podría mejorar la eficiencia y efectividad de la terapia, y esto ha estado en primer plano de la investigación reciente de rehabilitación de accidentes cerebrovasculares (Hesse y otros, 2003; Reinkensmeyer y otros, 2004). Los robots no sólo tienen la habilidad de proporcionar entrenamiento de movimientos funcionales repetitivos, sino además pueden proporcionar evaluaciones cuantitativas objetivas y sensibles del movimiento. La tecnología hace posible además para un solo terapeuta supervisar múltiples pacientes simultáneamente.

Los robots existentes para la rehabilitación y asistencia de miembros superiores incluyen MIT-MANUS (Krebs y otros, 1998), MIME (Burgar y otros, 2000), GENTLE/s (Loureiro y otros, 2003), MULOS (Johnson y otros, 2001), T-WREX (Sanchez y otros, 2004; ARMEO (disponible de Hocoma AG, Suiza); Sanchez y otros, 2006), ARMin (Mihelj y otros, 2006; Mihelj y otros, 2007), y KINARM™ (Scott, 1999), entre otros. Los dispositivos robóticos de exoesqueleto tienen la ventaja del control directo sobre la función de unión del miembro, lo cual permite el control independiente de cada DOF del miembro. Esto asegura que los movimientos compensatorios por un sujeto pueden monitorearse y/o prevenirse. Un inconveniente de los dispositivos de exoesqueleto es que el acoplamiento de la conexión robótica al miembro del sujeto requiere la alineación de los ejes de la unión del miembro y la unión del robot correspondiente. Con los robots de exoesqueletos actuales, esto resulta en partes del robot que se localizan cerca del sujeto, lo cual puede ser intimidante para algunos sujetos.

Un inconveniente adicional de los dispositivos robóticos actuales es que no pueden ajustar la movilidad completa del miembro superior humano. Esto es particularmente cierto para el complejo del hombro puesto que tiene una disposición compacta de cinco grados de libertad principales (DOF): dos en la unión esternoclavicular y tres en la unión escapulohumeral. La unión escapulohumeral puede aproximarse como una unión esférica y se ha replicado en algunos dispositivos actuales. Sin embargo, la cintura del hombro se ha descuidado, a pesar de su importancia en la estabilización y orientación del miembro superior. Sin el control directo en la unión esternoclavicular, no es posible prevenir al sujeto de hacer movimientos compensatorios, ni existe una forma para apropiadamente recobrar fuerza y coordinación de la cintura del hombro.

La WO2004/058458 describe un aparato de interfaz de exoesqueleto que comprende cinco conexiones rígidas dispuestas en serie, capaces de girar recíprocamente en los extremos respectivos para monitorear los movimientos angulares del brazo, del antebrazo y la muñeca de un usuario y que tiene en la punta un mango para acoplar con el usuario que refleja una realimentación de la fuerza.

Resumen de la invención

Un aspecto de la invención se refiere a un exoesqueleto robótico, que comprende: conexión mecánica que se acopla a una unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la conexión mecánica que incluye al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; y un medio de sujeción del miembro para sujetar el miembro a la conexión mecánica; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de un eje de la unión seleccionada del miembro.

La conexión mecánica puede definir una unión virtual en un punto no localizado en la conexión mecánica; y la unión virtual puede acoplarse a la unión seleccionada del miembro cuando el miembro se sujeta a la conexión mecánica.

En una modalidad, la conexión mecánica puede comprender una pluralidad de conexiones interconectadas para la articulación entre ellas de manera que definen dos estructuras de paralelogramo, las dos estructuras de paralelogramo que comparten al menos porciones de dos conexiones, dicho paralelogramo que tiene un lado virtual definido entre dos esquinas, las dos esquinas fijas al suelo.

En otra modalidad, la conexión mecánica puede comprender dos o más conexiones sólidas y al menos un cable.

En otra modalidad, la conexión mecánica puede comprender una pista curva con una curvatura circular; un carro asociado con la pista curva; y una o más de: (i) dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro; (ii) al menos un cable conectado en un punto al carro y al menos en un punto a la pista; y (iii) un medio asociado con el carro para accionar y/o resistir el movimiento del carro en la pista.

La conexión mecánica puede comprender además al menos un motor para mover la conexión mecánica y/o resistir el movimiento de la conexión mecánica mediante los cables.

El exoesqueleto robótico puede acoplarse a unas primera y segunda uniones del miembro del sujeto; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión del miembro. El exoesqueleto puede proporcionar dos grados de libertad (DOF), un DOF por cada una de las primera y segunda uniones del miembro.

El exoesqueleto robótico puede acoplarse a unas primera, segunda y tercera uniones del miembro del sujeto; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión del miembro. El exoesqueleto robótico puede proporcionar tres grados de libertad (DOF), un DOF por cada una de las primera, segunda y tercera uniones del miembro.

La articulación del exoesqueleto puede estar dentro de un plano.

El miembro puede ser un brazo o una pierna. La unión seleccionada puede ser la unión esternoclavicular, la unión escapulohumeral, el codo, la muñeca, la cadera, la rodilla, o el tobillo.

En otra modalidad el exoesqueleto se acopla a las primera, segunda y tercera uniones del miembro del sujeto y proporciona hasta seis grados de libertad (DOF), dos DOF por la primera unión del miembro, tres DOF por la segunda unión del miembro, y un DOF por la tercera unión del miembro; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de uno o más de los ejes de la primera unión del miembro. El exoesqueleto puede ajustarse para su movimiento solamente dentro de un plano.

En otra modalidad, el exoesqueleto se acopla a las primera, segunda, tercera y cuarta uniones del miembro del sujeto y proporciona dos DOF por la primera unión del miembro, tres DOF por la segunda unión del miembro, y uno o dos DOF por la tercera unión del miembro, y uno, dos o tres DOF por la cuarta unión del miembro; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de uno o más de los ejes de la primera unión del miembro.

El miembro puede ser el brazo, en donde las primera y segunda uniones pueden ser las uniones esternoclavicular y escapulohumeral del hombro, y las tercera y cuarta uniones pueden ser el codo y la muñeca.

El exoesqueleto robótico puede comprender además un medio para obtener datos con respecto a la posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una de las uniones o las conexiones de la conexión mecánica.

Al menos una porción de la conexión mecánica puede ser ajustable para miembros de longitud diferente; en donde la conexión mecánica es una estructura de lazo cerrado tal que las conexiones no requieren el ajuste de longitud cuando la conexión mecánica se ajusta para miembros de longitud diferente.

Las uniones de la conexión mecánica pueden acoplarse por cables; en donde la conexión mecánica es una estructura de lazo cerrado tal que los cables no requieren ajuste de longitud y/o tensión cuando la conexión mecánica se ajusta para miembros de longitud diferente.

De acuerdo con un segundo aspecto de la invención se proporciona un método para evaluar, estudiar o diagnosticar un déficit en, y/o tratar una deficiencia en la función motora de un miembro de un sujeto, que

comprende: acoplar una unión seleccionada del miembro alrededor de un eje particular a una conexión mecánica de un exoesqueleto robótico; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto robótico no se localiza en o a lo largo del eje particular de la unión seleccionada del miembro; y en donde la articulación del exoesqueleto robótico se relaciona a la función motora de la unión seleccionada del miembro.

La conexión mecánica puede definir una unión virtual en un punto no localizado en la conexión mecánica; y el acoplamiento puede incluir acoplar la unión seleccionada del miembro alrededor de un eje particular a la unión virtual de la conexión mecánica.

En una modalidad, el acoplamiento puede incluir acoplar las primera y segunda uniones del miembro del sujeto a la conexión mecánica; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión del miembro. El exoesqueleto puede proporcionar dos grados de libertad (DOF), un DOF por cada una de las primera y segunda uniones del miembro. En otra modalidad, el acoplamiento puede incluir acoplar primera, segunda y tercera uniones del miembro del sujeto a la conexión mecánica; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de uno o más de los ejes de la primera unión del miembro. El exoesqueleto puede proporcionar tres grados de libertad (DOF), un DOF por cada una de las primera, segunda y tercera uniones del miembro.

En otra modalidad, el acoplamiento puede incluir acoplar primera, segunda y tercera uniones del miembro y proporciona hasta seis grados de libertad (DOF), dos DOF por la primera unión del miembro, tres DOF por la segunda unión del miembro, y un DOF por la tercera unión del miembro; en donde la conexión mecánica del exoesqueleto no se localiza en, o a lo largo de uno o más de los ejes de la primera unión del miembro.

La investigación puede comprender obtener datos con respecto a la posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una unión o conexión de la conexión mecánica, los datos que corresponden a la posición angular, momento, y/o aceleración de una o más uniones del miembro.

Otro aspecto de la invención se refiere a un exoesqueleto robótico, que comprende: una primera conexión mecánica que se acopla a una primera unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la primera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; y un medio de sujeción del miembro para sujetar el miembro a la conexión; en donde la primera conexión mecánica define una unión virtual que tiene un eje que no se localiza en la conexión mecánica; en donde la unión virtual se acopla a la primera unión seleccionada del miembro cuando el miembro se sujeta a la conexión; y en donde la primera conexión mecánica no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión acoplada seleccionada del miembro.

La primera conexión mecánica puede comprender una pluralidad de conexiones interconectadas para la articulación entre ellas de manera que definen dos estructuras de cuatro barras, las dos estructuras de cuatro barras que comparten al menos porciones de dos conexiones, una de dicha estructura de cuatro barras que tiene una conexión virtual definida entre dos esquinas, las dos esquinas fijas al suelo. Al menos una de las estructuras de cuatro barras es un paralelogramo.

En algunas modalidades, la primera conexión mecánica puede comprender dos o más conexiones y al menos un cable. En otra modalidad, la primera conexión mecánica puede comprender: una pista curva; un carro asociado con la pista curva; y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva.

El exoesqueleto robótico puede comprender además al menos un motor para mover la primera conexión mecánica y/o resistir el movimiento de la primera conexión mecánica.

El exoesqueleto robótico puede comprender además: una segunda conexión mecánica que se acopla a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, la segunda conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; en donde una unión de la segunda conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la segunda unión seleccionada del miembro.

En una modalidad la primera conexión mecánica puede comprender una pluralidad de conexiones interconectadas para la articulación entre ellas de manera que definen al menos una estructura de cuatro barras; y la segunda conexión mecánica comprende una pluralidad de conexiones interconectadas para la articulación entre ellas. En otra modalidad, la pluralidad de las conexiones puede definir al menos una estructura de paralelogramo.

Una o más conexiones de la primera conexión mecánica puede compartirse con una o más conexiones de la segunda conexión mecánica. La primera conexión mecánica puede comprender una pista curva, un carro

asociado con la pista curva, y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva; y la segunda conexión mecánica comprende una pluralidad de conexiones interconectadas con poleas y cables para la articulación entre ellas. La articulación del exoesqueleto puede estar dentro de un plano.

El exoesqueleto robótico puede comprender además: una tercera conexión mecánica que se acopla a una tercera unión seleccionada del miembro del sujeto, la tercera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la tercera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; en donde una unión de la tercera conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la tercera unión seleccionada del miembro.

Dos o más de la primera conexión mecánica, la segunda conexión mecánica, y la tercera conexión mecánica pueden compartir una o más conexiones. La primera conexión mecánica puede comprender una pista curva, un carro asociado con la pista curva, y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva; la segunda conexión mecánica puede comprender una pluralidad de conexiones interconectadas con poleas y cables para la articulación entre ellas; y la tercera conexión mecánica puede comprender una pluralidad de conexiones interconectadas con poleas y cables para la articulación entre ellas. La articulación del exoesqueleto puede estar dentro de un plano.

El exoesqueleto robótico puede comprender además: una segunda conexión mecánica que se acopla a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, las primera y segunda conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la primera unión seleccionada; o una segunda conexión mecánica que se acopla a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, y una tercera conexión mecánica que se acopla a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, las primera, segunda y tercera conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la primera unión seleccionada; en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; y en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro.

El exoesqueleto robótico puede comprender además una de:

(i) una tercera conexión mecánica que se acopla a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto;
(ii) una tercera conexión mecánica que se acopla a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto y una cuarta conexión mecánica que se acopla a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera y cuarta conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la segunda unión seleccionada; y
(iii) una tercera conexión mecánica que se acopla a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, una cuarta conexión mecánica que se acopla a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, y una quinta conexión mecánica que se acopla a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera, cuarta y quinta conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la segunda unión seleccionada;

en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro;
en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un primer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro;
en donde la cuarta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; y
en donde la quinta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro.

El exoesqueleto robótico puede comprender además: una sexta conexión mecánica que se acopla a una tercera unión seleccionada del miembro del sujeto; en donde la sexta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la tercera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un eje de rotación de la tercera unión seleccionada del miembro.

En las modalidades anteriores al menos una de la primera conexión mecánica, la segunda conexión mecánica, la

tercera conexión mecánica, la cuarta conexión mecánica, y la quinta conexión mecánica puede comprender una pista curva, un carro asociado con la pista curva, y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva. Dos o más de la primera conexión mecánica, la segunda conexión mecánica, la tercera conexión mecánica, la cuarta conexión mecánica, y la quinta conexión mecánica pueden compartir una o más conexiones.

El exoesqueleto robótico de cualquiera de las modalidades anteriores puede comprender además un medio para obtener datos con respecto a la posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una de las uniones o las conexiones de la conexión mecánica.

El exoesqueleto robótico de cualquiera de las modalidades anteriores puede configurarse para su movimiento solamente dentro de un plano.

En otra modalidad el exoesqueleto robótico puede comprender: una primera conexión mecánica que se acopla a una primera unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la primera conexión mecánica que incluye al menos dos conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un primer eje que corresponde a un eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; y un medio de sujeción del miembro para sujetar el miembro a la conexión; en donde el primer eje de rotación de la primera conexión mecánica es sustancialmente colineal con el eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; en donde un segundo eje de rotación de la primera conexión mecánica es sustancialmente colineal con un eje de rotación de una segunda unión seleccionada del miembro, la segunda unión seleccionada del miembro que es la siguiente unión la cual es distal o proximal a la primera unión seleccionada del miembro; y en donde una distancia entre los primer y segundo ejes de rotación de la primera conexión mecánica es variable y el desempeño apropiado de la conexión mecánica se mantiene sin ajustar la longitud de las conexiones de la conexión mecánica.

En otra modalidad el exoesqueleto robótico puede comprender: la conexión mecánica descrita anteriormente para acoplarse a una primera unión seleccionada de un miembro; y una segunda conexión mecánica que se acopla a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, la segunda conexión mecánica que incluye al menos dos conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un segundo eje que corresponde a un eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; en donde el segundo eje de rotación de la segunda conexión mecánica es sustancialmente colineal con el eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; en donde un tercer eje de rotación de la segunda conexión mecánica es sustancialmente colineal con un eje de rotación de una tercera unión seleccionada del miembro, la tercera unión seleccionada del miembro que es la siguiente unión la cual es distal o proximal a la segunda unión seleccionada del miembro; y en donde una distancia entre los segundo y tercer ejes de rotación de la segunda conexión mecánica es variable y el desempeño apropiado de la segunda conexión mecánica se mantiene sin ajustar la longitud de las conexiones de la segunda conexión mecánica.

Otro aspecto de la invención se refiere a un método para evaluar, estudiar o diagnosticar un déficit, y/o tratar una deficiencia en la función senso-motriz de un miembro de un sujeto, que comprende: acoplar una primera conexión mecánica a una primera unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la primera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; obtener datos en relación con posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una unión o conexión de la conexión mecánica, los datos que corresponden a la posición angular, momento, y/o aceleración de una o más uniones del miembro; y usar los datos para evaluar, estudiar, diagnosticar un déficit, y/o tratar una deficiencia en la función senso-motriz; en donde la primera conexión mecánica define una unión virtual que tiene un eje que no se localiza en la conexión mecánica; en donde la unión virtual se acopla a la primera unión seleccionada del miembro; y en donde la primera conexión mecánica no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión acoplada seleccionada del miembro.

El método puede comprender además: acoplar una segunda conexión mecánica a una segunda unión seleccionada del miembro, la segunda conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; en donde una unión de la segunda conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la segunda unión seleccionada del miembro.

El método puede comprender además: acoplar una tercera conexión mecánica a una tercera unión seleccionada del miembro, la tercera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la tercera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; en donde una unión de la tercera conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la tercera unión seleccionada del miembro.

El método puede comprender además: acoplar una segunda conexión mecánica a la primera unión seleccionada del miembro, las primera y segunda conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la primera

unión seleccionada; o acoplar una segunda conexión mecánica y una tercera conexión mecánica a la primera unión seleccionada del miembro, las primera, segunda y tercera conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la primera unión seleccionada; en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; y en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro.

El método puede comprender además uno de: (i) acoplar una tercera conexión mecánica a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto; (ii) acoplar una tercera conexión mecánica a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto y acoplar una cuarta conexión mecánica a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera y cuarta conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la segunda unión seleccionada; y (iii) acoplar una tercera conexión mecánica a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, acoplar una cuarta conexión mecánica a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, y acoplar una quinta conexión mecánica a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera, cuarta y quinta conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la segunda unión seleccionada; en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un primer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; en donde la cuarta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; y en donde la quinta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro.

Otro aspecto de la invención se refiere a un método para evaluar, estudiar o diagnosticar un déficit, y/o tratar una deficiencia en la función senso-motriz de un miembro de un sujeto, que comprende: acoplar una primera conexión mecánica a una primera unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la primera conexión mecánica que incluye al menos dos conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un primer eje que corresponde a un eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; obtener datos en relación con posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una unión o conexión de la conexión mecánica, los datos que corresponden a la posición angular, momento, y/o aceleración de una o más uniones del miembro; y usar los datos para evaluar, estudiar, diagnosticar un déficit, y/o tratar una deficiencia en la función senso-motriz; en donde el primer eje de rotación de la primera conexión mecánica es sustancialmente colineal con el eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; en donde un segundo eje de rotación de la primera conexión mecánica es sustancialmente colineal con un eje de rotación de una segunda unión seleccionada del miembro, la segunda unión seleccionada del miembro que es la siguiente unión la cual es distal o proximal a la primera unión seleccionada del miembro; y en donde una distancia entre los primer y segundo ejes de rotación de la primera conexión mecánica es variable y el desempeño apropiado de la conexión mecánica se mantiene sin ajustar la longitud de las conexiones de la conexión mecánica.

Breve descripción de las figuras

Para un entendimiento más detallado de la invención, y para mostrar más claramente cómo puede llevarse a cabo, la invención se describirá, en forma de ejemplo, con referencia a los dibujos acompañantes, en donde:

Las Figuras 1a y 1b son diagramas de una modalidad de un exoesqueleto robótico plano sujetado a un brazo, visto desde abajo, en la cual las conexiones del exoesqueleto forman dos estructuras de paralelogramo (mostradas oscurecidas en la Figura 1b), y la unión del hombro se acopla mecánicamente fuera del eje. La Figura 1c muestra una modalidad alternativa en la cual las conexiones del exoesqueleto se han reemplazado con cables y poleas.

Las Figuras 2a y 2b muestran modalidades de un exoesqueleto que incluyen una conexión mecánica de pista curva.

La Figura 3a muestra una modalidad de la Figura 1a en la cual los paralelogramos se reemplazan por estructuras de cuatro barras que no son paralelogramos. La Figura 3b muestra que la conexión de la Figura 3a fuera del eje se acopla remota a un eje de la unión virtual que sigue una trayectoria prescrita.

La Figura 4a muestra una modalidad de la Figura 2b en la cual la pista curva se reemplaza por una pista con radios diversos.

La Figura 4b muestra que la conexión de la Figura 4a fuera del eje se acopla remota a un eje de la unión virtual que sigue una trayectoria prescrita.

La Figura 5a muestra una representación esquemática del movimiento acoplado naturalmente de las uniones esternoclavicular y escapulohumeral del brazo derecho durante un movimiento de alcance horizontal, visto desde arriba. La Figura 5b muestra cómo el centro de rotación instantáneo del sistema de dos uniones combinadas (uniones esternoclavicular y escapulohumeral) se mueve durante un movimiento de alcance.

Las Figuras 6a y 6b son diagramas de una modalidad de un exoesqueleto robótico plano sujetado a un brazo, visto desde abajo, en la cual la unión del codo se acopla mecánicamente. La Figura 6a muestra cómo se comporta la conexión mecánica cuando cambia la posición del brazo. La Figura 6b muestra una modalidad alternativa en la cual las conexiones del exoesqueleto se han reemplazado con cables y poleas. La Figura 6c muestra una modalidad del exoesqueleto de la Figura 6a, en la cual se ha añadido la conexión 19, y el eje de la unión 11 se fija al suelo y es colineal con el eje de la unión del hombro. La Figura 6d muestra una modalidad de la Figura 6c en la cual las conexiones del exoesqueleto se han reemplazado con cables y poleas.

La Figura 7 muestra una modalidad de una conexión mecánica de pista curva que proporciona la articulación de un miembro fuera del plano que corresponde a la pista.

Las Figuras 8a a la 8c muestran modalidades de un exoesqueleto robótico plano sujetado a un brazo, visto desde abajo, basado en una combinación de las modalidades mostradas en las Figuras 1 y 6. En estas figuras, la unión del hombro se acopla mecánicamente fuera del eje y el codo también se acopla mecánicamente. La Figura 8a muestra las modalidades de las Figuras 1a y 6a combinadas sin modificación. La Figura 8b muestra la modalidad de las Figuras 1a y 6a combinadas, pero que usa menos conexiones que la modalidad de la Figura 8a. La Figura 8c muestra cómo los paralelogramos de la modalidad de la Figura 6 se definen en la modalidad de la Figura 8b.

La Figura 9 es un diagrama de un exoesqueleto robótico plano que tiene 2 grados de libertad y que incluye una pista curva y un carro como parte de su conexión mecánica. Esta modalidad combina las modalidades de las Figuras 2b y 6b. La Figura 9a muestra el exoesqueleto con un sistema de accionamiento por cable de lazo cerrado, y la Figura 9b muestra el mismo exoesqueleto accionado por un sistema de accionamiento por cable de lazo abierto.

La Figura 10 es un diagrama de un exoesqueleto robótico plano que tiene 3 grados de libertad y que incluye una pista curva y un carro como parte de su conexión mecánica. Esta modalidad combina la modalidad de la Figura 9 (para hombro y codo) y una versión accionada por cable de la modalidad de la Figura 6c (para muñeca)

La Figura 11a es un dibujo que muestra el esquema de recorrido de los cables usados para el exoesqueleto robótico plano de la Figura 10.

La Figura 11b es una representación esquemática plana simplificada del recorrido óptimo de los cuatro cables. Los símbolos s, ξ, r, τ y θ representan el desplazamiento del cable, la fuerza del cable, el radio de la polea, el momento de la unión, y el ángulo de la unión, respectivamente.

La Figura 12 es un dibujo del exoesqueleto robótico plano de las Figuras 10 y 11, mostrado en uso (los cables no se muestran).

La Figura 13 muestra los datos de alcance obtenidos con el exoesqueleto robótico de la Figura 10, 11 y 12. La Figura 13a ilustra la configuración de la tarea de alcance. La Figura 13b muestra las trayectorias grabadas de la mano del sujeto. La Figura 13c muestra el movimiento de la unión individual de las tres uniones durante uno de los movimientos: el hombro, el codo y la muñeca.

La Figura 14 es un diagrama que muestra un exoesqueleto robótico de seis DOF 3-D de acuerdo con una modalidad de la invención.

La Figura 15a es un dibujo del mecanismo de hombro/codo del exoesqueleto de la Figura 14, que muestra las orientaciones de la unión y el sistema de accionamiento por cable. La Figura 15b es una representación esquemática plana simplificada del esquema de recorrido de los cables óptimo de la modalidad de la Figura 15a. Cada unión del exoesqueleto tiene una polea separada para cada cable que pasa por la unión. Los símbolos s, ξ, r, τ y θ representan el desplazamiento del cable, la fuerza del cable, el radio de la polea, el momento de la unión, y el ángulo de la unión, respectivamente.

La Figura 16a muestra el marco de coordenada usado para los cálculos de optimización de orientación de la unión para la modalidad de la Figura 14. El octante sombreado se aproxima al área de trabajo humeral. La Figura 16b es un gráfico de manipulabilidad (M) para una combinación dada de parámetros de optimización α, y ß, cuando θ_2 se varía para obtener el ángulo de abducción singular ($\theta_{2(M=0)}$) y la manipulabilidad máxima (M_{max}). La Figura 16c es un gráfico de $\theta_{2(M=0)}$ y M_{max} para todas las combinaciones de α y ß. El rango de las combinaciones de a y ß que proporciona un compromiso adecuado entre $\theta_{2(M=0)}$ y M_{max} se muestra por las líneas de contorno, y se resalta la superposición. La Figura 16d muestra M_{max} graficada radialmente sobre el área de trabajo. Los puntos cercanos al origen son configuraciones que están cercanas a la singularidad.

La Figura 17 es un dibujo del mecanismo de la cintura del hombro del exoesqueleto de la Figura 14, el cual incluye la conexión de la pista curva de la Figura 2b.

La Figura 18a es un dibujo de las sujeciones del brazalete del brazo y los ajustes del exoesqueleto de la Figura 14. Cada brazalete tiene dos ajustes traslacionales para alinear correctamente los segmentos del miembro con relación a la estructura del mecanismo: perpendicular a la conexión (flechas pequeñas) y paralelo a la conexión (flechas vacías). Un quinto ajuste (flecha grande) mueve la localización de la unión del

codo para cambiar la longitud de la conexión del miembro superior. La Figura 18b es un primer plano de la sujeción del brazalete, que muestra una abrazadera de liberación rápida.

Descripción detallada de las modalidades ilustrativas

La función senso-motriz deficiente de uno o más miembros de un sujeto puede provocarse por un accidente cerebrovascular, lesión física (es decir, trauma), o enfermedad, y combinaciones de estas. La investigación en áreas tales como la función senso-motriz en individuos normales y deficientes, y el diagnóstico, evaluación y/o tratamiento (es decir, rehabilitación, terapia) de la función senso-motriz en individuos con tales deficiencias puede ventajosamente emplear un dispositivo robótico.

Como se usa en la presente, el término "miembro" se refiere a un miembro, o porción del mismo, y puede referirse lo mismo a un miembro superior o un miembro inferior.

Un aspecto de la invención se refiere a un exoesqueleto robótico para usar con un miembro de un sujeto. El exoesqueleto robótico incluye una conexión mecánica (también referenciada en la presente como una "conexión") que tiene conexiones o segmentos conectados en las uniones de articulación. El miembro, el cual puede ser un miembro superior o inferior, y el cual puede ser o puede no ser deficiente, se sujeta al exoesqueleto. La sujeción del miembro al exoesqueleto acopla una o más uniones del miembro a una o más uniones de la conexión mecánica. Los sensores (por ejemplo, codificadores, sensores de momento, acelerómetros) para obtener datos en relación con la posición, ángulo, aceleración, fuerza (por ejemplo, momento), etc., de una o más uniones y/o segmentos del miembro pueden desplegarse en y/o asociarse con la conexión mecánica del exoesqueleto.

Otro aspecto de la invención se refiere a la evaluación y/o rehabilitación y/o estudio de la función senso-motriz de un sujeto con función motora deficiente. El sujeto, cuyo miembro se sujeta al exoesqueleto, puede instruirse para llevar a cabo una o más tareas, o el miembro puede guiarse a través de una o más tareas por el exoesqueleto robótico. Los codificadores pueden montarse sobre y/o asociarse con las uniones y/o segmentos del exoesqueleto para proporcionar mediciones del ángulo de unión precisas y para mejorar el desempeño del control de posición. Los datos relacionados al movimiento del miembro pueden recolectarse durante cada tarea. Tales datos pueden referirse a la posición, ángulo, aceleración, fuerza (por ejemplo, momento), etc., de una o más uniones y/o segmentos de un miembro.

Un exoesqueleto robótico de acuerdo con la invención puede usarse además en aplicaciones de investigación para estudiar la función senso-motriz y/o propriocepción (es decir, sentido de la posición y la cinestesia) en individuos. Por ejemplo, el exoesqueleto robótico puede usarse para investigar cómo la información sensorial respecto a un miembro se usa para un amplio rango de funciones sensoriales y motoras. El exoesqueleto robótico puede ser útil para obtener tales datos de individuos normales y saludables, y además de individuos con lesión cerebral y/o desórdenes neurológicos en los cuales la función senso-motriz y/o propriocepción son deficientes, ya que puede ayudar uno o más de evaluación, diagnóstico, tratamiento, gestión, y terapia para tales individuos. El uso del exoesqueleto robótico con sujetos/miembros que no tienen función senso-motriz deficiente puede proporcionar datos de control.

Para el caso donde una unión de un miembro tiene solamente un eje de rotación, el término "acoplamiento" como se usa en la presente se refiere a unir una unión de la conexión mecánica del exoesqueleto a una unión del miembro. Tal unión de uniones ocurre cuando la cinemática y la cinética alrededor de un eje de cada una de las dos uniones están relacionadas que significa que el movimiento o momento alrededor de un eje en una unión producirá un movimiento o momento relacionado alrededor de un eje de la otra unión. En dependencia del mecanismo de acoplamiento, el movimiento (o momento) entre las uniones acopladas puede relacionarse linealmente (por ejemplo, uno a uno), proporcionalmente, o en alguna otra relación predecible. El eje de la unión del miembro y el eje de la unión de la conexión mecánica puede o no alinearse sustancialmente (por ejemplo, coaxial, o colineal). Si los ejes se alinean, esto será referenciado en la presente como acoplamiento colineal. Si no se alinean, esto será referenciado en la presente como acoplamiento remoto. El acoplamiento remoto puede lograrse fuera del eje, en donde ninguno de la conexión mecánica u otras partes del exoesqueleto se localizan en, o a lo largo del eje de la unión seleccionada del miembro. El acoplamiento remoto puede lograrse además en el eje, en donde parte de la conexión mecánica y/u otra parte del exoesqueleto se localizan en, o a lo largo del eje de la unión seleccionada del miembro. El término "acoplamiento" puede referirse además a unir una primera unión de la conexión mecánica a una segunda unión de la conexión mecánica.

Cuando una unión de un miembro tiene dos o más grados de libertad, la unión del miembro puede representarse por dos o más ejes de rotación que se intersecan en el centro de rotación de la unión del miembro. Los ejes pueden referenciarse como ejes de unión del miembro. El centro de rotación del miembro puede referenciarse además como el centro de unión del miembro. Para el caso donde una unión de un miembro tiene dos o más

ejes de rotación, el término "acoplamiento" como se usa en la presente se refiere a unir una unión de la conexión mecánica del exoesqueleto a un eje de unión del miembro. Un ejemplo de esto se proporciona en la sección 4.

Como se usa en la presente, el término "suelo" se pretende que signifique un punto, con relación al exoesqueleto robótico, al cual una porción o unión de la conexión mecánica se sujeta fijamente. El suelo puede referenciarse como un punto de referencia. El suelo puede establecerse en parte del chasis o bastidor asociado con el exoesqueleto robótico.

Como se usa en la presente, el término "colineal" se pretende que signifique que yace sobre la misma línea recta.

Mientras que las modalidades a continuación se describen con respecto a las uniones del miembro superior, se apreciará que las modalidades pueden configurarse para usar con otras uniones, tales como, por ejemplo, la cadera, rodilla, etc., y pueden tener N grados de libertad (es decir, un DOF, dos DOF, tres DOF, etc.). De acuerdo con las modalidades descritas en la presente, la información, los datos, la ejecución de tareas, etc., con relación a la uniones múltiples de un miembro pueden obtenerse/llevarse a cabo independientemente y/o simultáneamente para las uniones en cuestión.

En la medida que los términos "primero", "segundo", "tercero", etc., se usan en la presente con respecto a uniones de una conexión mecánica o uniones de un miembro, tal uso no deberá interpretarse como que implica alguna relación anatómica entre las uniones, o un orden consecutivo de las uniones. Por ejemplo, una "primera" unión no debe interpretarse como que es más próxima o más distal al cuerpo que una "segunda" unión o una "tercera" unión. Más bien, tal uso de "primero", "segundo", "tercero", etc., se pretende para distinguir entre las uniones múltiples de una conexión mecánica o de un miembro, como el caso puede ser.

1. El acoplamiento remoto fuera del eje a una unión de un miembro mediante una unión virtual de una conexión mecánica

En una modalidad, la invención se refiere a un exoesqueleto robótico que incluye una conexión mecánica que tiene articulación alrededor de una pluralidad de uniones, en donde la articulación define una unión virtual de la conexión mecánica. Como se usa en la presente, el término "unión virtual" se refiere a un punto no localizado en la conexión mecánica que podría formar una unión si dos o más conexiones se extendieran para intersecarse en ese punto. Cuando se sujeta a un miembro de un sujeto, la conexión mecánica proporciona el acoplamiento de la unión virtual a una unión seleccionada del miembro tal que no hay conexión mecánica u otra parte del exoesqueleto localizada en o a lo largo del eje de la unión seleccionada del miembro. Tal acoplamiento de una unión de un miembro se referencia en la presente como acoplamiento remoto fuera del eje. Por ejemplo, el eje vertical de la unión escapulohumeral corre a través del cuerpo, y está cerca de la cabezal encima del hombro; sin embargo, una conexión robótica de acuerdo con esta modalidad de la invención puede acoplarse a esta unión alrededor del eje vertical sin colocar nada de la conexión mecánica sustancialmente encima o debajo del hombro. Entre las ventajas de este enfoque está el hecho de que los motores usados para accionar la conexión robótica ya no se requiere que se localicen encima del hombro, adyacente a la cabeza del sujeto, como se requería en dispositivos robóticos anteriores (ver, por ejemplo, patente de los Estados Unidos No. 6,155,993, concedida el 5 de Diciembre del 2000 a Scott). Más bien, esta modalidad permite a los motores de accionamiento localizarse debajo de la conexión mecánica y fuera del sujeto, lo cual aumenta la comodidad del sujeto. Se apreciará por supuesto que el enfoque descrito en la presente que permite tal alineación puede generalizarse a otros miembros/uniones del cuerpo, tales como la unión esternoclavicular, la cadera, la rodilla, etc.

Dos ejemplos de conexiones mecánicas que pueden usarse para lograr el acoplamiento remoto fuera del eje de acuerdo con la invención se describen a continuación.

1.1 Conexión mecánica de dos paralelogramos

Las Figuras 1a y 1b muestran un ejemplo de un exoesqueleto plano sujetado a un brazo, visto desde abajo, en el cual la unión del hombro se acopla remotamente fuera del eje a la unión virtual de la conexión mecánica definida en el punto indicado por el número de referencia 1. Como se usa en la presente, "plano" se pretende que signifique que la articulación del exoesqueleto se limita a un espacio el cual puede definirse por dos coordenadas (es decir, un plano). El plano puede orientarse en cualquier dirección (por ejemplo, horizontalmente, verticalmente, o cualquier dirección entre ellas). Esta modalidad incluye una conexión mecánica de seis conexiones, en la cual las conexiones 2, 4, 6, 8, 10, y una conexión virtual entre los puntos fijados 16 y 18 definen dos paralelogramos como se muestra en la Figura 1b. Los dos paralelogramos comparten dos lados, con un extremo de la conexión 2 fijo al suelo en 16 y que tiene rotación alrededor de un eje definido en 16. La conexión 8 puede conectarse a un motor de accionamiento y/o codificador 18, el cual se conecta además al suelo. Un motor de accionamiento y/o codificador puede colocarse además en 16 en lugar de en 18. La Figura 1a

muestra cómo la conexión mecánica se comporta cuando se cambia el ángulo de unión del hombro, y la Figura 1b muestra las dos conexiones compartidas de los dos paralelogramos (las cuales son las conexiones 2 y 4 en esta figura; ver las flechas). Se debe notar que las dos conexiones compartidas no tienen que ser las dos indicadas, ya que otros pares son posibles. En esta modalidad, la unión virtual 1 de la conexión se acopla colinealmente a la unión del hombro. Las uniones 16 y 18, donde un motor y/o codificador pueden colocarse, se acoplan remotamente fuera del eje a la unión del miembro. Los paralelogramos pueden implementarse al menos parcialmente usando cables y poleas, como se muestra en la Figura 1c. En la Figura 1c, una polea 70 se fija a la conexión 72, y otra polea 74 se fija al suelo en 76, y se muestra un cable por los pequeños guiones.

1.2 Conexión mecánica de pista curva

La Figura 2a muestra otra modalidad de un exoesqueleto robótico que proporciona acoplamiento remoto fuera del eje de una unión de un miembro tal como, en este caso, el hombro. Se muestran dos posiciones del hombro. Al igual que la modalidad de la Figura 1, la articulación de esta modalidad es también plana. La conexión mecánica de esta modalidad incluye un carril o pista 40, la cual soporta y guía un carro 42 a través de un rango circular de movimiento. En esta modalidad la pista curva 40 es de radio constante. Una unión virtual de la conexión mecánica se define en el punto indicado por el número de referencia 41. La pista curva es colineal con el eje de la unión de interés (en este caso, el hombro), y así fuerza al carro para alinearse con el eje de la unión del hombro en cualquier localización en la pista.

Existen varias formas de accionar el carro en una pista curva. Los ejemplos anteriores indican que el carro puede accionarse directamente por un motor montado en el carro en donde el motor se engrana a la pista (ver, por ejemplo, la publicación de patente de los Estados Unidos No. 2003/0115954 A1, publicada en 26 de junio de 2003, a Zemlyakov y McDonough). Existen además varias implementaciones de accionamiento del cable (o cinta) en las cuales un cable (o una cinta) se encamina a lo largo de la pista curva a través del carro. El cable (o cinta) se fija a cada extremo de la pista, y alrededor de un vástago accionado que no es colineal con la pista. La rotación del vástago tiene el resultado final de jalar el carro a lo largo de la pista o mover la pista con relación al carro (ver por ejemplo Nef y otros, 2005; Mihelj y otros, 2007; Frisoli y otros, 2005; Perry y otros, 2006, y además la publicación de la patente de los Estados Unidos No. 2008/0009771 A1, publicada el 10 de Enero de 2008, a Perry y Rosen). Típicamente, el actuador que acciona este movimiento se sujeta al carro, para que el actuador se mueva junto con el carro, pero el actuador puede localizarse remotamente mediante el uso de cables.

En la modalidad mostrada en la Figura 2b, el carro se acciona por las conexiones 44 y 46, donde la conexión 44 puede conectarse a uno o más motores de accionamiento. Una conexión mecánica de cuatro barras se forma por las conexiones 44, 46, la conexión virtual 43, y la unión de conexión (fija) 50 y el eje de la unión del hombro 41, y en este caso, la estructura no forma un paralelogramo, aunque podría, en dependencia de su configuración. Un paralelogramo tiene la ventaja de proporcionar una relación lineal simple entre el movimiento (y momento) de la unión 50 y el movimiento (y momento) de la unión 41. La conexión mecánica que incluye las conexiones 44, 46 se soporta en la unión 50, y por el carro 42. Se apreciará que puesto que esta conexión mecánica puede soportarse en ambos de sus extremos proximales (por ejemplo, en la unión 50) y en la pista 40, evita algunos de los problemas asociados con la conformidad (es decir, movimiento de la conexión mecánica en una dirección fuera del plano). La conformidad puede ser un problema para exoesqueletos robóticos que se soportan solamente en un extremo. Adicionalmente, cuando se configuran para usar con el brazo del sujeto, todas las partes del exoesqueleto pueden localizarse fuera de la cabeza del sujeto, lo mismo detrás del sujeto o debajo del brazo. Esto contribuye a una experiencia más agradable para el sujeto.

En la modalidad mostrada en la Figura 2b, la conexión acoplada al carro tiene baja conformidad. Por el contrario, los diseños anteriores descritos anteriormente usan engranes o cables los cuales sufren de conformidad y holgura. Además, en la Figura 2b, el carro se acopla directamente a la unión 50 la cual tiene una posición fija con relación a la pista. Esto significa que el actuador acoplado al carro no se mueve junto con el carro. Esto reduce la inercia de la conexión sustancialmente.

Se debe notar que el acoplamiento mecánico del carro mediante el uso de las conexiones 44 y 46 puede lograrse además mediante el uso de cables (por ejemplo, un cable que hala para la extensión, uno para la flexión) o algún otro tipo de activación sobre la unión 50.

1.3 Acoplamiento remoto fuera del eje a una unión de un miembro que tiene un componente traslacional.

El enfoque descrito anteriormente para el acoplamiento remoto fuera del eje entre el exoesqueleto y una unión del miembro puede extenderse a situaciones más complejas. Por ejemplo, puede existir traslación del eje de rotación de la unión del miembro durante la articulación de la unión, tal que la posición del eje de rotación instantáneo de la unión varía en dependencia del ángulo de la unión. Un ejemplo de esta situación es la unión de la rodilla (Zatsiosky, 1998). En este caso, los mecanismos de acoplamiento remoto fuera del eje descritos en las Secciones 1.1 y 1.2 pueden adaptarse para capturar esta complejidad mediante la guía de la unión virtual a lo

largo de una trayectoria prescrita que coincide con la trayectoria del eje de rotación instantáneo de la unión del miembro cuando cambia el ángulo de la unión del miembro.

Por ejemplo, la modalidad de la Figura 1 puede modificarse mediante el reemplazo de uno o ambos de los dos paralelogramos con estructuras de cuatro barras que no son paralelogramos. En tal modalidad, el eje de la unión virtual instantánea se moverá a lo largo de una trayectoria bien definida. La modalidad de la Figura 3a ilustra un ejemplo de acoplamiento remoto fuera del eje a una unión virtual 110, donde ambos paralelogramos son conexiones de cuatro barras que no son paralelogramos. La Figura 3b muestra múltiples ejemplo de la modalidad de la Figura 3a superpuestas, mientras la conexión se escalona a través de un movimiento. Las líneas de guiones indican la conexión virtual en cada etapa, y la línea gruesa 112 que une los puntos de extremo de las líneas de guiones traza la trayectoria del eje de la unión virtual instantánea. En este ejemplo, es evidente que las etapas en el medio del movimiento exhiben principalmente rotación (con poca o ninguna traslación), mientras las etapas al comienzo y final del movimiento exhiben relativamente más traslación. El cambio de las longitudes de las conexiones en la conexión mecánica, la localización de las uniones de la conexión, y/o la posición de las esquinas fijas de la conexión cambian la forma de la trayectoria del eje de la unión virtual instantánea, que incluye la combinación relativa de rotación y traslación.

En otro ejemplo, la modalidad de la Figura 2b puede modificarse para reemplazar la pista curva de radio constante con una pista curva de radio variable. En tal modalidad, el eje de la unión virtual instantánea definido por la pista se limitará a una trayectoria bien definida. La modalidad de la Figura 4a ilustra el acoplamiento remoto fuera del eje de una unión virtual 120 para una pista elíptica 124 (aunque la pista puede ser de cualquier curvatura deseada). La Figura 4b muestra la localización de la conexión virtual (líneas de guiones) cuando la conexión se escalona a través de un movimiento. La línea gruesa 122 que une los puntos de extremo de las líneas de guiones traza la trayectoria del eje de la unión virtual instantánea. Es evidente que las etapas en el medio del movimiento exhiben principalmente rotación (con poca o ninguna traslación), mientras las etapas al comienzo y final del movimiento exhiben relativamente más traslación. El cambio de la curvatura de la pista cambia la forma de la trayectoria del eje de la unión virtual instantánea, que incluye la combinación relativa de rotación y traslación.

Una segunda situación a la cual las modalidades en las Figuras 3a y/o 4a puede aplicarse es en un exoesqueleto que captura el movimiento de más de una unión. Por ejemplo, existe una dependencia natural entre el movimiento de las uniones escapulohumeral y esternoclavicular del hombro durante el alcance. La Figura 5a es una vista superior de una representación esquemática de la unión esternoclavicular del miembro derecho 130 y la unión escapulohumeral 132, donde la clavícula se muestra por las líneas 134, y el húmero se muestra por las líneas 136 cuando el brazo hace un movimiento de alcance plano. Para alcances laterales, la unión esternoclavicular no contribuye mucho al movimiento del hombro completo. Cuando se hace un alcance en frente del torso, la unión esternoclavicular contribuye más al movimiento. Similarmente, la unión esternoclavicular contribuye más al movimiento cuando el alcance se hace hacia atrás. Las dos uniones tienen un acoplamiento natural el cual puede describirse por un solo eje de rotación instantánea virtual. Durante partes del movimiento que se deben principalmente a la unión escapulohumeral, el eje de rotación instantánea virtual será sustancialmente colineal con el eje de la unión escapulohumeral. Durante partes del movimiento que se deben principalmente a la unión esternoclavicular, el eje de rotación instantánea virtual será sustancialmente colineal con el eje de la unión esternoclavicular. Durante partes del movimiento que son una combinación de movimiento escapulohumeral y esternoclavicular, el eje de rotación instantánea virtual existirá en alguna parte entre los ejes de las uniones escapulohumeral y esternoclavicular. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 5b. La trayectoria de radio variable 140 es una traza del extremo del húmero en la Figura 5a. El eje de rotación instantánea virtual en un punto dado en 140 se localiza en el centro del círculo que define la curvatura en ese punto. La línea gruesa 142 es una traza de la trayectoria que el eje de rotación instantánea virtual sigue durante el movimiento de alcance. Siete puntos a lo largo de la trayectoria se muestran en la Figura 5b. La trayectoria 142 del eje de rotación instantánea virtual de este sistema de dos uniones puede mimificarse sustancialmente mediante el uso de una conexión mecánica de acuerdo con la modalidad ilustrada en la Figura 3a, o mediante el uso de una pista curva con radio variable como se muestra en la modalidad de la Figura 4a.

2. Acoplamiento remoto en el eje de una unión, mientras se acomodan varios tamaños de miembros

El problema que se direcciona por las modalidades en esta sección es cómo acoplar remotamente en el eje una unión del miembro mientras se acomodan sujetos de tamaños variables, sin tener que modificar las longitudes de ninguna de las estructuras de la conexión más allá de esas pasivamente paralelas a la geometría del miembro (es decir, para propósitos de interfaz). Por ejemplo, en el KINARM (Scott, 1999), la longitud del brazo superior del KINARM debe ajustarse por propósitos de interfaz para acomodar sujetos de tamaños variables. Adicionalmente, la conexión acopladora del KINARM debe ajustarse además en longitud (la conexión acopladora del KINARM es parte de la conexión mecánica que acopla remotamente en el eje la unión del codo). Las siguientes modalidades proporcionan mecanismos de manera que, por ejemplo, la longitud del brazo superior del KINARM sería la única parte de la conexión que requiere ajuste para sujetos de tamaños variables.

En una modalidad, un exoesqueleto robótico incluye una conexión mecánica que tiene articulación alrededor de una pluralidad de uniones, en donde una primera unión de la conexión mecánica se acopla remotamente en el eje a una segunda unión, la cual es una unión del miembro u otra unión de conexión que es sustancialmente colineal con una unión del miembro. Las siguientes restricciones se aplican además:

(i) La distancia entre las uniones acopladas es ajustable y/o variable
(ii) Para los segmentos del miembro que están entre la segunda unión acoplada y la primera unión acoplada o el suelo, al menos una de las distancias entre las uniones del miembro adyacentes es ajustable (por ejemplo para sujetos de tamaño variable);
(iii) La porción de la conexión mecánica que proporciona el mecanismo de acoplamiento entre las uniones acopladas se comprende de conexiones de longitud fija.

En otra modalidad, un exoesqueleto robótico incluye una conexión mecánica que tiene articulación alrededor de una pluralidad de uniones, en donde un eje de una unión de la conexión mecánica se acopla a otra unión de la conexión. Tal acoplamiento puede lograrse entre cualquier dos uniones de la conexión mecánica que no tienen ejes colineales, y en el cual una unión (de ahora en adelante referenciada como la segunda unión acoplada) se localiza en una conexión mecánica que tiene N uniones, donde (N ≥ 2), y la otra unión (de ahora en adelante referenciada como la primera unión acoplada) se localiza en el suelo o en la misma conexión. En algunos ejemplos la primera unión acoplada puede referenciarse además como la unión de accionamiento, y la segunda unión acoplada puede referenciarse además como la unión remota en el eje. La distancia entre la segunda unión acoplada y la primera unión acoplada puede ser ajustable y/o variable, y la conexión mecánica puede tener además una o más de las restricciones siguientes:

(a) Para las uniones de la conexión mecánica que están entre la segunda unión acoplada y la primera unión acoplada o el suelo, una de las distancias entre las uniones adyacentes es ajustable (es decir, una de las conexiones tiene una distancia que puede ajustarse);
(b) el eje de la primera unión acoplada no es colineal con ninguno de los ejes de unión de la conexión mecánica;
(c) la segunda unión acoplada es la unión n^{th}, donde $n \geq 4$; o
(d) cualquier combinación de (a), (b), y/o (c).

2.1 Acoplamiento dentro de un plano

La Figura 6a muestra una modalidad de una conexión mecánica de dos paralelogramos de un exoesqueleto robótico, la cual satisface las restricciones listadas anteriormente. En esta modalidad, cuando el codo se mueve por todo el espacio para un sujeto determinado, la distancia entre las uniones acopladas es variable. La conexión mecánica se muestra sujetada a un brazo, en dos posiciones del brazo. La primera unión acoplada de la conexión mecánica, indicada en 11, tiene su eje fijo al suelo, y es además el punto en el cual la conexión mecánica se conecta a un motor de accionamiento (no mostrado). La segunda unión acoplada, la cual se acopla remotamente en el eje a la primera unión acoplada 11, se indica en 15. Como se muestra, la conexión mecánica proporciona acoplamiento remoto en el eje al codo. El motor de accionamiento en 11 para la conexión mecánica no se localiza en el eje de la unión del codo; sin embargo, la unión 15 del exoesqueleto es sustancialmente coaxial con la unión del codo. Las conexiones 13a y 13b forman una conexión compartida entre los dos paralelogramos, y se unen rígidamente juntas (por ejemplo, se hacen de una sola pieza de material) tal que el ángulo entre ellas no cambia cuando el resto de la conexión mecánica cambia. Se apreciará que los marcos de coordenadas de los dos paralelogramos de esta modalidad se mantienen en alineación (es decir, los marcos de coordenadas no giran con relación a uno al otro) cuando el miembro se mueve a través de diferentes posiciones.

Se nota que la modalidad de la Figura 6a no necesita ajustarse para diferentes posiciones del codo cuando la posición del hombro se mueve o el hombro gira (es decir, puesto que la estructura de paralelogramo se mantiene por defecto cuando la conexión mecánica cambia de posición).

Se apreciará que los dos paralelogramos mostrados en la Figura 6a pueden reemplazarse con cualquier estructura de cuatro lados. Sin embargo, la ventaja de usar una estructura similar a un paralelogramo, como se muestra en la Figura 6a, es que es más fácil resolver la relación cinética y cinemática entre la unión de accionamiento de la conexión mecánica y la unión acoplada remotamente en el eje del miembro (es decir, ángulos, momentos, etc. son iguales en las dos uniones). Los paralelogramos pueden reemplazarse además con estructuras aparte de cuadriláteros (mayores de 4 lados); sin embargo, las estructuras que tienen más conexiones tendrían más grados de libertad, lo cual requeriría control.

Se apreciará que los dos paralelogramos definidos por las conexiones pueden formarse además mediante el uso de cables, como se muestra por los guiones pequeños en la Figura 6b. La Figura 6b muestra además cómo el

mecanismo mantiene el acoplamiento remoto en el eje de la unión del codo cuando la unión del hombro se hace girar. Un ejemplo de tal modalidad se incorpora dentro de la modalidad de la Figura 9 (ver sección 3.2).

La Figura 6c muestra una modalidad similar a la de la Figura 6a en la cual la unión del suelo 11 (es decir, la primera unión acoplada) es colineal con la unión del hombro. Adicionalmente, la conexión 19, la cual es opcional, se ha añadido. La conexión 19 conecta los dos paralelogramos entre las uniones 15 y 11. Además, el enlace de la conexión 19 en la unión 15 puede ser ajustable, para así permitir el ajuste del exoesqueleto para diferentes longitudes del brazo superior. Esta modalidad proporciona un ejemplo en el cual la distancia entre las uniones acopladas es constante para un sujeto dado cuando el codo se mueve por todo el espacio, pero es ajustable para sujetos de diferentes tamaños. Se nota que la modalidad de la Figura 6c requiere solamente un ajuste sencillo en la unión 15, lo cual ayuda a mantener el desempeño correcto del exoesqueleto cuando se ajusta para miembros de diferentes sujetos. Es decir, en la modalidad de la Figura 6c, cuando la conexión mecánica se ajusta para diferencias en la longitud del brazo superior, no hay necesidad de ajustar las conexiones del mecanismo del codo, puesto que la estructura de paralelogramo se mantiene por defecto. En la modalidad de la Figura 6d, las conexiones de la modalidad de la Figura 6c se han reemplazado por cables y poleas.

2.2 Acoplamiento fuera del plano

Se apreciará que no es esencial que los ejes de las primera y segunda uniones acopladas, alrededor de los cuales ocurrirá el acoplamiento, sean paralelos. Por ejemplo, la Figura 7 muestra una modalidad basada en la conexión mecánica de pista curva de la Figura 2b, la cual proporciona articulación en un primer plano indicado por la flecha H y en un segundo plano indicado por la flecha V. En esta modalidad, la segunda unión acoplada (el codo) se acopla por un sistema de cables (cables no mostrados). Los cables forman el equivalente de una estructura de dos paralelogramos, pero pueden guiarse en cualquier dirección para así proporcionar acoplamiento remoto en el eje fuera del plano.

3. Acoplamiento de dos o más uniones de un miembro en donde una unión se acopla fuera del eje

Las modalidades descritas anteriormente pueden combinarse en varias formas para proporcionar una conexión robótica adecuada para el acoplamiento a múltiples uniones de un miembro para sujetos de tamaños variables. Los ejemplos de tales modalidades se describen a continuación.

3.1 Conexión mecánica de paralelogramo

La modalidad de la Figura 1a proporciona una conexión mecánica para el acoplamiento mecánico fuera del eje de una unión de un miembro. Esta modalidad puede combinarse con la de la Figura 6a para proporcionar el acoplamiento remoto fuera del eje simultáneo de una primera unión de un miembro y el acoplamiento remoto en el eje de una segunda unión de un miembro (o más generalmente, para cualquier dos uniones de un miembro). Por ejemplo, la Figura 8a muestra una vista inferior de tal modalidad en la cual las conexiones mecánicas de las Figuras 1a y 6a se combinan para proporcionar un exoesqueleto de cuatro paralelogramos. Es decir, ocho conexiones adicionales 30 a 37 (32 + 34 y 36 + 12 se unen como estructuras rígidas (es decir, a un ángulo relativo fijo), tal que el ángulo entre ellas no cambia cuando el resto de la conexión mecánica cambia), se añaden a la modalidad de la Figura 1a para formar dos estructuras de paralelogramo adicionales. En el caso del brazo, como se muestra, la unión del hombro se acopla remotamente fuera del eje y el codo es la segunda unión del miembro que se acopla remotamente en el eje. En esta modalidad, el eje alrededor del cual la unión del suelo 11 se acopla remotamente en el eje a la unión 15 no es colineal con los ejes de las uniones 16 o 18 de la conexión mecánica, y la conexión puede ajustarse para diferencias en la distancia entre la segunda unión (el codo) y la primera unión (el hombro) sin alterar la estructura de paralelogramo de las conexiones de la unión remota en el eje (el codo) o la estructura de paralelogramo de la conexión que proporciona acoplamiento remoto fuera del eje a la primera unión (el hombro).

La modalidad mostrada en la Figura 8b es sustancialmente la misma que la de la Figura 8a, pero se implementa con menos conexiones para así simplificar el exoesqueleto. Las conexiones 20, 22, 24a+24b, 28, 30+12, 2, y 4 forman una estructura de dos paralelogramos y siete conexiones, donde las conexiones 24a + 24b, y 30 + 12 son estructuras rígidas (es decir, a un ángulo relativo fijo), tal que el ángulo entre ellas no cambia cuando el resto de la conexión mecánica cambia. La conexión mecánica se muestra en dos posiciones que corresponden a la articulación del antebrazo, que muestran cómo la conexión mecánica se comporta cuando el ángulo de la unión remota en el eje (en este ejemplo, el codo) se cambia. Dos de los cuatro paralelogramos, que corresponden a la modalidad de la Figura 6a, se resaltan en la Figura 8c. En esta modalidad, la unión del suelo 16 que se acopla remotamente en el eje a la unión del codo no se alinea con la primera unión 18 de la conexión mecánica. Dos de las conexiones 2 y 4 en la estructura de dos paralelogramos y siete conexiones se comparten con las conexiones que accionan la primera unión 18, aunque este no tiene que ser el caso (ver a continuación).

Se nota que en algunas modalidades, como la mostrada en la Figura 8b, para ajustar la conexión mecánica para

la longitud del miembro (es decir, el brazo superior), la conexión del hombro (es decir, la conexión que corresponde a la Figura 1a) debe ajustarse para mantener la estructura de paralelogramo. Luego la conexión del codo (es decir, las conexiones 2, 4, 20, 22, 24a, 24b, 28, 30, 12 de la Figura 8b) no serán más una estructura de paralelogramo, así que esta conexión debe ajustarse consecuentemente. Esto es porque las conexiones 2 y 4 se comparten entre las conexiones del hombro y el codo. Sin embargo, la modalidad de la Figura 8a simplifica la tarea de configurar el exoesqueleto para miembros de diferentes tamaños, puesto que la conexión de unión remota en el eje (el codo) (es decir, las conexiones 30 a la 37, 12 de la Figura 8a) no necesitan ajustarse si la longitud del miembro cambia. La conexión mecánica que pertenece a la unión proximal (el hombro) (es decir, las conexiones 2, 4, 6, 8, 10 de la Figura 8a) también no necesitan ajustarse si la longitud del miembro cambia, puesto que todo lo que se requiere es cambiar la unión 15 a lo largo de la conexión 10. El requerimiento reducido para ajustar la conexión para diferentes tamaños de miembros reduce la posibilidad de errores en el desempeño del exoesqueleto lo cual podría originarse de una conexión mecánica ajustada inapropiadamente.

Para algunos dispositivos anteriores, tal como la conexión robótica descrita en la patente de Estados Unidos No. 6,155,993 la cual incluye un solo paralelogramo, para ajustar esa conexión mecánica a la posición del codo de un sujeto, dos conexiones del paralelogramo necesitan ajustarse precisamente a la misma longitud para mantener la estructura de paralelogramo y el correcto desempeño de la conexión. Así, los dispositivos existentes pueden mejorarse con una conexión mecánica tal como la mostrada en la Figura 6b para acoplar mecánicamente una unión remota (por ejemplo, el codo) y simplificar el ajuste del exoesqueleto a diferentes longitudes del miembro.

3.2 Conexión mecánica de pista curva, dos DOF

La modalidad de la Figura 2a proporciona una conexión mecánica para el acoplamiento remoto fuera del eje de una unión del miembro. Esta modalidad puede combinarse con la modalidad de la Figura 6b para proporcionar el acoplamiento remoto fuera del eje simultáneo de una unión de un miembro y el acoplamiento remoto en el eje de otra unión del miembro. La Figura 9 muestra tal modalidad, que proporciona dos DOF de la articulación: en el caso del brazo, estos corresponden a un DOF en el hombro y un DOF en el codo. En la modalidad mostrada en la Figura 9a, una unión en 50 se usa para proporcionar acoplamiento remoto fuera del eje a la unión 41 (la unión del hombro) como en la modalidad de la Figura 2b. Esta unión en 50 se conecta rígidamente a la conexión 44, y por lo tanto el carro 42 se acciona alrededor del eje de la unión del hombro 41. Una segunda unión en 50 se usa para proporcionar acoplamiento remoto en el eje a la unión 54 (la unión del codo) como en la modalidad de la Figura 6b. Esta segunda unión en 50, la cual no se conecta a la conexión 44, se conecta a cables de lazo cerrado (mostrado como pequeños guiones) que se acoplan remotamente en el eje a la unión 54, la cual se conecta rígidamente a la conexión 48, para así accionar la unión del codo. Los cables forman el equivalente a una estructura de dos paralelogramos y siete conexiones para accionar la unión remota en el eje (el codo), y se conectan a un motor. Los motores que accionan ambas uniones en 50 pueden accionarse de vuelta además por la conexión mecánica. Dos de las conexiones (44 y 46) en la estructura de 2 paralelogramos y 7 conexiones se comparten con las conexiones que acoplan la primera unión (el hombro), aunque este no tiene que ser el caso.

La modalidad de la Figura 9b muestra el mismo acoplamiento remoto en el eje y fuera del eje que la Figura 9a, excepto que ambas uniones en 50 se accionan por un sistema de cable de acabado abierto. En esta modalidad ninguna de las uniones en 50 se conectan rígidamente a la conexión 44. Tres cables, 60, 62, y 64 se configuran para actuar como una conexión rígida a la conexión 44 y como un acoplamiento remoto en el eje a la unión 54 mediante la aplicación de combinaciones apropiadas de fuerzas a los cables. Este sistema de lazo abierto acciona ambas uniones del hombro y el codo, y los cables se conectan a los motores 68. Los motores pueden accionarse de vuelta además por la conexión mecánica.

3.3 Conexión mecánica de pista curva, tres DOF

Como se muestra en la Figura 10, otra modalidad proporciona un tercer DOF mediante la adición de la unión 56. Donde el brazo es el miembro de interés, y las primeras dos uniones son el hombro y el codo, este tercer DOF corresponde a la muñeca. Esta modalidad puede adaptarse para usar con la pierna, en cuyo caso los tres DOE corresponden a la cadera, la rodilla, y el tobillo.

El exoesqueleto robótico de tres DOF mostrado en la Figura 11a y la Figura 12 se construyó basado en la modalidad mostrada en la Figura 10. Esta modalidad combina un número de modalidades descritas previamente, que incluye la modalidad de la Figura 9b para el acoplamiento remoto fuera del eje de la unión del hombro y el acoplamiento remoto en el eje de la unión del codo, más una modalidad de la Figura 6a y 6c para acoplar remotamente en el eje la unión de la muñeca. La unión 56 que corresponde a la muñeca se acopla remotamente en el eje a una unión de accionamiento 54 que corresponde al codo (mediante la conexión mostrada en la Figura 6c), y la unión de accionamiento 54 se acopla remotamente en el eje a una unión de accionamiento 50 sujetada al suelo mediante la conexión de la Figura 6a.

Esta modalidad extiende así una de las características de la modalidad de la Figura 6a, esto es que una segunda unión acoplada de una conexión mecánica (tal como, por ejemplo, una unión que corresponde al codo, con relación al hombro) puede acoplarse a una tercera unión (tal como, por ejemplo, una unión que corresponde a la muñeca, con relación al hombro y al codo), así como para proporcionar una unión de accionamiento intermedia entre dos uniones acopladas remotamente. Es decir, una unión acoplada remotamente (segunda) de una conexión mecánica puede usarse como una unión de accionamiento para una unión acoplada subsecuente (tercera) de la conexión.

Note que en la modalidad de la Figura 10, las longitudes de la conexión virtual 43 (el brazo superior) y la conexión 66 (el antebrazo) pueden ajustarse para diferentes longitudes del miembro sin ajustar ninguna de las otras conexiones en la conexión mecánica que proporciona el acoplamiento mecánico (es decir las conexiones 44, 46, 67, 68).

La conexión articulada 44, 46 que acciona el carro 42 sirve además para guiar los cables a lo largo del mecanismo. Una segunda conexión 67, 68 guía los cables entre las uniones del codo y la muñeca. Estas conexiones aseguran que se mantiene la tensión en los cables cuando se ajusta la longitud del mecanismo 66 (por ejemplo, para diferentes longitudes del miembro). Todas las conexiones pueden maquinarse de aluminio u otro material adecuado para mantener la masa y las propiedades inerciales bajas. Cada unión puede proporcionarse con un límite mecánico para evitar que el movimiento del exoesqueleto se extienda más allá de los límites seguros del miembro de un sujeto.

En la modalidad mostrada en las Figuras 11 y 12, los tres DOF pueden activarse por un sistema de accionamiento por cable de acabado abierto. Los sistemas de accionamiento por cable de acabado abierto pueden aplicar fuerza en una dirección solamente, por lo que es necesario tener al menos un cable más que DOF para lograr el movimiento en ambas direcciones rotacionales en cada unión. Así cuatro cables accionados por motores eléctricos se requieren para lograr la capacidad de movimiento completa. Se apreciará que un sistema accionado por cable de lazo cerrado puede usarse además para la modalidad mostrada en la Figura 10 de una manera análoga a la descrita para la conexión mecánica de pista curva de dos DOF_(sección 3.2).

Como una consecuencia del desbalance entre el número de cables y DOF en sistemas de accionamiento por cable de lazo abierto, se requieren transformaciones adicionales para relacionar el movimiento de los motores al movimiento en las uniones. Primero que todo, los cables abarcan múltiples uniones, por lo que el movimiento y momento alrededor de una sola unión se comparte entre los cables. Además, la posición de la conexión articulada que acciona el carro afecta la longitud de los cables, y por lo tanto debe incluirse en los cálculos. En conjunto, el desplazamiento del cable, s, y el ángulo de la unión, θ, se relacionan mediante el uso (1). Igualmente, la fuerza del cable, ξ, y el momento de la unión, τ, se relacionan mediante el uso (2). Estas relaciones se ilustran en la Figura 11b.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{sd} & r_e & -r_w & -1 \\ r_{sd} & -r_e & -r_w & 1 \\ -r_{sd} & -r_e & r_w & 1 \\ r_{sd} & r_e & r_w & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{sd} \\ \theta_e \\ \theta_w \\ \theta_{hl} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{sd} \\ \tau_e \\ \tau_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{sd} & r_{sd} & -r_{sd} & r_{sd} \\ r_e & -r_e & -r_e & r_e \\ -r_w & -r_w & r_w & r_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

Note el uso del subíndice 'sd', el cual se refiere a la unión de accionamiento del hombro (es decir, la unión 50), no al ángulo de la unión del hombro (θ_s) (es decir, la unión 41), la cual puede calcularse mediante el uso de relaciones de conexión de cuatro barras estándar. La contribución del movimiento de la conexión articulada al desplazamiento del cable se denota por θ_{hl}.

La elección del esquema de recorrido del cable para un sistema de accionamiento por cable de acabado abierto tiene un efecto significativo en el desempeño del exoesqueleto. En teoría, existen cinco esquemas de recorrido

del cable únicos para una conexión mecánica de tres DOF (Lee, 1991). Estos esquemas se analizaron mediante el uso del método propuesto por Lee (1991) para encontrar la elección la cual tiene el antagonismo mínimo entre los cables y por lo tanto la distribución más uniforme de las fuerzas a través de los cables, y además tiene las fuerzas pico más bajas. La Figura 11b ilustra el esquema de recorrido óptimo para la modalidad de tres DOF.

Las localizaciones de la unión del codo y la muñeca son ajustables (como resultado de la utilización de las modalidades de la Figura 6) para acomodar sujetos con diferentes longitudes del brazo superior y el antebrazo. El ajuste del codo puede hacerse mediante el deslizamiento del mecanismo con relación al carro. Una abrazadera de liberación rápida sencilla puede usarse para sujetar el mecanismo en su lugar. La conexión del antebrazo puede ser telescópica y sujetada por tornillos de mariposa.

El sujeto se asegura al mecanismo en el brazo superior y el antebrazo mediante el uso de artesas de brazo hechas de, por ejemplo, fibra de vidrio moldeada, la cual puede ajustarse a lo largo de las conexiones. Un mango puede proporcionarse para el sujeto agarrarse. Las artesas y el mango pueden ajustarse con una abrazadera de tornillo mariposa sencilla. Adicionalmente para sujetar el brazo del sujeto al exoesqueleto, es necesario alinear la unión del hombro con el robot. Esto puede lograrse simplemente a través del ajuste de la posición de la silla.

3.3.1 Modelo dinámico y simulación

Un modelo dinámico se creó en MATLAB basado en la caja de herramientas del robot (Corke, 1996). Las simulaciones se usaron para seleccionar los motores y cables apropiados, y para ayudar con el diseño estructural.

El modelo se definió como un manipulador de cuerpo rígido estándar con dinámica del cable despreciable. Los parámetros dinámicos del exoesqueleto se estimaron de los dibujos CAD, y los parámetros del miembro superior se calcularon a partir de tablas de datos antropométricos basado en la altura y peso del sujeto (Winter, 1990). El modelo calculó primero los momentos de unión requeridos para lograr una trayectoria dada. Las fuerzas del cable requeridas para generar estos momentos de unión se calcularon entonces mediante el uso de la técnica que resuelve el momento, la cual incluye un fuerza de pretensión para evitar que los cables se aflojen (Lee, 1991). Todas las fuerzas y momentos no axiales en cada unión se calcularon para evaluar la resistencia de la unión.

Las simulaciones se realizaron para varios movimientos de alcance con una velocidad de punto final pico de 1.0 m/s. Los movimientos incluyeron el movimiento de una sola unión a través de cada rango completo de la unión, y una variedad de movimientos de alcance de uniones múltiples. En todos los casos, las mediciones del miembro antropométrico se seleccionaron para satisfacer los requerimientos de diseño máximos. Los motores, los radios de los engranes, los cables y los cojinetes de la unión se seleccionaron basado en los resultados de estas simulaciones. La capacidad de momento total de cada unión del exoesqueleto con un radio del engrane de 3 para cada motor es ± 9 Nm (estático) y ± 15 Nm (dinámico). Cada motor incorpora un freno eléctrico para asegurar que los cables permanecen en tensión cuando la energía se apaga. Cada motor tiene un codificador de alta resolución incorporado capaz de medir el ángulo de unión en incrementos de 0.006°. Adicionalmente, codificadores secundarios pueden montarse directamente a cada una de las tres uniones.

3.3.2 Desempeño

El exoesqueleto se ensambló y las pruebas iniciales confirmaron que los ángulos de unión se calcularon correctamente mediante el uso de cambios en la longitud del cable. El robot podía moverse pasivamente mientras la pretensión se aplicó a todos los cables, y los momentos podían aplicarse independientemente y a través de uniones múltiples. Se implementó el control de posición básico, y campos de fuerza de punto final que simulan una pared virtual que podía aplicarse además. Mediciones de la fricción, inercia y conformidad del exoesqueleto como se ve por las uniones del miembro se midieron.

La Figura 13 muestra los resultados de una tarea de alcance básica mediante el uso del exoesqueleto. La Figura 13a muestra el diseño de la tarea. El sujeto realizó movimientos de alcance desde un objetivo central hasta ocho objetivos periféricos como se muestra. Los ángulos del hombro, codo y muñeca se grabaron por un sistema de adquisición de datos conectado a sensores de posición en las uniones del exoesqueleto durante los movimientos de alcance. Las trayectorias de la mano durante los movimientos de alcance hacia afuera se muestran en la Figura 13b. La Figura 13c muestra los ángulos de unión individual para un movimiento.

4. Exoesqueleto robótico tridimensional (3-D)

Una limitación con los exoesqueletos robóticos disponibles actualmente es que pocos son capaces de replicar el rango completo de movimiento del complejo de hombro humano. En particular, el movimiento de la cintura del hombro se replica pobremente. Un dispositivo robótico anterior (ver la publicación de la patente de los Estados

Unidos No. US2003/0115954A1) proporciona dos DOF en la unión esternoclavicular, pero en ese diseño algún equipamiento para esos dos ejes se localiza en los dos ejes de unión, que resultan en un equipamiento que se localiza cerca y alrededor de la cabeza del usuario. La modalidad descrita a continuación supera esta limitación.

En consecuencia, otra modalidad de la invención se refiere a un exoesqueleto robótico que proporciona seis grados de libertad (DOF), que permiten sustancialmente para el rango completo de la articulación del miembro superior ser evaluado y/o rehabilitado. Cuando se configura para el uso con el miembro superior, el exoesqueleto robótico de la modalidad actual proporciona control independiente de todos los cinco principales DOF en el complejo del hombro mediante el acoplamiento de cinco uniones del exoesqueleto a los cinco ejes de rotación que representan los 5 DOF del complejo del hombro. En particular, 2 uniones del exoesqueleto se acoplan a la unión esternoclavicular con todo el equipamiento localizado detrás del usuario, y ningún equipamiento se coloca encima de la cabeza del usuario. Esta modalidad representa una mejora sustancial sobre otros dispositivos robóticos conocidos, los cuales o no pueden proporcionar control de todos los cinco principales DOF del complejo del hombro o lo hacen en una manera que requiere equipamiento encima y cerca de la cabeza del usuario. Las características cruciales del exoesqueleto incluyen:

- Control independiente de los cinco DOF del complejo del hombro (dos DOF en la unión esternoclavicular, tres DOF en la unión escapulohumeral), y un DOF en el codo, con un área de trabajo similar al área de trabajo de un miembro superior típico.
- Los actuadores y el exoesqueleto dimensionados para acomodar sujetos desde 1.4 m hasta 2.0 m en altura, y que pesen hasta 115 kg.
- Facilidad de accionamiento posterior alta, baja masa e inercia para minimizar la influencia en el movimiento natural.
- Permite la simplificación del mecanismo a un movimiento hombro/codo de dos DOF en cualquier plano.
- Evita las configuraciones singulares por toda el área de trabajo.
- Maximiza la manipulabilidad a través del área de trabajo.
- Seguro y confortable para sujetos con deficiencias motoras.
- Rápido y fácil de configurar para un sujeto.

La Figura 14 muestra una modalidad del exoesqueleto robótico de 3-D configurado para el miembro superior derecho. El exoesqueleto 100 se monta a una estructura soporte 90, y el sujeto se rueda hacia dentro de la posición mediante el uso de una silla móvil 80. Existe un espacio para el operador llegar al lado del exoesqueleto durante el proceso de configuración. El exoesqueleto consiste de dos subsistemas principales: el mecanismo de hombro/codo (cuatro DOF para mover el brazo superior y el antebrazo), y el mecanismo de cintura del hombro (dos DOF para mover la unión escapulohumeral con relación al torso alrededor de la unión esternoclavicular).

El término "ejes de la unión esternoclavicular" como se usa en la presente, se refiere a los dos ejes de rotación que representan los dos DOF de la unión esternoclavicular, y el término "centro de la unión esternoclavicular" como se usa en la presente se refiere al punto de intersección de los ejes de la unión esternoclavicular. El término "ejes de la unión escapulohumeral" como se usa en la presente, se refiere a los tres ejes de rotación que representan los tres DOF de la unión escapulohumeral, y el término "centro de la unión escapulohumeral" como se usa en la presente se refiere al punto de intersección de los ejes de la unión escapulohumeral.

Esta modalidad de seis DOF incorpora modalidades descritas en secciones previas, anteriormente. Por ejemplo:

A) El acoplamiento alrededor del segundo eje de la unión esternoclavicular (mecanismo de cintura del hombro) se basa en el acoplamiento remoto fuera del eje de la modalidad mostrada en la Figura 2b.
B) El acoplamiento remoto en el eje alrededor de todos los tres ejes en la unión escapulohumeral se basa en las modalidades de la Figura 6b, en las cuales la segunda unión acoplada (Figura 17, localizada cerca de la flecha de "ajuste lineal") actúa como una unión de accionamiento a sí misma, y se acopla a los ejes de la unión escapulohumeral a través de cables y poleas.
C) El eje de unión del codo se acopla remotamente en el eje de la misma manera que los ejes de la unión escapulohumeral y adicionalmente incluye una conexión mecánica basada en la modalidad de la Figura 6c, entre el último eje de la unión escapulohumeral y la unión del codo (es decir, la unión de accionamiento de la conexión mecánica se localiza en el último eje de la unión escapulohumeral, pero esta unión en sí misma se acopla de vuelta a un motor en el suelo, como se describió en B, anteriormente). Esto permite que la longitud de la conexión que une el eje de la unión del codo y el último eje de la unión escapulohumeral se ajusten para diferentes longitudes del brazo superior.

El exoesqueleto 3-D no se limita a la estructura descrita en la presente, ya que otras configuraciones y disposiciones de la conexión mecánica son posibles para así acoplar más o menos uniones de un miembro, y/o proporcionar más o menos DOF a una o más uniones seleccionadas de un miembro.

Mediante la incorporación de las características de diseño descritas anteriormente, el exoesqueleto tridimensional (3-D) proporciona características beneficiosas que incluyen, pero no se limitan a, la localización de los motores y la conexión mecánica fuera de la cabeza del sujeto. Como con el exoesqueleto plano descrito anteriormente, el exoesqueleto 3-D puede usarse para evaluar y diagnosticar déficits de la función motora en sujetos, así como también para rehabilitación, terapia, e investigación.

4.1 Mecanismo de hombro/codo

El mecanismo de hombro/codo (Figura 15a) es un mecanismo de cuatro DOF en el cual los tres ejes de la unión esférica de tres DOF se acoplan a los tres ejes de unión de la unión escapulohumeral y una unión de rotación sencilla se acopla a la unión del codo. Este se activa completamente por una transmisión de accionamiento por cable la cual se acciona por cinco motores eléctricos localizados en la base (suelo) del exoesqueleto. El radio del engrane en conjunto (es decir, la reducción del engrane ocurre en dos etapas: una ocurre donde los cables se enrollan, y la segunda ocurre en el motor mediante el uso de correas de distribución) para cada una de las cuatro uniones se ajusta tal que el robot mantiene la facilidad de accionamiento posterior sin la necesidad de sensores de fuerza/momento. Un radio del engrane en conjunto de ocho se ha encontrado que es adecuado. El mecanismo ligero se sujeta al lado lateral del brazo del sujeto mediante el uso de dos brazaletes de brazo ajustables, los cuales son los únicos puntos de sujeción física al sujeto. Brazaletes de brazo inflables o acolchonados pueden usarse para mayor comodidad.

4.1.1 Orientación de los tres ejes de la unión escapulohumeral

El movimiento escapulohumeral se logra mediante el uso de una unión esférica hecha de tres ejes de unión de revoluciones que se intersecan conectados en serie. Un problema principal con las uniones esféricas es que siempre es posible alcanzar una configuración singular (donde se pierde un DOF) mediante hacer girar el eje de la segunda unión para que así los tres ejes se vuelvan coplanares. El orden y la orientación relativa de estos tres ejes se optimizaron para asegurar que el exoesqueleto no alcanza la singularidad dentro del área de trabajo del sujeto (como se especifica en Ball y otros, 2007a), que la manipulabilidad se maximiza, y que las colisiones con el sujeto o en sí no ocurren sobre el área de trabajo completa. El proceso de optimización se describe a continuación.

Se apreciará que es útil ser capaz de bloquear mecánicamente la conexión mecánica de seis DOF dentro de un exoesqueleto plano de dos DOF (movimiento del hombro de un DOF y del codo de un DOF solamente) en cualquier plano (es decir, no se limita a la vertical o la horizontal). Esto permitiría a la conexión mecánica funcionar en una configuración más simple, la cual puede ser más apropiada para algunos propósitos de evaluación o tratamiento. Para lograr esto, el eje de la tercera unión de la unión esférica (el último eje de la unión escapulohumeral) se escoge para ser paralelo al eje de la unión del codo (ver Figura 15a). Así, los primeros cuatro ejes de unión de la conexión mecánica (ambos ejes de unión de la unión esternoclavicular y los primeros dos ejes de la unión glenohumaral) pueden posicionarse para seleccionar el plano deseado, y luego bloquearse físicamente. Cuando se bloquean, los primeros cuatro ejes de unión de la conexión mecánica no son parte del movimiento de la conexión plana simplificada.

Con la orientación del tercer eje de la unión escapulohumeral escogida, las orientaciones de los dos ejes de unión restantes se determinaron entonces como sigue. Se fue directo a determinar que el eje de la segunda unión debería ser perpendicular al tercer eje (y en el plano horizontal) con el propósito de evitar singularidades en el área de trabajo. Esta configuración además tiene el beneficio añadido de permitir la flexión/extensión básica o los movimientos de aducción/abducción para controlarse mediante el uso de un solo eje de unión.

Para determinar la orientación óptima del primer eje de unión, se desarrolló un procedimiento iterativo para calcular el producto de caja, M, en cada configuración en el área de trabajo. El producto de caja se define como:

$$M = z_1 \times (z_2 \times z_3) \qquad (3)$$

donde z_i son los vectores de unidad que corresponden a los ejes de la unión escapulohumeral. Cuando M = 1, los ejes de unión son ortogonales y la manipulabilidad se maximiza. Cuando M = 0, los ejes de unión son coplanares y se pierde un grado de libertad (es decir, configuración singular). El procedimiento se resume como sigue, y los resultados paso a paso se muestran en la Figura 16:

1) La orientación del eje de la primera unión se definió con relación el eje de la segunda unión en términos de dos parámetros optimizables (α y ß, como se muestra en la Figura 15a).
2) Con θ_1 y θ_3 fijos, la manipulabilidad (M) se calculó para una combinación de α y ß mientras θ_2 se varió (corresponde a abducción, como se muestra en la Figura 16b).

3) El ángulo de abducción singular ($\theta_{2\ (M=0)}$) y la manipulabilidad máxima (M_{max}) se calcularon y graficaron para todas las combinaciones de α y ß (Figura 16c).
4) Un rango de combinaciones de α y ß que alcanzó un compromiso factible entre la M_{max} alta y $\theta_{2\ (M=0)}$ grande se reveló (es decir, $0.8 < M_{max} < 0.95$ y $120° < \theta_{2\ (M=0)} < 140°$). Los siguientes procedimientos iterativos se usaron entonces para seleccionar una combinación de α y ß dentro de este rango.
5) M se calculó para el área de trabajo completa de la unión esférica para un α y ß dado (todas las tres uniones variadas a través de sus rangos de movimiento, como se muestra en la Figura 16d).
6) Si algunos puntos estuvieran dentro de 10° de sin gularidad (M < 0.15) o si el exoesqueleto pudiera colisionar con el sujeto, el proceso se repetiría desde la etapa 5 mediante el uso de una combinación diferente de α y ß.
7) El proceso se repitió hasta que no hubieron singularidades en el área de trabajo, y la manipulabilidad fue tan alta como es posible sobre el área de trabajo.

Los ángulos finales que proporcionaron la disposición óptima de los ejes de unión esférica para las restricciones de diseño dadas son α = 45° y ß = 40°. La manipulabilidad máxima es 0.85 y promedio es 0.75 a través del área de trabajo.

4.1.2 Sistema de accionamiento por cable

Los ejes de unión del mecanismo de hombro/codo se acoplan remotamente en el eje a través del mecanismo de cintura del hombro (el cual se describe en la Sección 4.2 a continuación) con una transmisión de accionamiento por cable de acabado abierto activada por motores eléctricos. Los mecanismos activados por cable tienen una relación de peso a energía alta puesto que todos los motores pueden colocarse en la base fija (es decir, el suelo). Esto reduce significativamente el tamaño, la masa y las propiedades de inercia del robot, y ayuda a reducir los requerimientos de salida de momento del motor. Los sistemas de cable de acabado abierto distribuyen cargas a través de varios cables, lo cual reduce además los requerimientos del actuador. El mecanismo en conjunto se vuelve más transparente (es decir menos perceptible) al sujeto. Los sistemas de accionamiento por cable de acabado abierto requieren transformaciones adicionales para controlar el robot (Tsai, 1999). Esto es debido en parte al hecho de que el número de uniones que necesitan control (n) es menor que el número de actuadores (m). Los sistemas de cable pueden aplicar fuerza solamente a través de la tensión, por lo que es necesario tener un esquema de recorrido de cable antagónico para la capacidad de movimiento en ambas direcciones rotacionales en cada unión. Así, un mínimo de n + 1 cables son necesarios para el control completo de las n uniones. Además, es necesario tener una tensión positiva en todos los cables en todos los tiempos para evitar que los cables se vuelvan flojos. Más aún, dado que los cables se enrutan a lo largo de la longitud completa del mecanismo a través de una serie de poleas, sus movimientos afectan múltiples uniones, que permiten a las cargas en las uniones distribuirse entre los actuadores. Finalmente, los ángulos y momentos de unión se relacionan al desplazamiento de longitud y las fuerzas en los cables.

La elección de un esquema de recorrido de cable tiene un efecto significativo en el desempeño del dispositivo. De hecho, para esta conexión mecánica de cuatro DOF (n = 4) activada por cinco motores (m = 5), existen 11 posibles esquemas de recorrido de cable únicos, todos los cuales pueden describirse en forma de matriz. Esta matriz puede analizarse para obtener mediciones cuantitativas relacionadas a la eficiencia y los requerimientos de momento del actuador (Lee, 1991). La Figura 15b ilustra el esquema de recorrido óptimo el cual tiene antagonismo mínimo entre los cables y por lo tanto la distribución más uniforme de fuerzas a través de los cables, y además tiene las fuerzas pico más bajas.

4.1.3 Diseño de la unión

Cada unión del exoesqueleto requiere un sistema de cojinete de baja fricción que proporciona rotación alrededor de su eje mientras proporciona rigidez contra las fuerzas y momentos en todas las otras direcciones. Adicionalmente para resistir los momentos inerciales y gravitacionales no axiales durante el movimiento, las uniones deben resistir momentos sustanciales no axiales que resultan de las fuerzas aplicadas por los cables y poleas. Los cojinetes de contacto de cuatro puntos son altamente resistentes a momentos no axiales y por lo tanto necesitan no usarse en pares. El uso de cojinetes de contacto de cuatro puntos resulta en un exoesqueleto ligero y fino.

4.2 Mecanismo de cintura de hombro

El mecanismo de cintura del hombro (Figura 17) proporciona dos DOF alrededor de la unión esternoclavicular del sujeto: elevación/depresión y prolongación/retracción. El mecanismo completo se localiza detrás del sujeto, y existe un ajuste para tener en cuenta sujetos de tamaño diferente. El mecanismo soporta la conexión completa del hombro/codo que incluye el brazo del sujeto, y como resultado debe ser estructuralmente fuerte.

La primera unión esternoclavilcular del exoesqueleto se fija al suelo en la estructura base detrás del sujeto, con

su eje que apunta hacia adelante en el plano horizontal. Es una unión de rotación convencional la que proporciona movimiento de elevación/depresión. El segundo eje de unión se alinea verticalmente, e interseca el primer eje de unión a través de la unión esternoclavicular del sujeto, que permite el movimiento de prolongación/retracción. El segundo eje de unión proporciona el acoplamiento remoto fuera del eje a la unión esternoclavicular del sujeto, basado en la modalidad en la Figura 2b. No es una unión de rotación típica; más bien, es una conexión de pista curva en la cual un carro viaja (como se describió anteriormente con respecto al exoesqueleto plano). El carro de baja fricción soporta el sistema de accionamiento por cable completo y se acciona por una conexión articulada. Los cables que accionan el mecanismo de hombro/codo se acoplan a través de esta conexión articulada, similar a la modalidad en la Figura 6b. El mecanismo resultante opera como una conexión mecánica de cuatro barras sin requerir ningún elemento estructural cerca de la unión esternoclavicular del sujeto (ver Figura 17). Ambas uniones se accionan por motores eléctricos con correas de distribución, y operan con radios de engranes de, por ejemplo, 5 y 6.25, respectivamente.

Los beneficios de la conexión de pista son significativos. Primero, facilita la colocación de equipamiento detrás del sujeto en vez de encima de la cabeza del sujeto, lo cual es más seguro y más confortable para el sujeto, y además más fácil de ajustar para el operador. Segundo, la conexión de accionamiento articulada se dobla como un sistema de recorrido para los cables del mecanismo de hombro/codo mediante la guía de ellos a través de la base del robot sin ningún cambio no lineal en la longitud del cable. Cualquier cambio en la longitud del cable como resultado del movimiento de la cintura del hombro se tiene en cuenta fácilmente en las transformaciones de longitud del cable.

El peso de este mecanismo es sustancial, y pone altos los requerimientos de momento estático en la primera unión de la cintura del hombro. Para remover parte de la carga del motor, puede emplearse un sistema de compensación de gravedad externa. Por ejemplo, un cable vertical 92 puede conectarse a la pista curva y controlarse por un tercer motor 94 montado al bastidor 90 directamente encima del extremo de la pista (ver Figura 14), para aplicar una fuerza vertical en la pista para desplazar las fuerzas gravitacionales en el exoesqueleto.

4.4 Sujeción y alineación del sujeto

Para funcionar correctamente, las uniones del exoesqueleto deben alinearse con las uniones esternoclavicular y escapulohumeral del sujeto, y ajustarse para acomodar brazos de diferentes longitudes. Un arnés sujetado a la silla móvil 80, se asegura alrededor del torso del sujeto, y la silla puede usarse para obtener los tres ajustes traslacionales necesarios para alinear la unión esternoclavicular del sujeto con el centro de la unión esternoclavicular fijo del exoesqueleto. Una vez alineada, la silla se bloquea a la estructura principal 90.

El exoesqueleto debe alinearse después con el centro de la unión escapulohumeral del sujeto. Como antes, se requieren tres ajustes espaciales. Sin embargo, esto puede lograrse mediante un ajuste lineal manual sencillo puesto que la redundancia de la estructura del exoesqueleto puede usarse para hacer las alineaciones restantes. Este ajuste lineal cambia el sistema de accionamiento por cable con relación al carro en la dirección aproximadamente alineada con la proyección horizontal de la clavícula (ver Figura 17) y luego se sujeta al carro. Este diseño se basa en la modalidad mostrada en la Figura 6b. Así la modificación de la posición del centro de la unión escapulohumeral del exoesqueleto se logra a través del ajuste lineal y los dos DOF proporcionados por el mecanismo de cintura del hombro. La unión esférica de tres DOF del mecanismo de hombro/codo se compensa automáticamente por rotación hasta que el exoesqueleto se alinee correctamente con el miembro del sujeto.

Este esquema de ajuste tiene el beneficio de simplificar la estructura de la unión esternoclavicular del exoesqueleto, y además el procedimiento de configuración. De otra manera, se requerirían tres ajustes traslacionales consecutivos, que hacen el exoesqueleto robótico significativamente grande, pesado y más complicado. Contar con el mecanismo de hombro/codo para compensar los ajustes tiende a empujar la unión del hombro del robot fuera de su configuración óptima, lo que disminuye el rango de movimiento del exoesqueleto en algunas direcciones. Sin embargo, el rango de ajuste es típicamente pequeño (2° o 3° como máximo), así las singularidades y manipulabilidad del exoesqueleto no se alterarán significativamente. Otro asunto que surge cuando se ajusta un sistema de accionamiento por cable de acabado abierto es que este es necesario para mantener la tensión en los cables en todos los tiempos. El ajuste de la longitud de la conexión no debe cambiar la longitud del cable, de otra manera se perdería la tensión. El uso de una conexión articulada basada en la modalidad de la Figura 6b asegura que la longitud del cable no cambia y que la tensión se mantiene.

El exoesqueleto sujeta al sujeto en dos lugares: el brazo superior y el antebrazo (Figura 18a). Estas sujeciones mantienen el exoesqueleto alineado con el miembro en todos los tiempos. Por ejemplo, la sujeción del miembro puede lograrse mediante atar el miembro dentro de artesas mitad cilíndricas rígidas mediante el uso de unos brazaletes o correas inflables de Velcro™ 102, 104 similares a un brazalete de presión sanguínea. Una vez atados, los brazaletes pueden inflarse entonces para proporcionar un ajuste seguro que se personaliza al sujeto. Los brazaletes pueden sujetarse al sujeto antes de conectarse al exoesqueleto, lo cual es más fácil para el

operador, y más confortable para el sujeto. Una diferencia importante de varios diseños previos de brazalete de brazo es que el brazalete de brazo no tiene un tamaño fijo a través del cual el sujeto debe poner su brazo. Esto permite una configuración más simple, y además es compatible con una variedad más grande de tamaños de brazos.

Se requieren cinco ajustes para asegurar que el brazo del sujeto se alinea correctamente con el exoesqueleto (ver Figura 18a). Cada brazalete es ajustable a lo largo de la longitud del exoesqueleto (para miembros de longitud diferente) y perpendicular al exoesqueleto (para miembros de ancho diferente). Por ejemplo, como se muestra en la Figura 18a y b, cada brazalete puede tener dos ajustes traslacionales para alinear correctamente los segmentos del miembro con relación a la estructura del mecanismo: perpendicular a la conexión (las flechas pequeñas) y paralelo a la conexión (las flechas huecas). Un quinto ajuste (flecha grande) mueve la localización de la unión del codo para cambiar la longitud de la conexión del miembro superior. Por ejemplo, el brazalete puede sujetarse mediante la inserción dentro de un deslizador 106 el cual puede moverse libremente a lo largo del exoesqueleto. Una abrazadera de liberación rápida 108 (por ejemplo, una abrazadera operada por cámara) puede usarse para sujetar simultáneamente el brazalete al deslizador y el deslizador al exoesqueleto (ver Figura 18b). Para acomodar sujetos con longitudes de brazo diferentes, una abrazadera y deslizador similar pueden usarse para localizar la unión del codo a lo largo de la conexión del brazo superior. Mediante el uso de una conexión mecánica basada en la modalidad de la Figura 6c para acoplar la última unión del hombro a la unión del codo se asegura que las uniones permanecen acopladas y que la tensión del cable no se pierde cuando se ajusta la longitud del brazo superior.

Aunque los dispositivos robóticos de tipo de exoesqueletos siempre requieren más tiempo de configuración que sus contrapartes de tipos de efector de extremo, el exoesqueleto descrito en la presente tiene un procedimiento de configuración relativamente simple y aún proporciona movilidad y ajustabilidad sustancial. De hecho, una vez que la silla de ruedas se bloquea en su lugar, solamente se requieren cuatro abrazaderas para asegurar los ocho ajustes. Esto minimiza el tiempo de configuración, lo que deja más tiempo para la terapia.

4.5 Modelo dinámico y simulación

Para ayudar a hacer elecciones apropiadas para los ocho motores eléctricos requeridos para activar el exoesqueleto 3-D, un modelo dinámico del exoesqueleto y el miembro humano se creó en MATLAB basado en la caja de herramientas de robot (Corke, 1996). El modelo se usó además para especificar un número de otros parámetros de diseño que incluyen la resistencia de cojinete, los radios de engrane de unión, y la capacidad de carga del cable.

El exoesqueleto se modeló como un manipulador de cuerpo rígido estándar, y se asumió que las dinámicas del cable no eran significativas. Los parámetros dinámicos del exoesqueleto, que incluyen longitudes, masas, y propiedades de inercia se estimaron de los dibujos CAD. Las mismas propiedades del miembro superior humano se calcularon a partir de tablas de datos antropométricos basado en la altura y peso (Winter, 1990) y se integraron completamente dentro del modelo. El modelo se adaptó para tener en cuenta el sistema de compensación de gravedad externa, e incluyó estimados de la fricción estática y viscosa. Dada una trayectoria para cada unión, el modelo calculó los momentos de unión requeridos para lograr ese movimiento. Las fuerzas del cable requeridas para generar los momentos de unión se calcularon entonces mediante el uso de la técnica que resuelve el momento (Lee, 1991). La salida final fue las salidas de momento para todos los ocho motores, la fuerza en cada cable, y todas las fuerzas y momentos no axiales en cada unión.

Para conseguir un estimado de los momentos dinámicos pico del motor para aplicaciones sin contacto, el modelo se usó para simular varios movimientos de alcance con una velocidad de punto final pico de 1.0 m/s. Las mediciones del miembro antropométrico se seleccionaron para satisfacer los requerimientos de diseño máximos. Los movimientos incluyeron los movimientos de unión sencillos a través del rango completo de movimiento de cada unión, y un rango de movimientos típicos de alcance de uniones múltiples tal como el alcance hacia la cara o pecho desde una posición relajada. Las posiciones de más demanda para el exoesqueleto en términos de requerimientos de momento estático son esas en las cuales el brazo se alza hacia el plano horizontal con el codo completamente extendido. La componente gravitacional de los momentos de unión es la contribución más significativa, y produce las tensiones más grandes en los motores en situaciones estáticas, por lo que cada posición se sujetó por un segundo para facilitar las mediciones momento estático pico.

Los motores y radios de engrane se seleccionaron basado en los resultados de estas simulaciones. Los motores tienen codificadores de alta resolución incorporados capaces de medir el ángulo de unión en incrementos de 0.003°. Cada motor incorpora además un freno eléctr ico para garantizar que el mecanismo no colapsará durante un fallo de energía. Los frenos aseguran además que los cables permanecen en tensión cuando la energía se apaga. Las simulaciones permiten además la selección de un cable de acero inoxidable trenzado de tamaño apropiado, y además cojinetes de unión con capacidades de carga suficientes. Las capacidades de momento

total de cada unión del exoesqueleto se muestran en la Tabla I, y son un resultado de los límites de ambos los motores y la resistencia del cable.

Tabla 1. Salida de Momento Máximo para Cada Unión

MOTOR	Momento Estático (Nm)	Momento Máximo (Nm)
Cintura del Hombro #1	±24	±73
Cintura del Hombro #2	±30	±91
Escapulohumeral #1	+39, -26	+60
Escapulohumeral #2	+39, -26	±60
Escapulohumeral #3	+39, -26	±60
Codo	±13	+40, -30

Equivalentes

Los expertos en la técnica reconocerán o serán capaces de verificar variantes de las modalidades descritas en la presente. Tales variantes están dentro del alcance de la invención y se cubren por las reivindicaciones adjuntas.

Referencias

Ball, S.J., Brown, I.E., y Scott, S.H., "A planar 3DOF robotic exoskeleton for rehabiliation and assessment," en la 29th Annual Internation Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'07), pp.4024-4027, Lyon, Francia, 22 al 26 de agosto de 2007c.

Ball, S.J., Brown, I.E., y Scott, S.H., "Designing a robotic exoskeleton for shoulder complex rehabilitation," en la 30th Canadian Medical and Biological Engineering Conference (CMBEC30), Toronto, Canada, 16 al 19 de junio de 2007b.

Ball, S.J., Brown, I.E., y Scott, S.H., "MEDARM: a rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex," en Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'07), Zurich, Suiza, 4 al 7 de septiembre de 2007a.

Burgar, C.G., Lum, P.S., Shor, P.C., y Machiel Van der Loos, H.F., "Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience," J. Rehabil. Res. Dev., vol. 37, no. 6, pp. 663- 673, 2000.

Corke, P.I., "A robotics toolbox for MATLAB," IEEE Robot. Automat. Mag., vol. 3, no. 1, pp.24-32, 1996.

Dobkin, B.H., "Strategies for stroke rehabilitation," Lancet Neurol., vol. 3, no. 9, pp. 528-536, 2004.

Frisoli, A., Rocchi, F., Marcheschi, S., Dettori, A., Salsedo, F., y Bergamasco, M. "A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments". En Proc. 1st Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, pp. 195-201, 2005.

Hesse, S., Schmidt, H., Werner, C., y Bardeleben, A., "Upper and lower extremity robotic devices for rehabilitation and for studying motor control," Curr. Opin. Neurol., vol. 16, no. 6, pp. 705-710, 2003.

Johnson, G.R., Carus, D.A., Parrini, G., Scattareggia, M.S., y Valeggi, R., "The design of a five-degree-of freedom powered orthosis for the upper limb," Proc. Inst. Mech. Eng [H.], vol. 215, no. 3, pp. 275-284, 2001.

Krebs, H.I., Hogan, N., Aisen, M.L., y Volpe, B.T., "Robot-aided neurorehabilitation," IEEE Trans. Rehabil. Eng, vol. 6, no. 1, pp. 75- 87, 1998.

Lee, J.J., "Tendon-driven manipulators: Analysis, synthesis, y control," Ph.D. Thesis, University of Maryland, 1991.

Loureiro, R., Amirabdollahian, F., Topping, M., Driessen, B., y Harwin, W., "Upper limb robot mediated stroke therapy - GENTLE/s approach," Autonomous Robots, vol. 15, no. 1, pp. 35-51, 2003.

Mihelj, M., Nef, T., y Riener, R., "ARMin - toward a six DoF upper limb rehabilitation robot," Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robots and Biomechatronics, pp. 1154-1169, 2006.

Mihelj, M., Nef, T., and Riener, R., "ARMin II - 7 DoF rehabilitation robot: mechanics and cinemática". En Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07), pp. 4120-4125, 2007.

Nef, T., y Riener, R. "ARMin - Design of a novel arm rehabilitation robot". En Proc. IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR'05), pp. 57-60, 2005.

Perry, J.C., y Rosen, J. " Design of a 7 Degree-of-Freedom Upper-Limb Powered Exoskeleton". En Proc. IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robots and Biomechatronics (BIOROB'06), 2006

Reinkensmeyer, D.J., Emken, J.L., y Cramer, S.C., "Robotics, motor learning, and neurologic recovery," Annu. Rev. Biomed. Eng, vol. 6, pp. 497-525,2004.

Sanchez, R.J., Reinkensmeyer, D., Shah, P., Liu, J., Rao, S., Smith, R., Cramer, S., Rahman, T., y Bobrow, J., "Monitoring functional arm movement for home-based therapy after stroke," en Proc. IEEE Annual Conference of Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'04), vol. 2, 2004, pp. 4787-4790.

Sanchez, R. J., Liu, J., Rao, S., Shah, P., Smith, R., Rahman, T., Cramer, S.C., Bobrow, J.E., y Reinkensmeyer, D.J.. "Automating arm movement training following severe stroke: Functional exercises con quantitative feedback in a gravity-reduced environment," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 378-389, 2006.

Scott, S.H., "Apparatus for measuring and perturbing shoulder and elbow joint positions and momentos during reaching," J. Neurosci. Methods, vol. 89, no. 2, pp. 119-127, 1999.

Teasell, R., Foley, N., Jutai, J., Doherty, T., Bitensky, J., Bhogal, S., y Speechley, M., "Stroke rehabiliation evidence-based review: Upper extremity interventions," Monograph on the Internet, 2003.

Tsai, L.-W., Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

Winter, D.A., Biomechanics and Motor Control of Human Movement, 2da ed. New York, U.S.A: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

Zatsiorsky, V.M., Kinematics of Human Motion, Champaign, IL, U.S.A: Human Kinetics, 1998.

REIVINDICACIONES

1. Un exoesqueleto robótico (100), que comprende:

una primera conexión mecánica adaptada para acoplarse a una primera unión seleccionada de un miembro de un sujeto, la primera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje; y
medio de sujeción del miembro para sujetar el miembro a la conexión;
en donde la primera conexión mecánica define una unión virtual (1, 110, 120) que tiene un eje que no se localiza en la conexión mecánica;
en donde la unión virtual (1, 110, 120) se acopla a la primera unión seleccionada del miembro cuando el miembro se sujeta a la conexión;
en donde la primera conexión mecánica no se localiza en, o a lo largo de un eje de la primera unión seleccionada del miembro cuando la primera unión seleccionada se acopla a la unión virtual (1, 110, 120);
en donde la primera conexión mecánica incluye una segunda unión que no se localiza en un eje de la primera unión seleccionada del miembro cuando la primera unión seleccionada se acopla a la unión virtual (1, 110, 120); y
en donde la primera conexión mecánica incluye conexiones que acoplan la cinemática y cinética de la unión virtual (1, 110, 120) a la segunda unión de la primera conexión mecánica.

2. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, en donde la primera conexión mecánica comprende una pluralidad de conexiones interconectadas para la articulación entre ellas de manera que definen dos estructuras de cuatro barras, las dos estructuras de cuatro barras que comparten al menos porciones de dos conexiones, una dicha estructura de cuatro barras que tiene una conexión virtual definida entre dos esquinas, las dos esquinas fijas al suelo; u opcionalmente
en donde al menos una de las estructuras de cuatro barras es un paralelogramo.

3. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, que comprende además:

una segunda conexión mecánica adaptada para acoplarse a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, la segunda conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje;
en donde una unión de la segunda conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la segunda unión seleccionada del miembro.

4. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 3, que comprende además:

una tercera conexión mecánica adaptada para acoplarse a una tercera unión seleccionada del miembro del sujeto, la tercera conexión mecánica que incluye conexiones para dicho acoplamiento a la tercera unión seleccionada, con al menos una unión que tiene articulación alrededor de un eje;
en donde una unión de la tercera conexión mecánica se localiza en, o a lo largo de un eje de la tercera unión seleccionada del miembro.

5. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 3 o 4, en donde la articulación del exoesqueleto (100) está dentro de un plano.

6. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, que comprende además:

una segunda conexión mecánica adaptada para acoplarse a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, las primera y segunda conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la primera unión seleccionada; o
una segunda conexión mecánica adaptada para acoplarse a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, y una tercera conexión mecánica que se acopla a la primera unión seleccionada del miembro del sujeto, las primera, segunda y tercera conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la primera unión seleccionada;
en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro; y

en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro.

7. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 6, que comprende además una de:

(i) una tercera conexión mecánica adaptada para acoplarse a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto;
(ii) una tercera conexión mecánica adaptada para acoplarse a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto y una cuarta conexión mecánica adaptada para acoplarse a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera y cuarta conexiones mecánicas que proporcionan dos grados de libertad a la segunda unión seleccionada; y
(iii) una tercera conexión mecánica adaptada para acoplarse a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, una cuarta conexión mecánica adaptada para acoplarse a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, y una quinta conexión mecánica adaptada para acoplarse a la segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, las tercera, cuarta y quinta conexiones mecánicas que proporcionan tres grados de libertad a la segunda unión seleccionada;

en donde la segunda conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la primera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la primera unión seleccionada del miembro;
en donde la tercera conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un primer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro;
en donde la cuarta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un segundo eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro; y
en donde la quinta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un tercer eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro.

8. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 7, que comprende además:

una sexta conexión mecánica adaptada para acoplarse a una tercera unión seleccionada del miembro del sujeto;
en donde la sexta conexión mecánica incluye conexiones para dicho acoplamiento a la tercera unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un eje que corresponde a un eje de rotación de la tercera unión seleccionada del miembro.

9. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, 3 o 4, en donde al menos una conexión mecánica comprende una pista curva, un carro asociado con la pista curva, y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva; u opcionalmente
en donde dos o más conexiones mecánicas comparten una o más conexiones.

10. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 7, en donde al menos una de la primera conexión mecánica, la segunda conexión mecánica, la tercera conexión mecánica, la cuarta conexión mecánica, y la quinta conexión mecánica comprende una pista curva, un carro asociado con la pista curva, y dos o más conexiones interconectadas para la articulación entre ellas y conectadas en un punto al carro y en otro punto a una localización fija con relación a la pista curva; u opcionalmente
en donde dos o más de la primera conexión mecánica, la segunda conexión mecánica, la tercera conexión mecánica, la cuarta conexión mecánica, y la quinta conexión mecánica comparten una o más conexiones.

11. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, que comprende además un medio para obtener datos con respecto a la posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una de las uniones o las conexiones de la conexión mecánica.

12. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 6, en donde el exoesqueleto (100) puede configurarse para su movimiento solamente dentro de un plano.

13. El exoesqueleto robótico (100) de la reivindicación 1, que comprende además:

una segunda conexión mecánica adaptada para acoplarse a una segunda unión seleccionada del miembro del sujeto, la segunda conexión mecánica que incluye al menos dos conexiones para dicho acoplamiento a la segunda unión seleccionada y que tiene articulación alrededor de un segundo eje que corresponde a un eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro;
en donde el segundo eje de rotación de la segunda conexión mecánica es sustancialmente colineal con el eje de rotación de la segunda unión seleccionada del miembro;
en donde un tercer eje de rotación de la segunda conexión mecánica es sustancialmente colineal con un eje de rotación de una tercera unión seleccionada del miembro, la tercera unión seleccionada del miembro que es la siguiente unión la cual es distal o proximal a la segunda unión seleccionada del miembro; y
en donde una distancia entre los segundo y tercer ejes de rotación de la segunda conexión mecánica es variable y el desempeño apropiado de la segunda conexión mecánica se mantiene sin ajustar la longitud de las conexiones de la segunda conexión mecánica.

14. Un método para evaluar, estudiar o diagnosticar un déficit en la función senso-motriz de un miembro de un sujeto, que comprende:

sujetar el exoesqueleto robótico (100) de cualquiera de las reivindicaciones de la 1 a la 13 al miembro de un sujeto;
obtener datos en relación con la posición angular, momento, y/o aceleración de al menos una unión o conexión de la conexión mecánica, los datos que corresponde a la posición angular, momento, y/o aceleración de una o más uniones del miembro;
comparar los datos obtenidos con los datos de individuos normales y saludables o con datos de control para evaluar, estudiar, o diagnosticar un déficit en la función senso-motriz del miembro del sujeto.

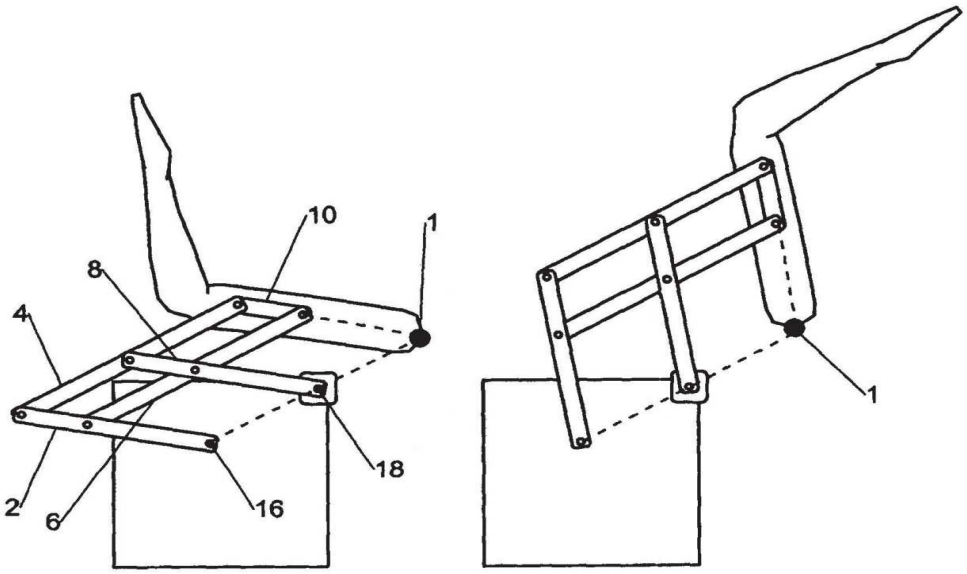

Figura 1a

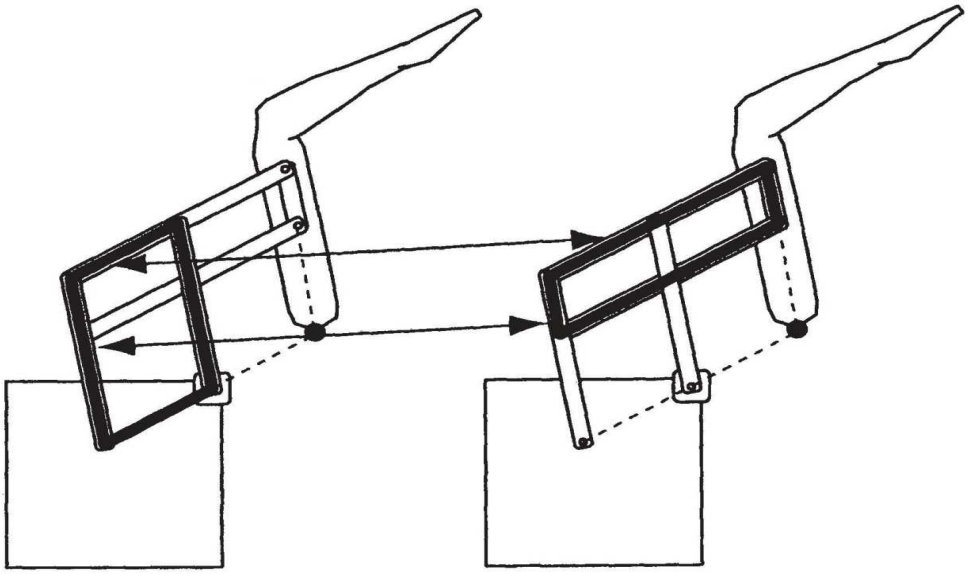

Figura 1b

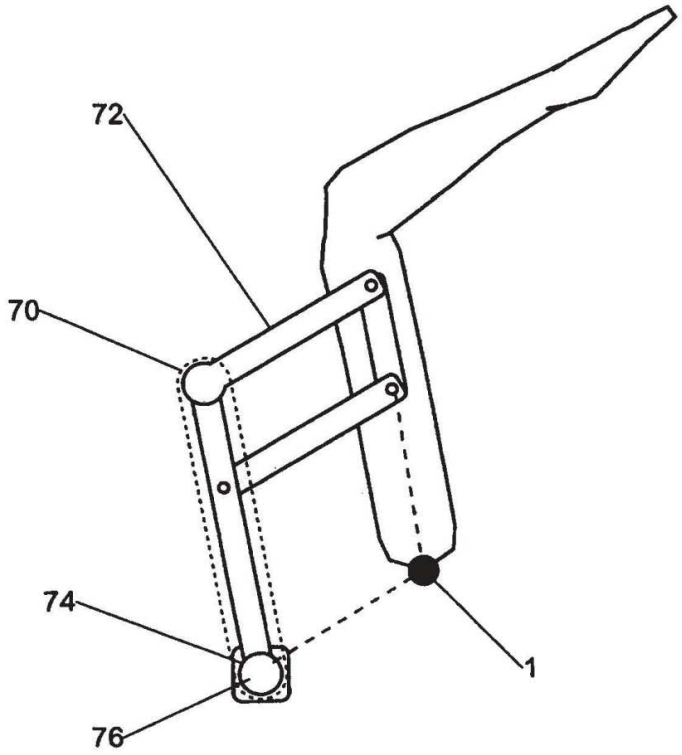

Figura 1c

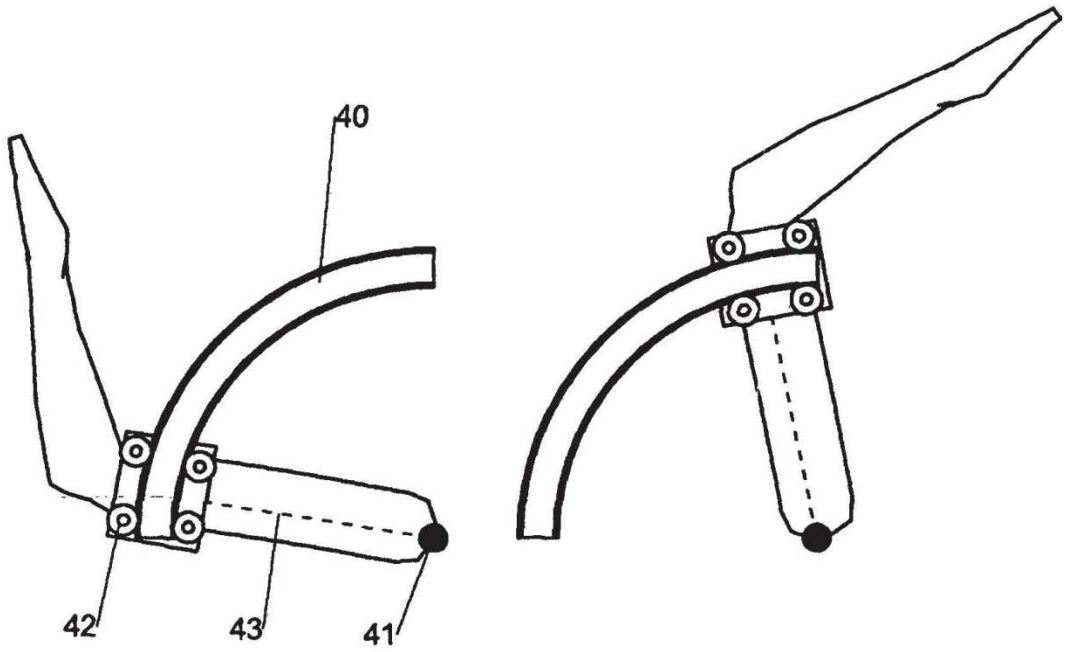

Figura 2a

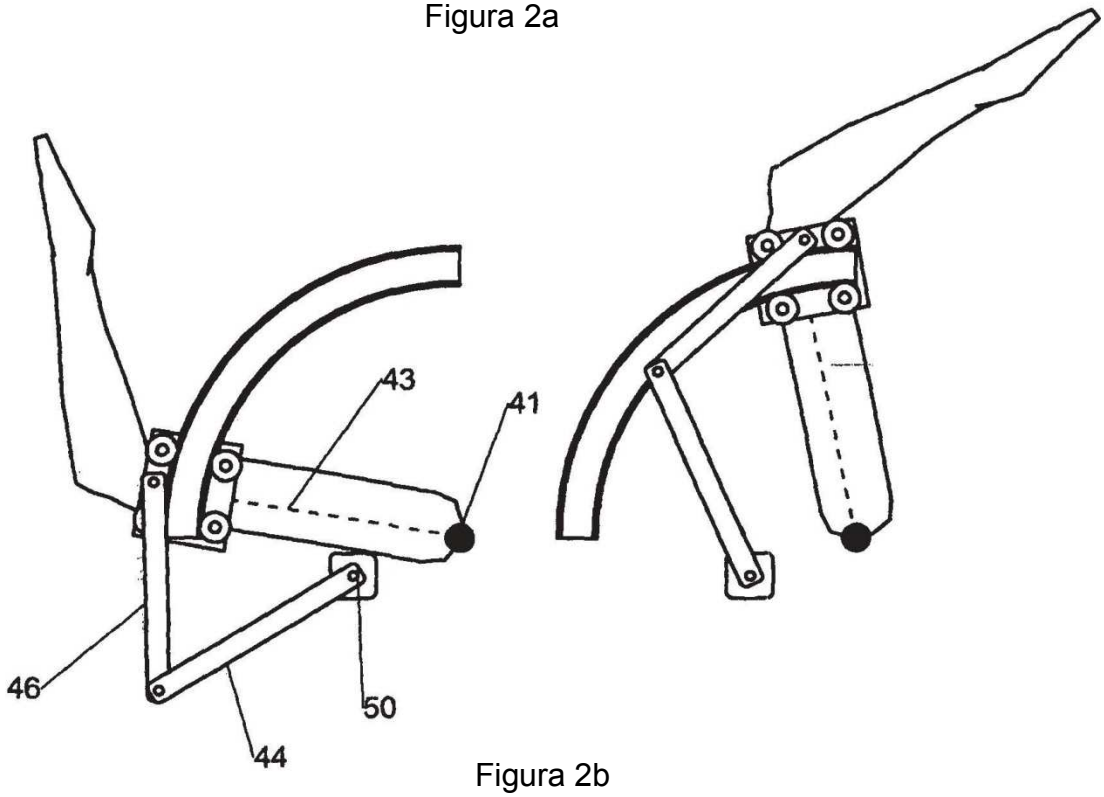

Figura 2b

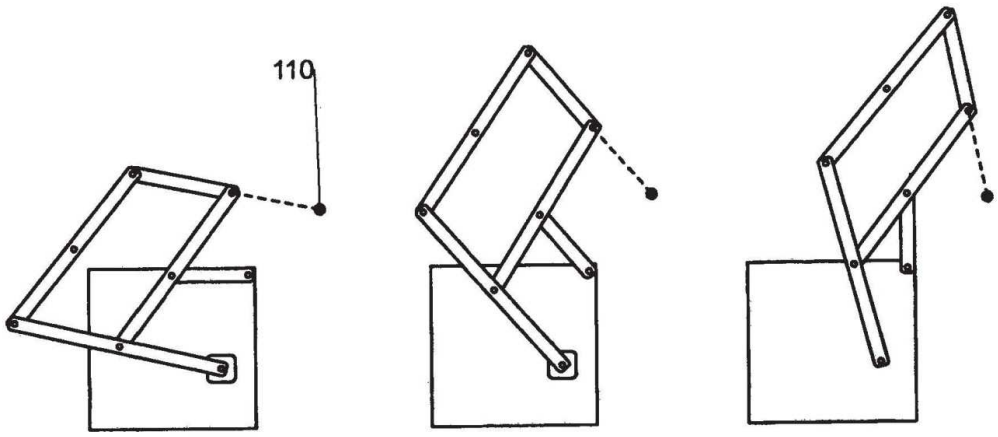

Figura 3a

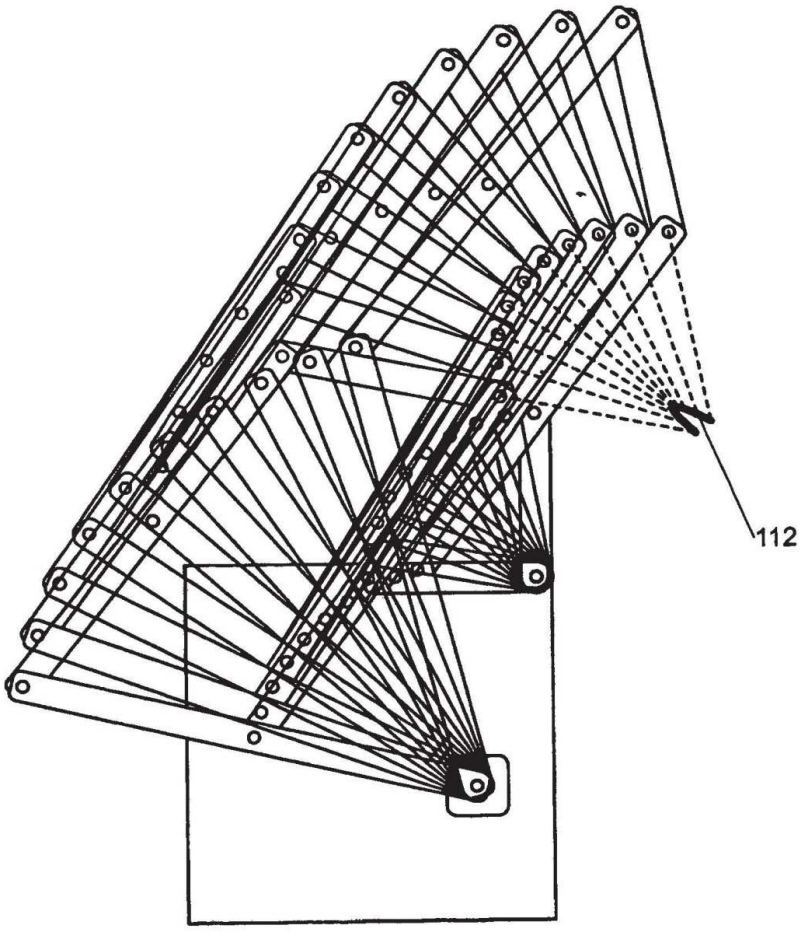

Figura 3b

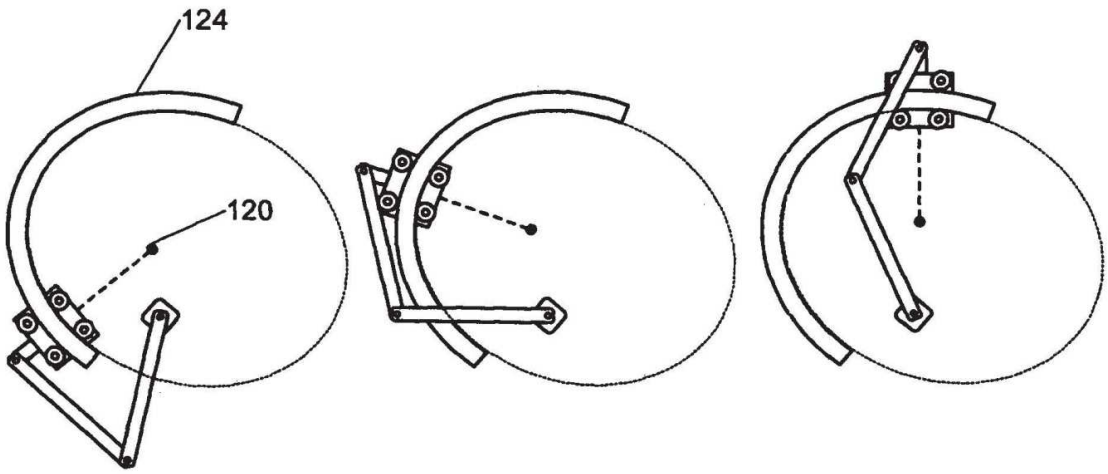

Figura 4a

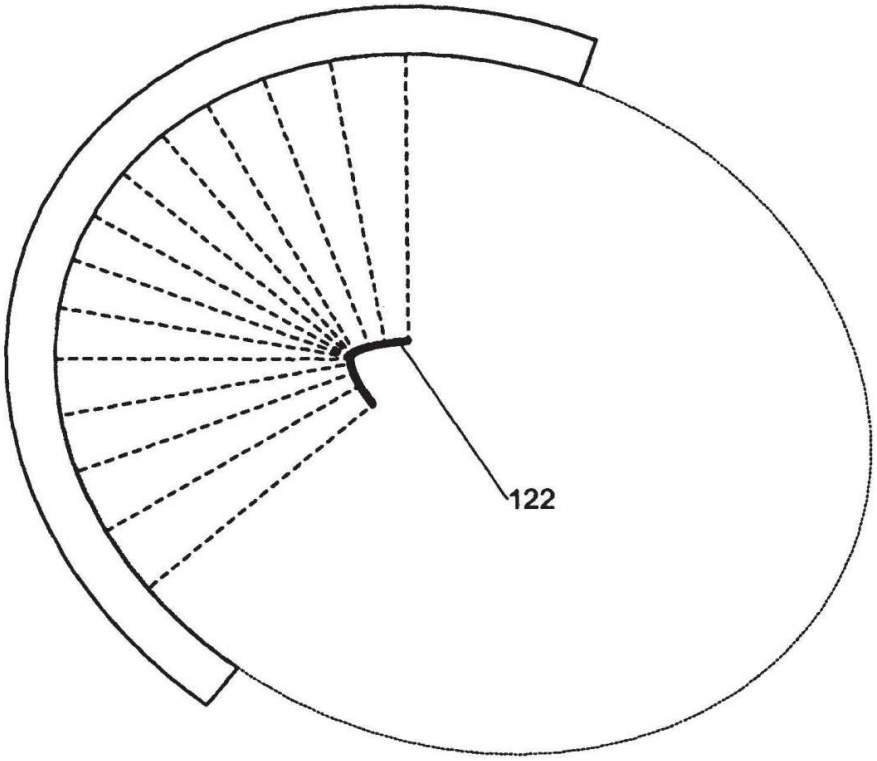

Figura 4b

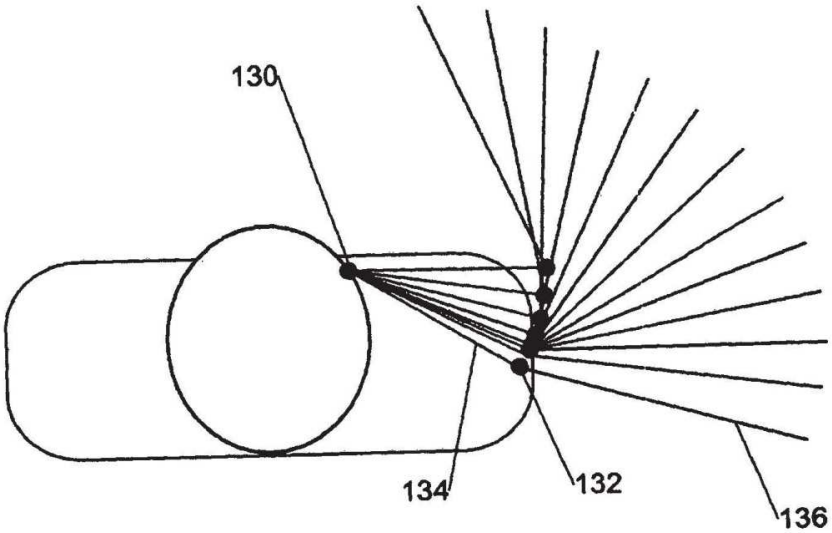

Figura 5a

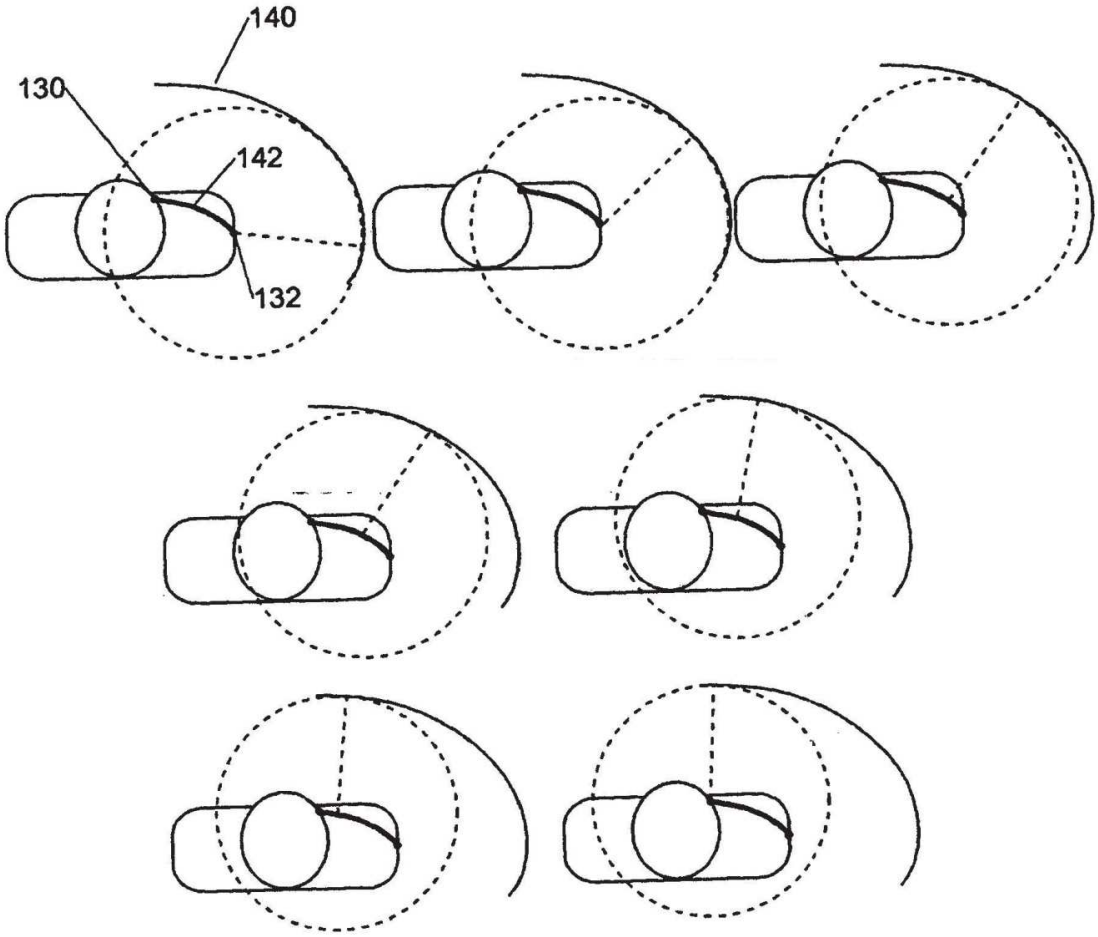

Figura 5b

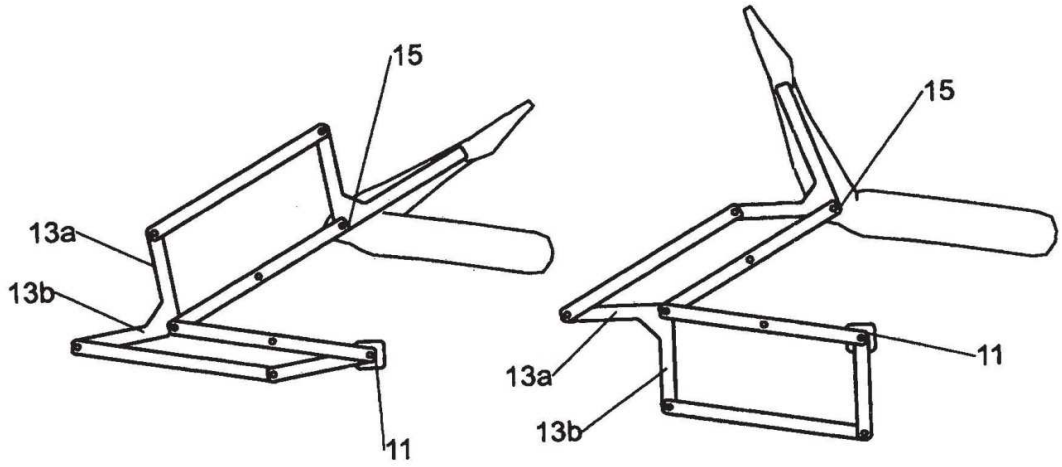

Figura 6a

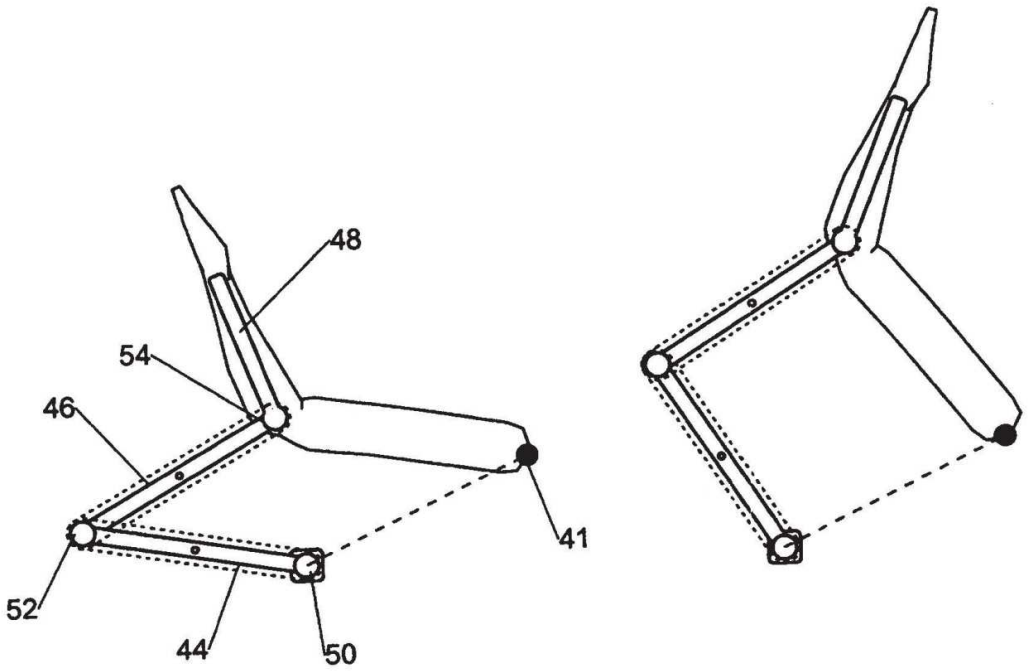

Figura 6b

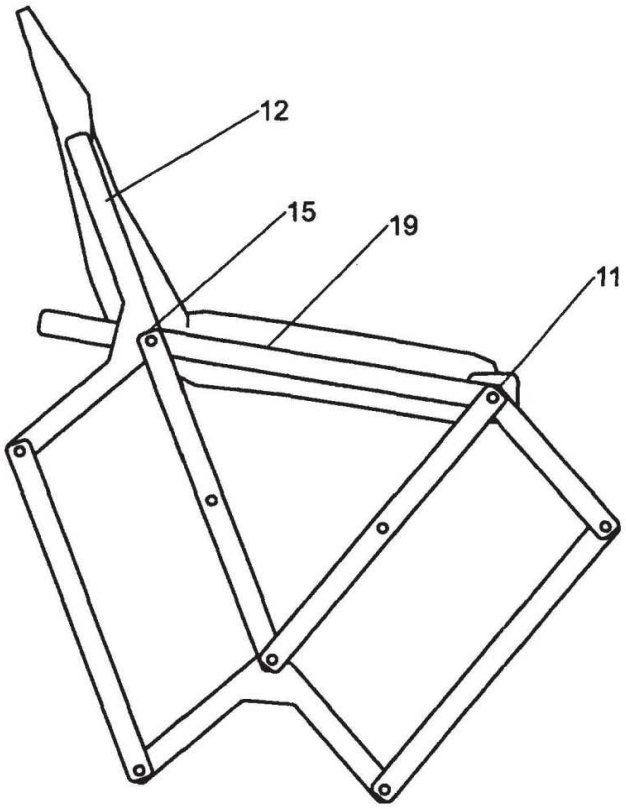

Figura 6c

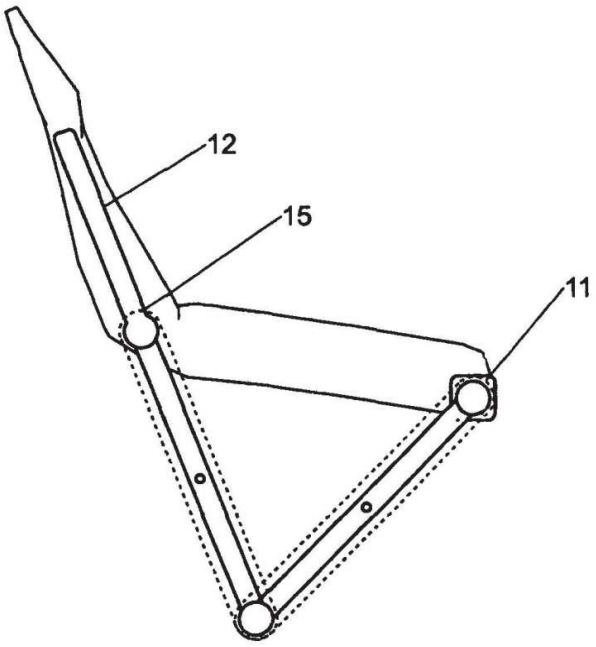

Figura 6d

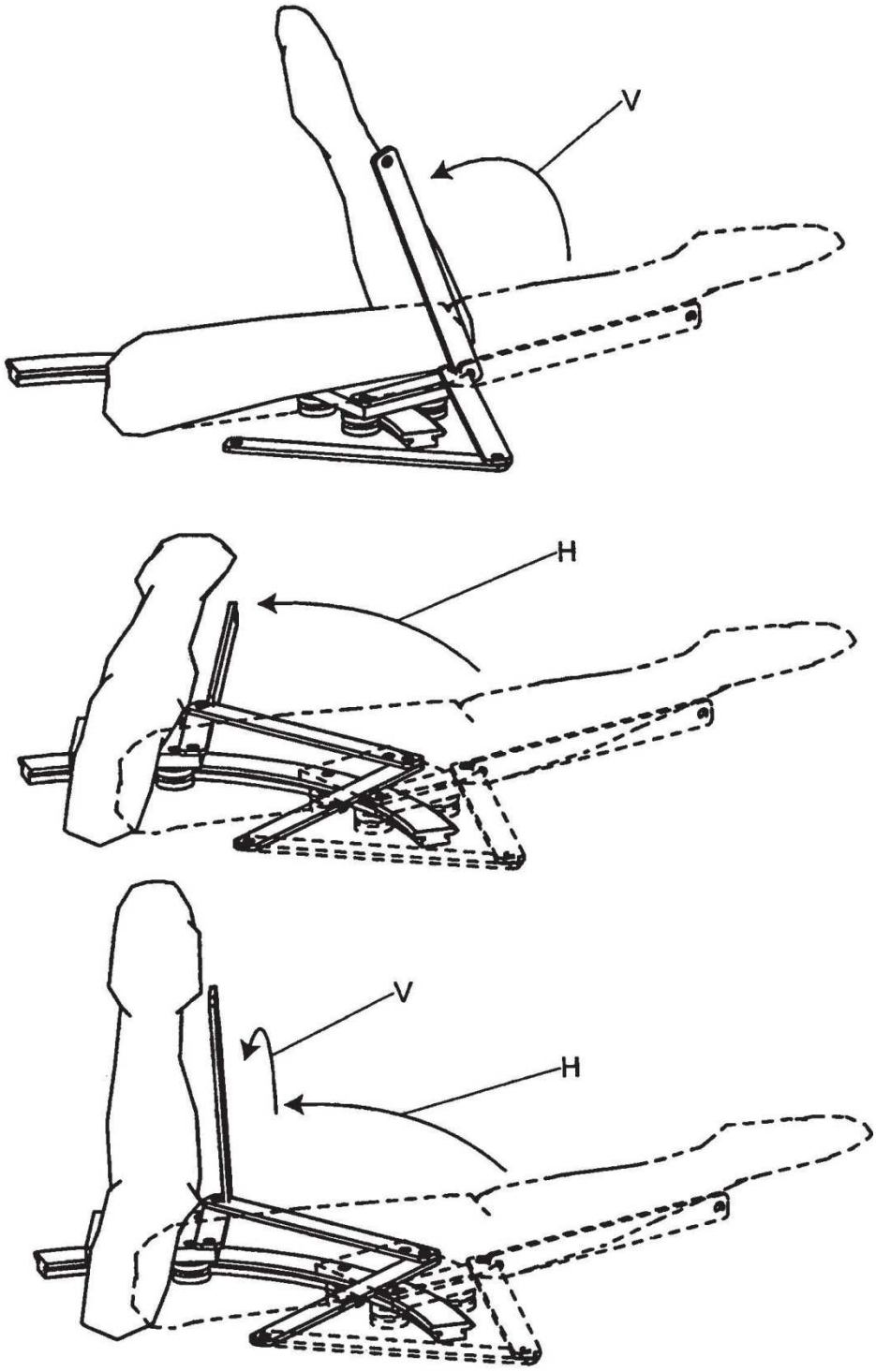

Figura 7

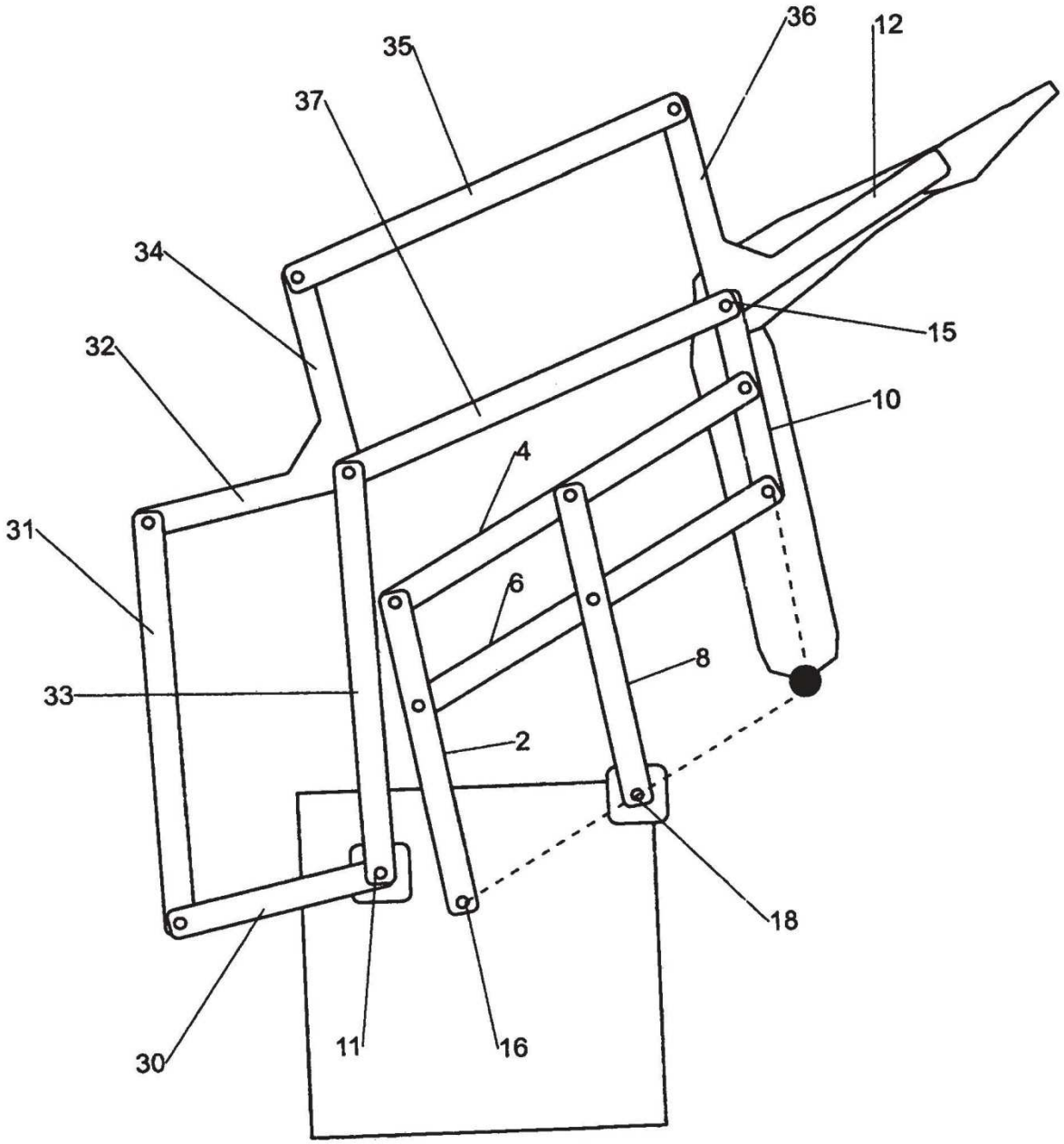

Figura 8a

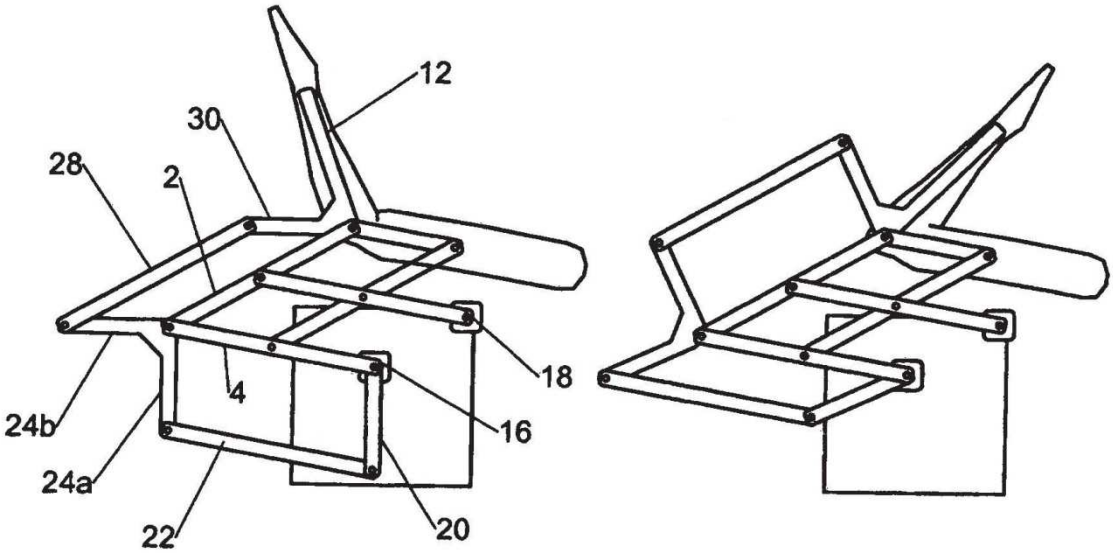

Figura 8b

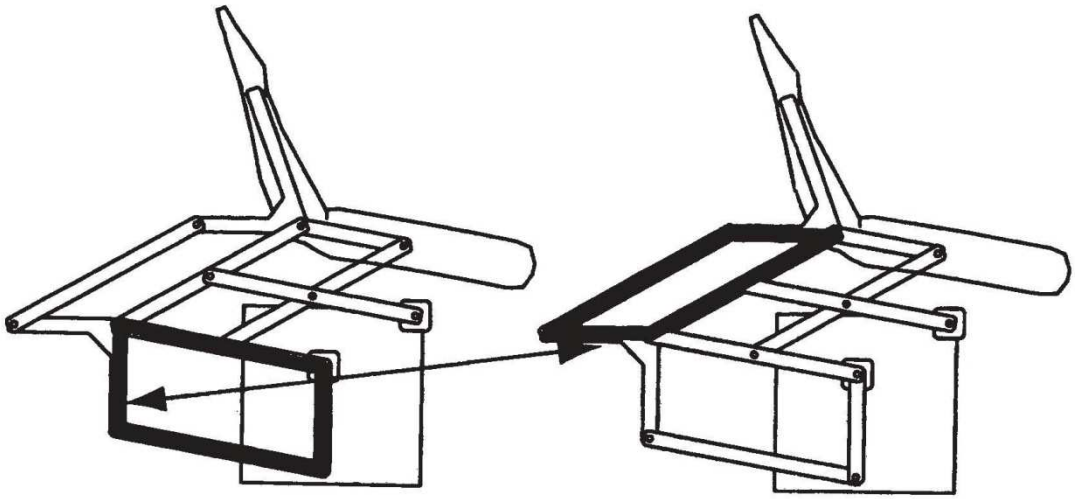

Figura 8c

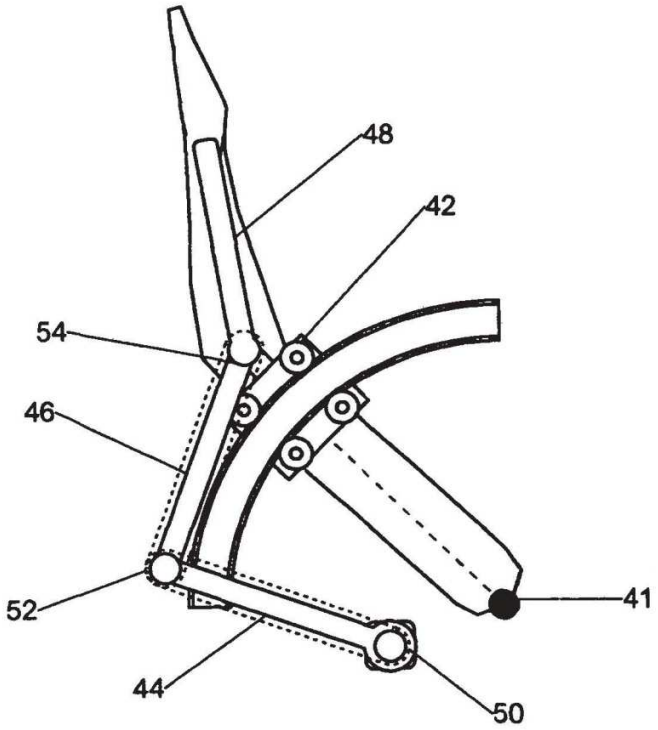

Figura 9a

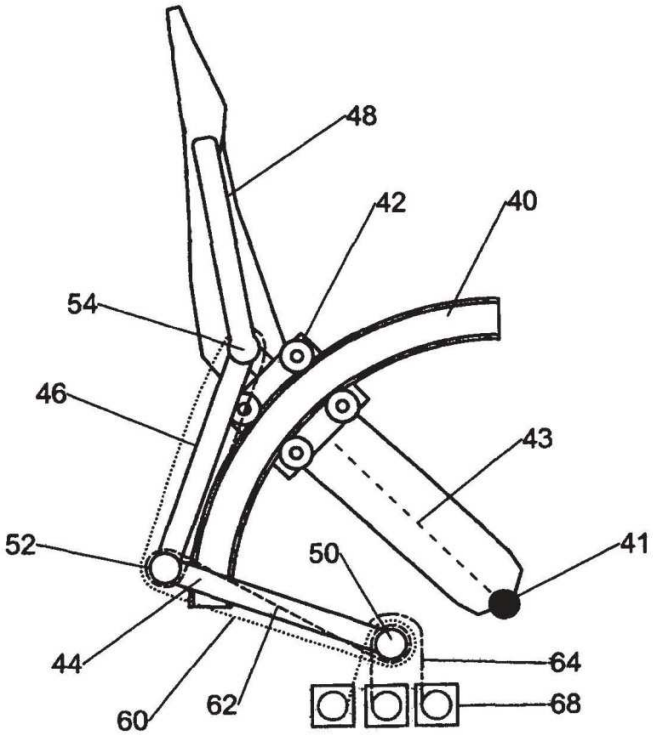

Figura 9b

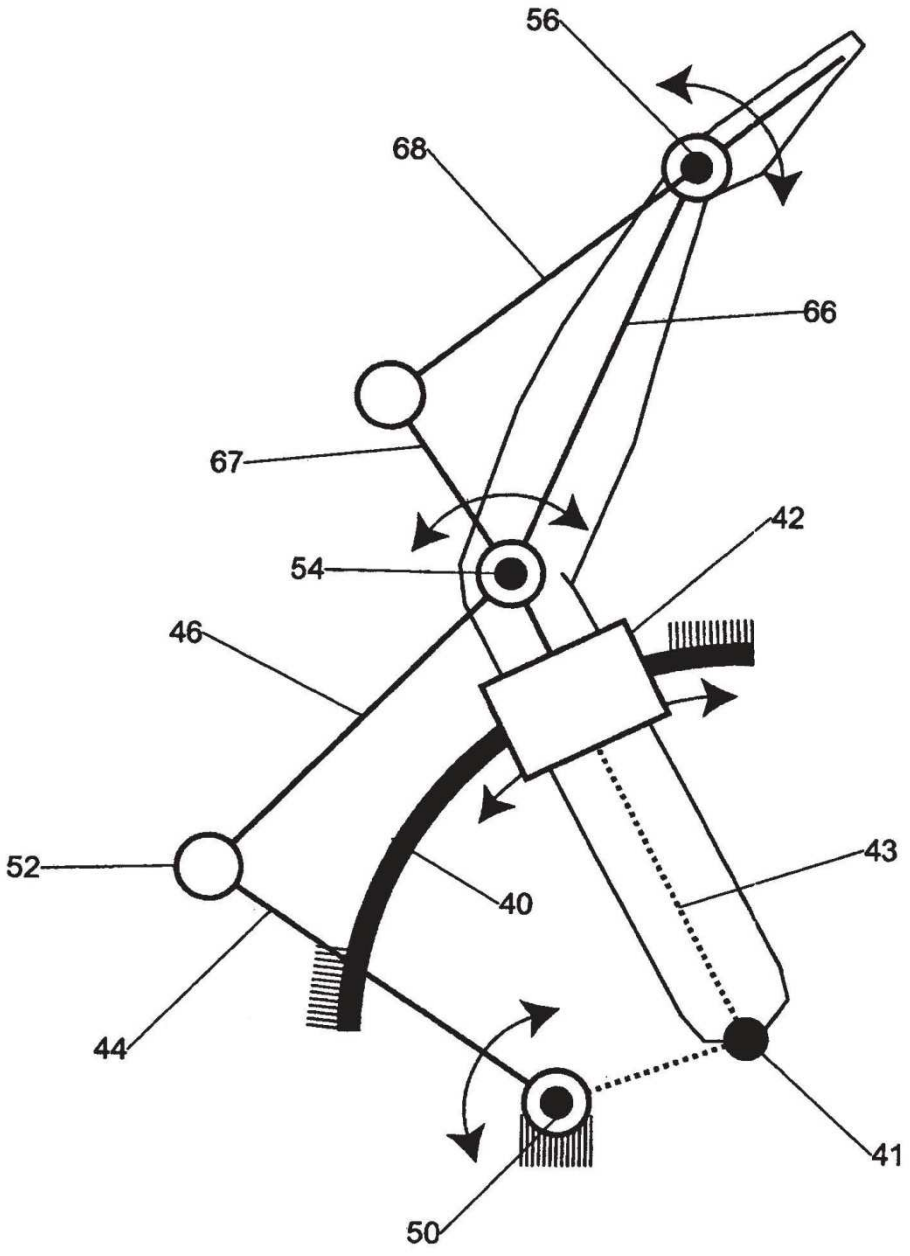

Figura 10

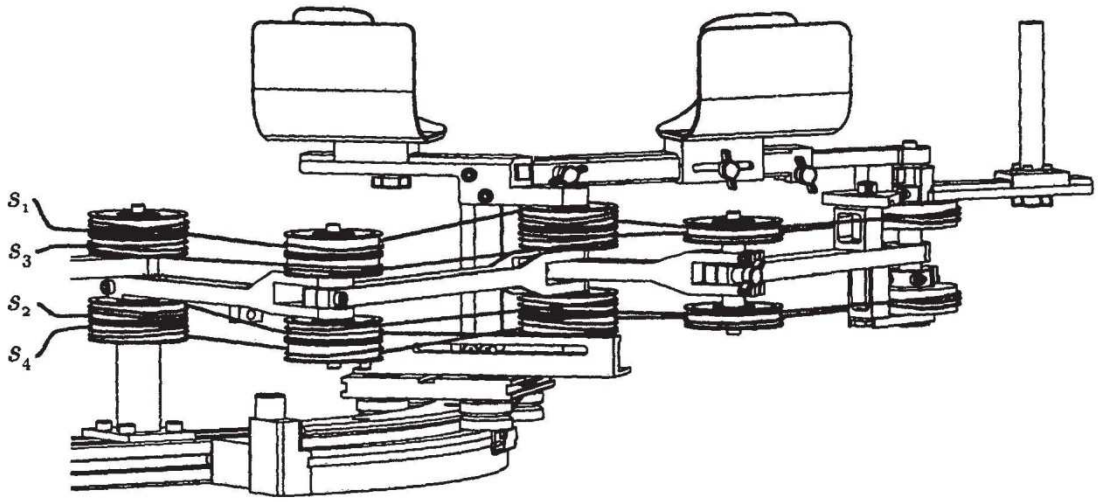

Figura 11a

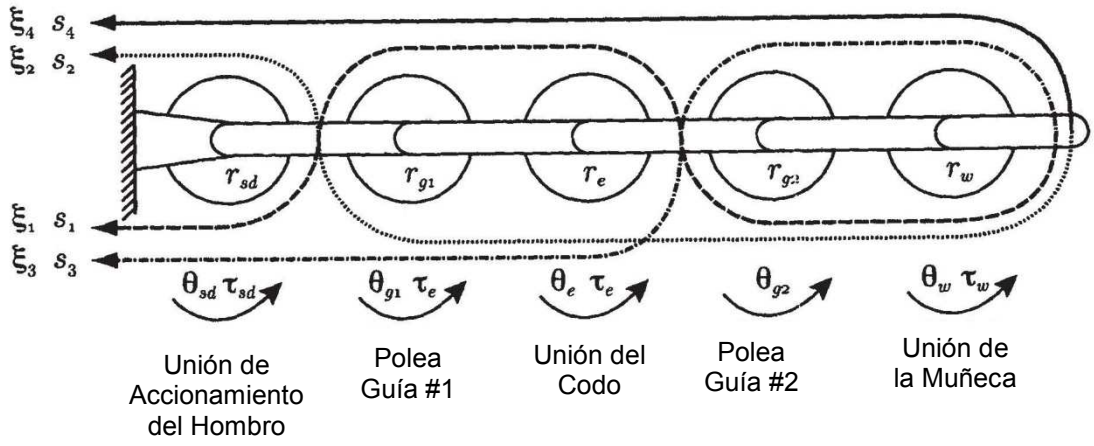

Figura 11b

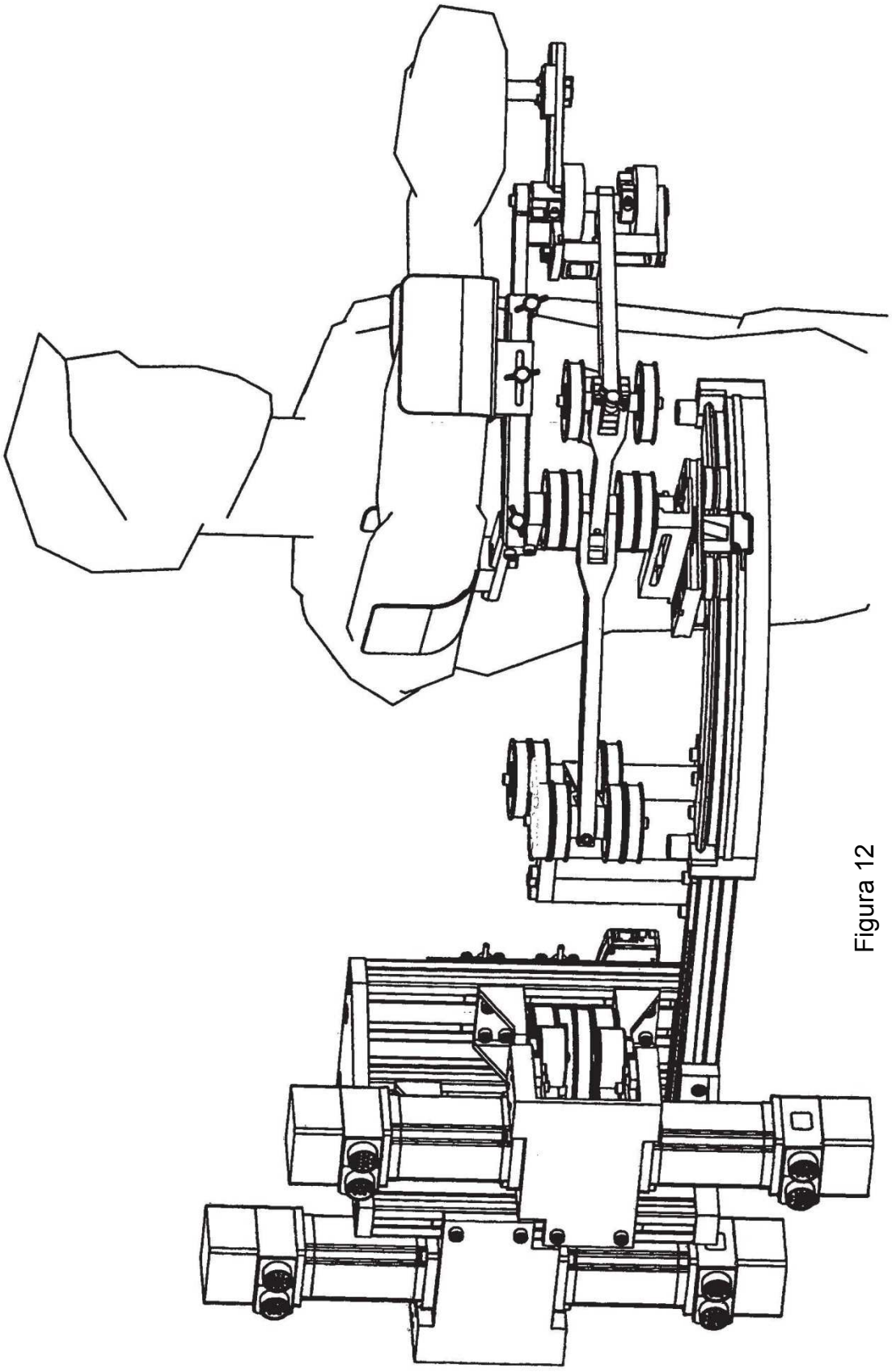

Figura 12

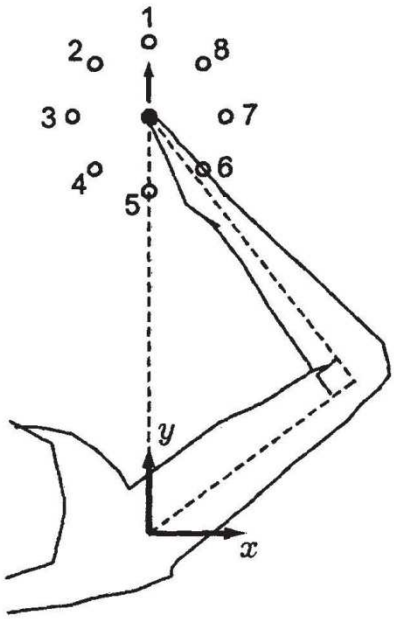

Figura 13a

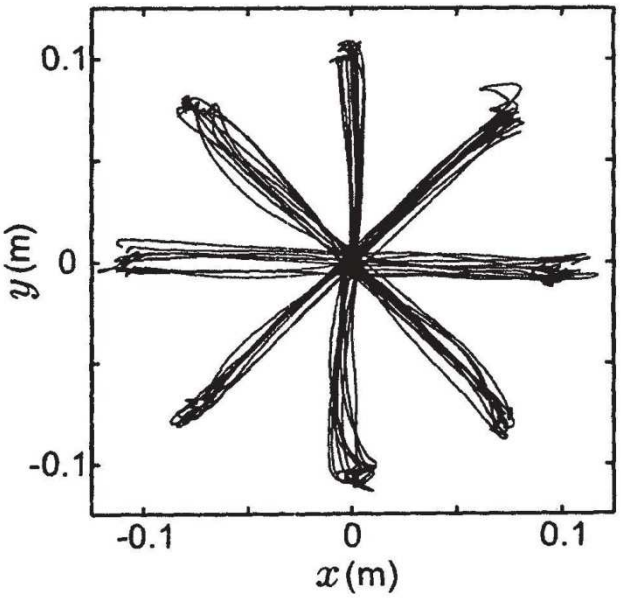

Figura 13b

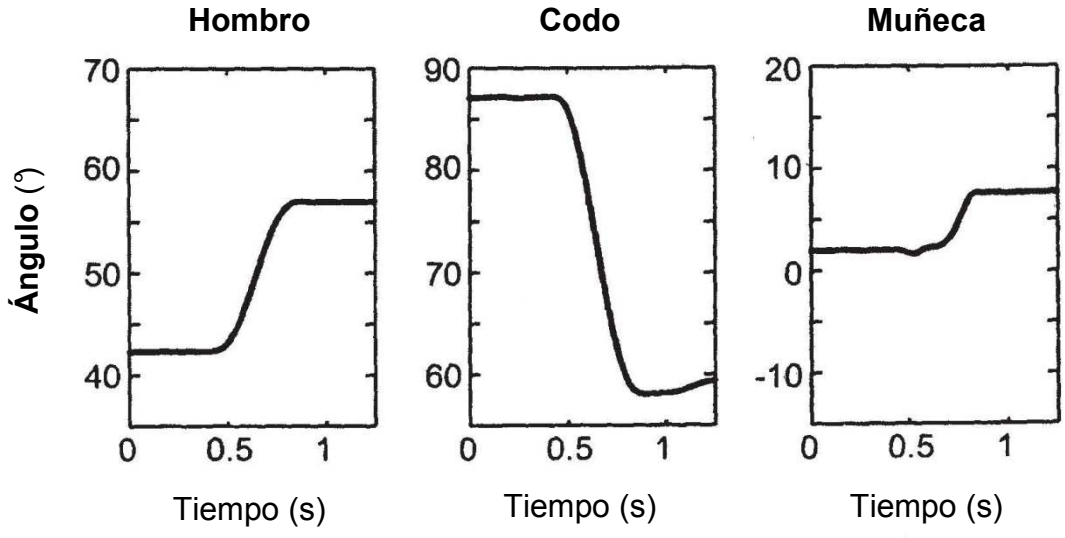

Figura 13c

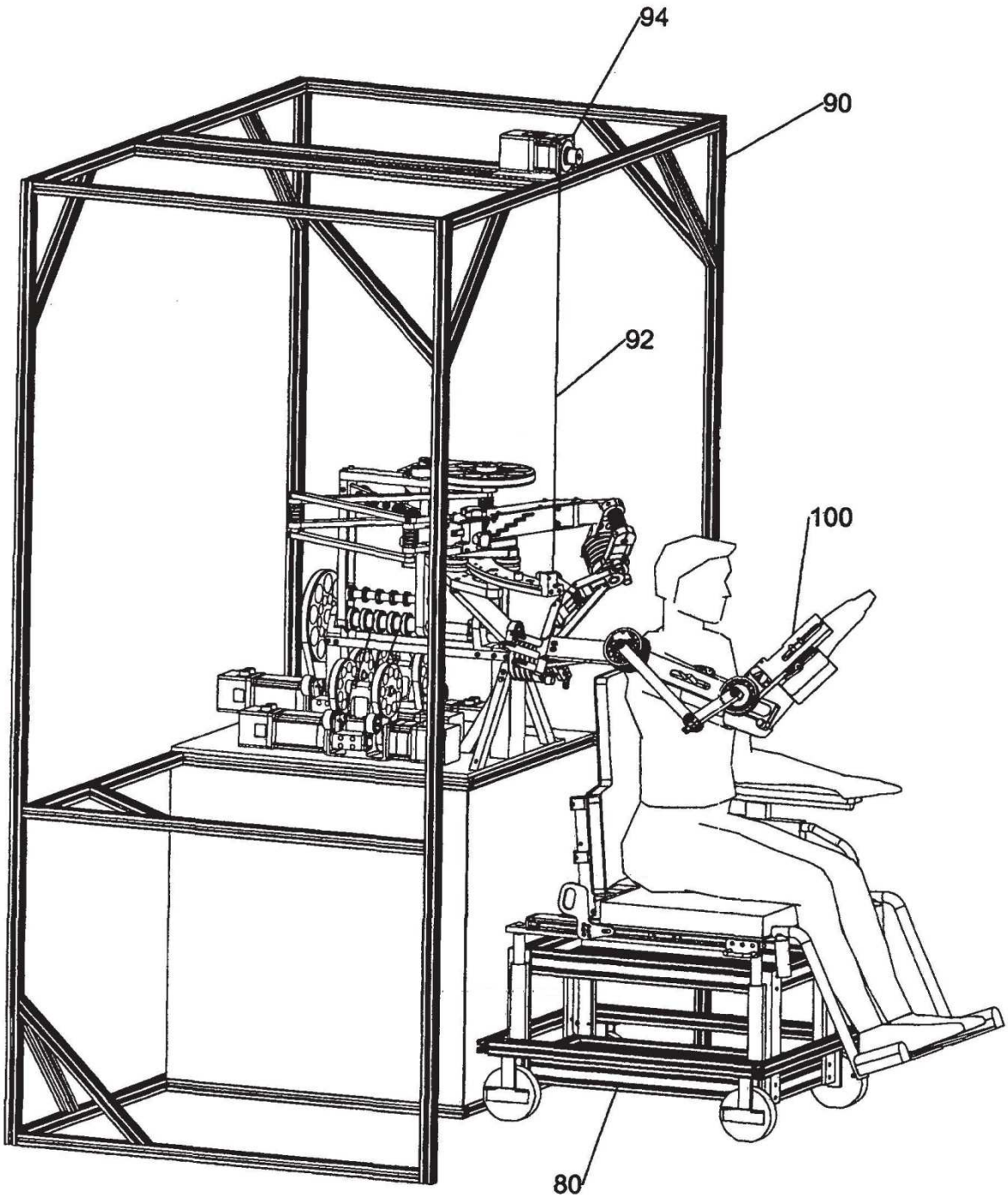

Figura 14

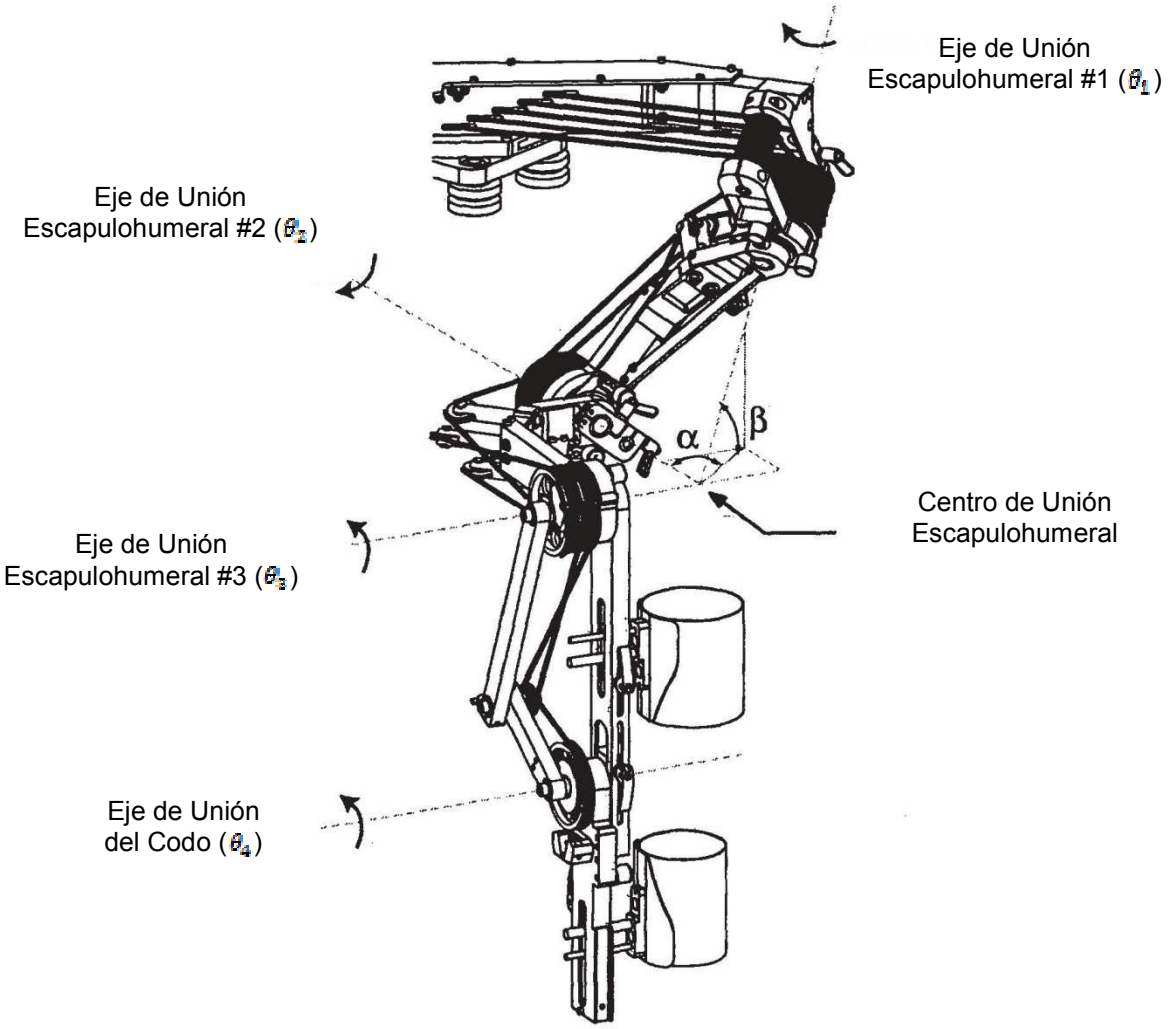

Figura 15a

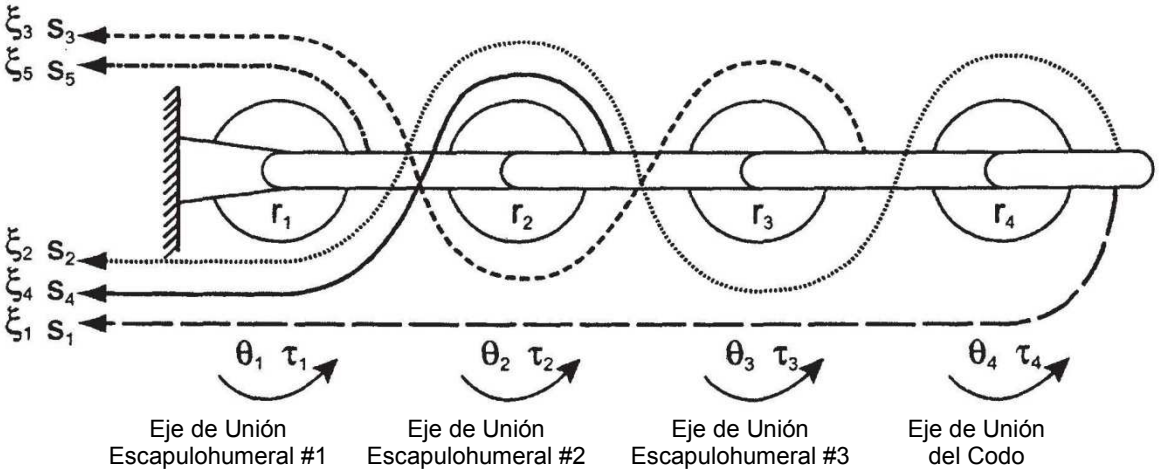

Figura 15b

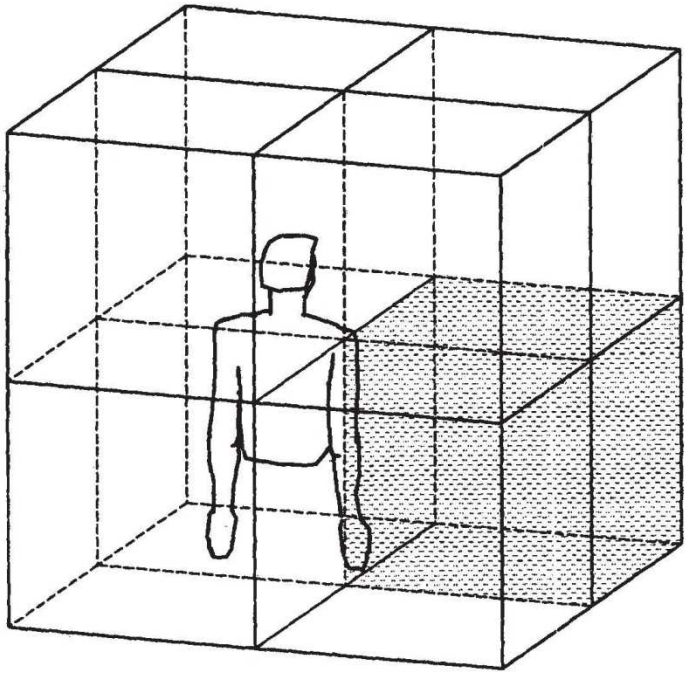

Figura 16a

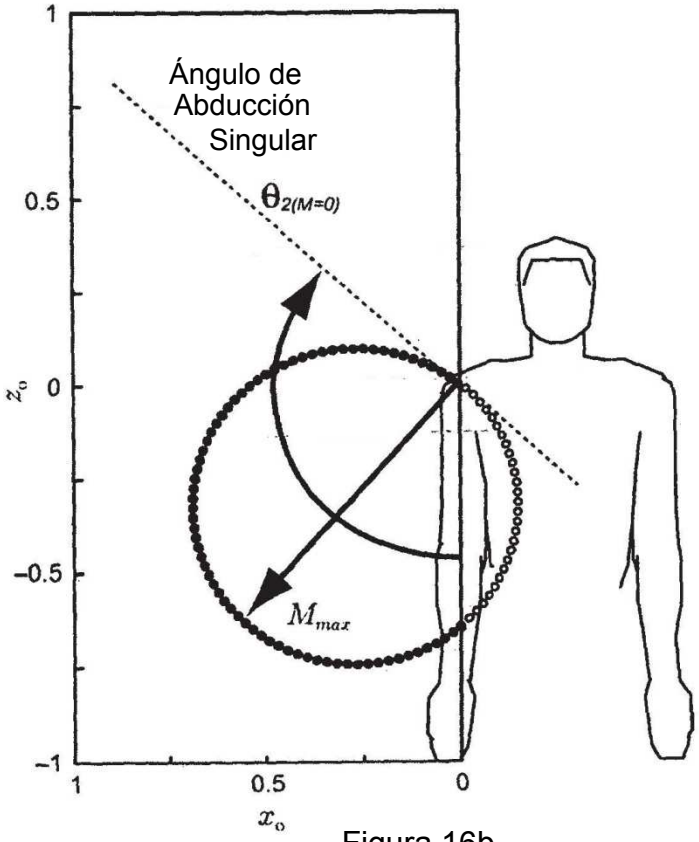

Figura 16b

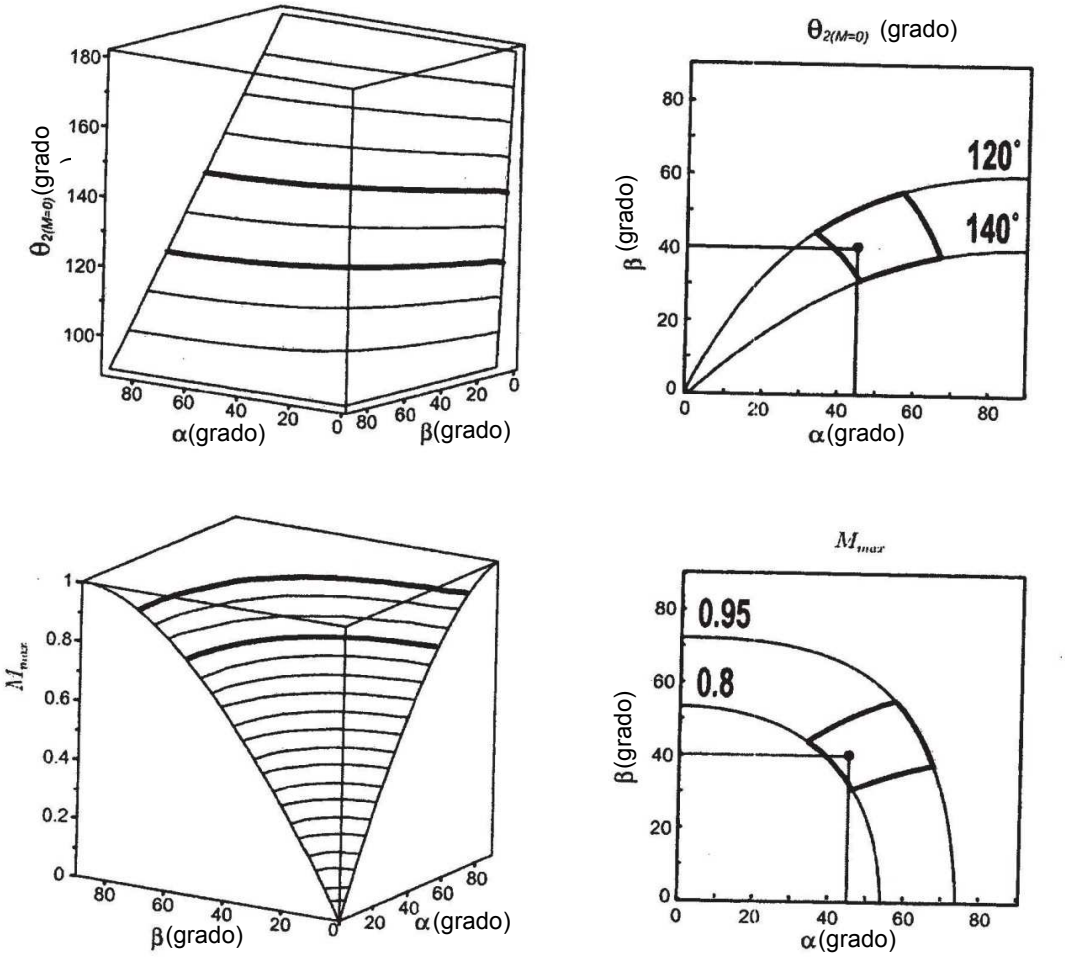

Figura 16c

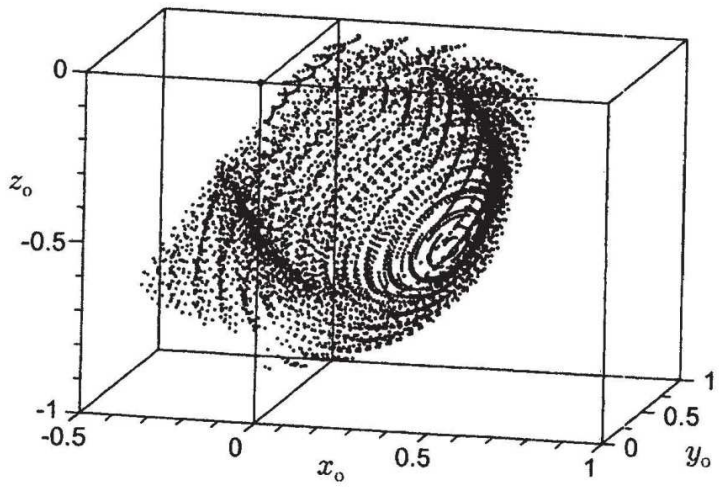

Figura 16d

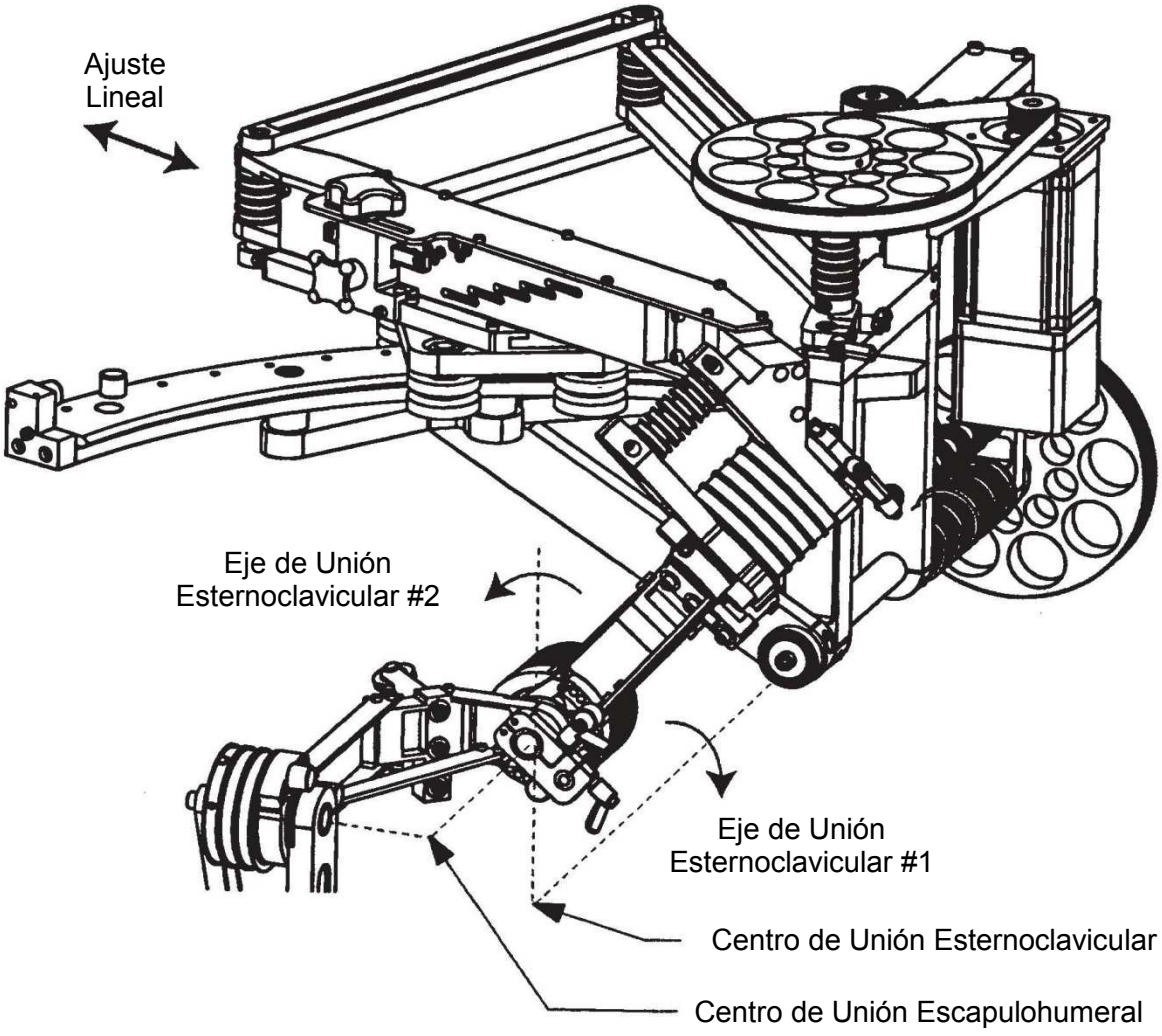
Ajuste
Lineal
Eje de Unión
Esternoclavicular #2
Eje de Unión
Esternoclavicular #1
Centro de Unión Esternoclavicular
Centro de Unión Escapulohumeral

Figura 17

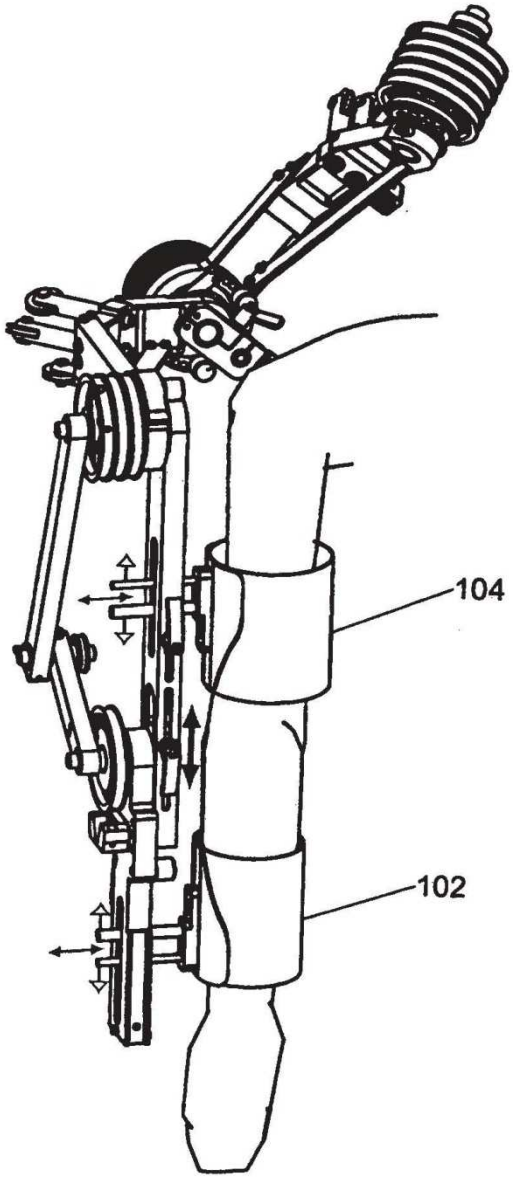

Figura 18a

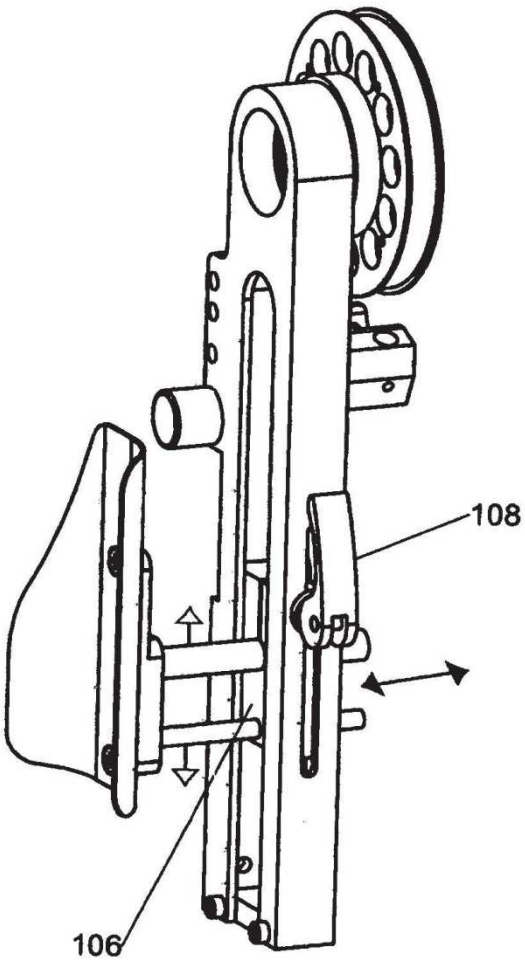

Figura 18b