

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 427 563**

51 Int. Cl.:

E06C 5/44 (2006.01)

E06C 5/06 (2006.01)

E06C 5/36 (2006.01)

B66F 11/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.09.2006 E 06119983 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2013 EP 1772588**

54 Título: **Escalera articulada o plataforma elevable con control de trayectoria de posición y amortiguación de vibración activa**

30 Prioridad:

08.09.2005 DE 102005042721

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

31.10.2013

73 Titular/es:

**IVECO MAGIRUS AG (100.0%)
NICOLAUS-OTTO-STRASSE 25-27
D-89079 ULM, DE**

72 Inventor/es:

SAWODNY, OLIVER

74 Agente/Representante:

RUO, Alessandro

ES 2 427 563 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Escalera articulada o plataforma elevable con control de trayectoria de posición y amortiguación de vibración activa

5 **Campo de la invención**

[0001] La invención se refiere a una escalera orientable o similar, con una unidad de escalera telescópica y, acoplado en el extremo de la unidad de escalera, un brazo articulado que porta una jaula.

10 **Técnica anterior**

15 [0002] Las escaleras orientables, por ejemplo las escaleras de bomberos o dispositivos similares, tal como plataformas sobre mástil articuladas o telescópicas y dispositivos elevadores de rescate, están montadas en general sobre un vehículo de tal modo que estas pueden girarse o elevarse. En el caso especial de una escalera articulada, se proporciona adicionalmente un brazo articulado inclinable que puede ser, además, telescópico con otro eje. El control es un control de trayectoria de posición que mantiene la jaula o plataforma en una trayectoria de posición especificada en el área de funcionamiento de la escalera orientable o plataforma elevable. De ese modo, las vibraciones y los movimientos oscilatorios de la jaula o plataforma elevadora se amortiguan de forma activa.

20 [0003] Cada una de las especificaciones de patente de Alemania DE 100 16 136 C2 y DE 100 16 137 C2 dan a conocer unas escaleras orientables que están provistas de un mando o control para mover las secciones de escalera. De acuerdo con el documento DE 100 16 136 C2, las vibraciones de las secciones de escalera se evitan mediante la realimentación de por lo menos una de las variables medidas: la flexión de la escalera en la dirección horizontal y vertical, el ángulo de elevación de la escalera, el ángulo de rotación, la longitud de extensión y la masa de la jaula, por medio de un controlador a las variables de control para las unidades de accionamiento. Un control de piloto reproduce el comportamiento de movimiento idealizado de la escalera en un modelo dinámico, basado en ecuaciones diferenciales, y calcula las variables de control idealizadas para las unidades de accionamiento de las secciones de escalera, con el fin de posibilitar un movimiento esencialmente libre de vibraciones de la escalera.

30 [0004] Tales escaleras orientables se controlan de forma hidráulica o electro-hidráulica mediante unas palancas de mano. En el caso de un control puramente hidráulico, la desviación de la palanca de mano se convierte directamente por el circuito de control hidráulico en una señal de control proporcional para el bloque de control diseñado como una válvula proporcional. Los elementos de amortiguación en el circuito de control hidráulico pueden usarse para hacer los movimientos menos trepidantes y más suaves durante la transición. No obstante, estos no pueden adaptarse de forma satisfactoria a la totalidad del intervalo de funcionamiento de las longitudes de extensión y los ángulos de elevación. Además, a menudo esto conduce a unas posiciones sumamente amortiguadas con un comportamiento de respuesta lento.

40 [0005] En el flujo de señales, los controles electrohidráulicos en primer lugar convierten la desviación de la palanca de mano en una señal eléctrica que se procesa adicionalmente en un dispositivo de control con un microprocesador. Por lo tanto, la señal, de acuerdo con el estado de la técnica, se amortigua mediante unas funciones rampa de tal modo que los movimientos de la escalera orientable o plataforma de trabajo son menos trepidantes y más suaves. La señal eléctrica procesada se pasa entonces a la válvula proporcional hidráulica. La pendiente de la función rampa limita el efecto de la amortiguación y es una medida del comportamiento de respuesta.

45 [0006] Mientras que la amortiguación de la vibración o los movimientos oscilatorios de las escaleras orientables simples convencionales, que portan la jaula en el extremo de su unidad de escalera telescópica, es posible de forma satisfactoria por medio del control que se ha descrito anteriormente, el guiado libre de vibraciones de las escaleras orientables con un brazo articulado en el extremo de una unidad de escalera telescópica, que además puede ser telescópico él mismo, da lugar a problemas significativos debido a que, en este caso, han de considerarse grados de libertad y componentes de vibración adicionales. Esto sobrepasa las capacidades de los sistemas de mando y de control conocidos, de acuerdo con el estado de la técnica, de tal modo que la totalidad del sistema de escalera puede degenerar en unos estados de funcionamiento críticos durante el despliegue, lo que puede conducir a situaciones peligrosas.

55 [0007] El documento EP 1 536098 A1 da a conocer una escalera orientable de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1.

Sumario de la invención

60 [0008] El objetivo de la invención es equipar una escalera orientable, que tiene un brazo articulado, con un control de trayectoria de posición que amortigua de forma activa las vibraciones.

65 [0009] El presente objetivo se consigue de acuerdo con la invención por medio de una escalera orientable que tiene un brazo articulado y un brazo telescópico con un control de trayectoria de posición con amortiguación de vibración activa de acuerdo con la reivindicación 1.

[0010] Las realizaciones preferibles de la escalera orientable de acuerdo con la invención resultan de las reivindicaciones dependientes.

[0011] Las reivindicaciones adjuntas se consideran una parte integral de la presente descripción.

5 [0012] El control de trayectoria de posición con amortiguación de vibración activa se basa en el principio de describir el comportamiento dinámico de los sistemas mecánicos e hidráulicos de la escalera orientable en primer lugar como un modelo dinámico basado en ecuaciones diferenciales.

10 [0013] Basándose en este modelo dinámico, puede diseñarse un control de piloto que, bajo las condiciones idealizadas del modelo dinámico, no genera vibraciones de la unidad de escalera cuando se mueven los ejes de la escalera articulada y guía la jaula exactamente sobre la trayectoria de posición especificada. A diferencia de las escaleras orientables simples, a causa del brazo articulado recogido, en el caso de las escaleras articuladas tienen lugar vibraciones de torsión adicionales, que también han de amortiguarse mediante el accionamiento giratorio. Además, ha de tenerse en cuenta el eje telescópico del brazo articulado. Estos ejes adicionales han de considerarse en el planificador de trayectoria de posición.

15 [0014] El prerequisite para el control de piloto es, en primer lugar, la generación de la trayectoria de posición en el área de funcionamiento que ha de asumirse por el módulo de planificación de trayectoria de posición. El módulo de planificación de trayectoria de posición genera la trayectoria de posición que se da al control de piloto en forma de funciones del tiempo para la posición de la jaula, la velocidad y la aceleración, la sobreaceleración (*jerking*, tasa de variación de la aceleración) y, si es necesario, la derivada con respecto al tiempo de la sobreaceleración, a partir del requisito de entrada de la velocidad de referencia proporcional a la desviación de la palanca de mano en el caso de un funcionamiento semiautomático o de puntos objetivo en el caso de un funcionamiento completamente automático.

20 [0015] Debido a que, sin embargo, pueden surgir vibraciones o desviaciones con respecto a la trayectoria de posición de referencia, el sistema del control de piloto y el módulo de planificación de trayectoria de posición está soportado por un controlador de estados durante las fuertes desviaciones con respecto al modelo dinámico idealizado (por ejemplo, a través de perturbaciones). Este realimenta por lo menos una de las variables medidas: el ángulo de elevación, la longitud de extensión, el ángulo de rotación, el ángulo de articulación, la flexión de la escalera en la dirección horizontal y vertical o la torsión de forma respectiva.

Breve descripción de los dibujos

25 [0016] La invención se ejemplificará posteriormente con la ayuda de los dibujos, en los que:

- la figura 1 muestra la estructura mecánica básica de una escalera orientable a modo de ejemplo
- la figura 2 muestra grados rígidos y elásticos de libertad del sistema
- la figura 3 muestra la interacción del control hidráulico y el control de trayectoria de posición
- la figura 4 muestra la totalidad de la estructura del control de trayectoria de posición
- la figura 5 muestra el funcionamiento semiautomático y completamente automático del módulo de planificación de trayectoria de posición
- la figura 6 muestra el modelado como un sistema con masas equivalentes y elementos amortiguadores de resorte
- la figura 7 muestra la estructura del controlador de eje para el eje de rotación
- la figura 8 muestra el controlador de eje para el eje de elevación / inclinación
- la figura 9 muestra la cinemática para el eje de elevación.

Descripción detallada de la invención

30 [0017] La figura 1 muestra la estructura mecánica básica de una escalera orientable con un brazo articulado o similar. La escalera orientable está montada en general sobre un vehículo 1. Para colocar la jaula 3 en el área de funcionamiento, la unidad de escalera 5 puede bascularse con el eje de elevación / inclinación 7 con el ángulo φ_A y plegarse con el eje de articulación 8 con el ángulo φ_K . El brazo articulado puede extenderse y recogerse con el eje de brazo articulado telescópico 10. La longitud de la escalera l puede variarse con el eje de extensión / repliegue 9. El eje de rotación 11 permite la orientación con el ángulo φ_D alrededor del eje vertical. En el caso de un vehículo que no se encuentra en posición horizontal, una inclinación adicional no deseable puede compensarse con el eje de nivel 13 tras la rotación de la unidad de escalera mediante la basculación del mecanismo de escalera 15 con el ángulo φ_N .

35 [0018] La figura 2 muestra una vez más por separado los grados rígidos y elásticos de libertad del sistema relevantes para la deducción del modelo dinámico. Los grados rígidos de libertad $\varphi_A, \varphi_K, \varphi_D, l, l_K$ se corresponden con los 5 ejes principales de la escalera (sin eje de nivel). Los grados elásticos de libertad son la flexión horizontal y vertical v_x, v_y , así como la torsión de la unidad de escalera α_x y la flexión horizontal y vertical w_x, w_y así como la torsión β_x del brazo articulado.

[0019] En general, la escalera orientable tiene un sistema de accionamiento hidráulico 21. Este consiste en la bomba hidráulica 33 accionada mediante el motor de accionamiento, la válvula proporcional 39 y los motores hidráulicos 311 y los cilindros hidráulicos 313. El control hidráulico está equipado, en general, con sistemas con un control de caudal auxiliar para los circuitos hidráulicos con propiedades de detección de carga. En este caso, es esencial que las tensiones de control U_{SiD} , U_{SiA} , U_{SiN} , U_{SiE} , U_{SiK} , U_{SiT} en las válvulas proporcionales se conviertan por el control de caudal auxiliar en los caudales proporcionales Q_{FD} , Q_{FA} , Q_{FN} , Q_{FE} , Q_{FK} , Q_{FT} en el circuito hidráulico correspondiente (figura 3).

[0020] Es esencial que las funciones del tiempo para las tensiones de control de las válvulas proporcionales dejen de deducirse directamente a partir de las palancas de mano, por ejemplo mediante unas funciones rampa, sino que se calculen en el control de trayectoria de posición 31 de tal forma que no tenga lugar vibración alguna cuando la escalera se mueve y la jaula sigue la trayectoria de posición deseada en el área de funcionamiento.

[0021] La base para esto es un modelo dinámico del sistema de escalera orientable, con la ayuda del cual se consigue el presente objeto basándose en los datos de sensor de por lo menos una de las variables v_y , v_z , α_x , l , φ_A , φ_D , φ_N , φ_K , l_K y las entradas de mando $\dot{q}_{obj.} = [\dot{\varphi}_{Dobj.}, \dot{\varphi}_{Aobj.}, \dot{\varphi}_{Kobj.}, \dot{l}_{obj.}, \dot{l}_{Kobj.}]^T$ para un funcionamiento semiautomático a partir de la palanca de mano 35 o $q_{obj.} = [\varphi_{Dobj.}, \varphi_{Aobj.}, \varphi_{Kobj.}, l_{obj.}, l_{Kobj.}]^T$ para un funcionamiento completamente automático a partir de la matriz de posición objetivo 37. $\varphi_{Aobj.}$ es, por lo tanto, la coordenada de ángulo objetivo en la dirección del eje de elevación / inclinación 7 para el centro de la jaula. $\varphi_{Dobj.}$ se corresponde con la coordenada de ángulo objetivo para el eje de rotación 11 y $\varphi_{Kobj.}$ con la coordenada de ángulo objetivo para el eje de articulación 8. $l_{obj.}$ es la posición objetivo para el eje de brazo articulado telescópico 10, $l_{obj.}$ es la posición objetivo para el eje de extensión / repliegue 9 para el centro de la jaula. Las componentes para el vector velocidad objetivo han de entenderse como análogas a las componentes para el vector de posición objetivo que se ha explicado anteriormente. Los vectores correspondientes para la posición de la jaula con referencia a la coordenada de ángulo de rotación, a la coordenada de ángulo de elevación, a la coordenada de ángulo de articulación y a la longitud de extensión y sus derivadas se calculan a partir de estas variables preestablecidas en el módulo de planificación de trayectoria de posición 39 o 41 (figura 4), tal como se explica con detalle posteriormente.

[0022] En primer lugar, la totalidad de la estructura (figura 4) del control de trayectoria de posición 31 se explicará posteriormente.

[0023] La función del módulo de planificación de trayectoria de posición 39 o 41 es el cálculo de las funciones del tiempo de la posición de referencia de la jaula, de los ejes de rotación, elevación, extensión, telescópico y de articulación y sus derivadas que se combinan en los vectores $\varphi_{Dref.}$, $\varphi_{Aref.}$, $l_{ref.}$, $l_{Kref.}$, $\varphi_{Kref.}$. Cada uno de estos vectores comprende como máximo 4 componentes hasta la 3ª derivada (la posición, la velocidad, la aceleración, la sobreaceleración). Los vectores de posición de referencia se suministran a los controladores de eje 43, 45, 47, 49, 411 y 413 que, de este modo, calculan las funciones de control U_{SiD} , U_{SiA} , U_{SiE} , U_{SiT} , U_{SiN} , U_{SiK} para las válvulas proporcionales 39 del sistema de accionamiento hidráulico 21 mediante la evaluación de por lo menos uno de los valores de sensor v_y , v_x , α_x , l , l_K , φ_A , φ_D , φ_N , φ_K .

[0024] El operador selecciona previamente las celeridades objetivo o los destinos o bien por medio de la palanca de mano 35 en los paneles operativos (funcionamiento semiautomático) o bien por medio de una matriz de puntos objetivo 37 que se ha almacenado en el ordenador durante una excursión de escalera orientable previa (funcionamiento completamente automático). Teniendo en cuenta las restricciones cinemáticas (la velocidad máxima y la aceleración máxima), el módulo de planificación de trayectoria de posición semiautomático (41) calcula las funciones del tiempo correspondientes de la posición de referencia de la jaula a partir de las señales de palanca de mano para las diversas direcciones de movimiento (la rotación, la elevación / inclinación, la extensión / repliegue y la articulación del brazo articulado) que pueden adoptarse como la velocidad objetivo para el eje respectivo. Debido a que las restricciones cinemáticas (en especial, la velocidad máxima para cada eje) no son constantes, sino que pueden variar, por ejemplo dependiendo de la longitud de extensión o de la masa en la jaula, los métodos de planificación de trayectoria de posición que calculan por adelantado la totalidad de la trayectoria de posición que va a seguirse no son adecuados para la presente solicitud. El fin de un funcionamiento completamente automático es moverse a lo largo de una trayectoria de posición previamente recorrida tan rápidamente como sea posible (posiblemente, con lentitud para la finalidad de evitar colisiones con obstáculos) a la vez que se mantiene una desviación permitida máxima previamente definida. Un cálculo de la función del tiempo por el limitador de inclinación 53 es adecuado para un funcionamiento semiautomático. Para un funcionamiento completamente automático, el limitador de inclinación 53 se complementa mediante un lazo de posicionamiento con un controlador proporcional (controlador p) con limitación variable 57 (figura 5).

[0025] La diferencia entre la posición objetivo y la posición de referencia corregida real se amplifica mediante el controlador p y se limita a la velocidad máxima permitida $\dot{\varphi}_{Dmax.}$. La salida de la realimentación adicional es entonces la velocidad objetivo $\dot{\varphi}_{Dobj.}$ correspondiente, la cual a su vez forma la entrada del limitador de inclinación 53 del módulo de planificación de trayectoria de posición semiautomático (41). Con el fin de permitir unas limitaciones cinemáticas alteradas, la velocidad máxima para cada eje puede cambiarse de forma proporcional por un factor,

debido a que la limitación es variable como una función de la velocidad máxima. Este factor también puede usarse para la sincronización de los ejes y se calcula en el módulo de 'cálculo de factores de sincronización' 51.

5 **[0026]** El cálculo de la sincronización de los ejes se lleva a cabo teniendo en cuenta la distancia hasta el siguiente punto objetivo en la matriz de puntos objetivo. El eje que requiere el tiempo más prolongado para alcanzar el siguiente punto objetivo limita el movimiento. Esto quiere decir que el factor proporcional para el eje que ha de cubrir la trayectoria de posición más larga hasta el siguiente punto objetivo es igual a 1. La velocidad objetivo correspondiente es, por lo tanto, igual a la velocidad máxima. Además, las velocidades de los otros ejes se reducen de forma proporcional.

10 **[0027]** La transferencia hasta el siguiente punto objetivo del eje respectivo en la matriz de puntos objetivo es dependiente de la distancia restante desde la posición real de la escalera hasta el punto objetivo real y la desviación máxima que puede tener lugar si el siguiente punto objetivo en la matriz de puntos objetivo se usa como la posición objetivo real. Para esto, en primer lugar la posición de escalera real se convierte en coordenadas cartesianas en el módulo de transformación de coordenadas 55. Como prerrequisito para la subsiguiente conmutación / cambio al siguiente punto objetivo, la distancia euclídea hasta el siguiente punto objetivo y la distancia en la dirección normal de una línea recta desde la posición real de la escalera hasta la siguiente salvo una posición objetivo se calculan entonces 59. La conmutación tiene lugar si ambas distancias se encuentran dentro de un límite especificado. La escalera permanece, por lo tanto, dentro de un pasillo definido a la vez que se desplaza.

20 **[0028]** Las funciones del tiempo para la posición de referencia de la jaula en todas las direcciones relevantes de movimiento con las derivadas que se mencionan se encuentran disponibles de ese modo en la salida del planificador de trayectoria de posición semiautomático así como el planificador de trayectoria de posición completamente automático, teniendo en cuenta las restricciones cinemáticas.

25 **[0029]** Las funciones del tiempo se suministran a los controladores de eje respectivos, cuya estructura se describe posteriormente.

30 **[0030]** Las funciones de salida del módulo de planificación de trayectoria de posición se suministran a los bloques de control de piloto correspondientes en forma de una posición de referencia de la jaula en las direcciones individuales así como sus derivadas (la velocidad, la aceleración, la sobreaceleración y la derivada de la sobreaceleración). Las funciones se amplifican en estos bloques de tal forma que, como resultado, se obtiene un desplazamiento verdadero en cuanto a la trayectoria de posición de la escalera sin vibraciones bajo las suposiciones / condiciones idealizadas del modelo dinámico. La base para la determinación de las ganancias de control de piloto es el modelo dinámico que se obtendrá para los ejes individuales en las siguientes secciones. Bajo estas condiciones idealizadas, la vibración de la escalera orientable se elimina de ese modo y la jaula sigue la trayectoria de posición generada.

35 **[0031]** No obstante, debido a que perturbaciones tales como los efectos del viento pueden afectar a la escalera orientable y el modelo idealizado solo puede reproducir en parte las circunstancias dinámicas existentes, los controles de piloto pueden complementarse mediante los bloques de controlador de estados correspondientes. Las variables medidas para las posiciones respectivas así como para la flexión y la torsión de la unidad de escalera (y, opcionalmente, sus derivadas) se amplifican en estos bloques y se realimentan de nuevo de vuelta a la entrada de servo Las derivadas de las variables medidas se generan numéricamente en el control de microprocesador.

40 **[0032]** La deducción del modelo dinámico, que es la base para el cálculo de las ganancias de control de piloto y el controlador de estados, debería servir ahora para explicar el procedimiento con detalle.

45 **[0033]** El modelo se obtiene como un sistema de múltiples cuerpos con resortes y elementos amortiguadores por medio del formalismo de Lagrange. Una escalera orientable o similar se considera ejemplar, como un manipulador de múltiples ejes con tres grados de rotación, así como un grado lineal, de libertad. Además de estos grados rígidos de libertad, los movimientos de los grados elásticos de libertad en el brazo articulado y la unidad de escalera (la flexión en la dirección longitudinal y transversal así como la torsión alrededor del eje longitudinal) se tienen en cuenta en el modelo. En resumen, resultan los grados rígidos de libertad que se enumeran tal como sigue para la creación del modelo (figura 6):

- 50
- φ_A : Ángulo de elevación
 - φ_D : Ángulo de rotación
 - φ_K : Ángulo de articulación
 - l_A : Longitud de la unidad de escalera
- 55

60 así como los siguientes grados elásticos de libertad (figura 6):

- α_x : Torsión de la unidad de escalera
 - v_y : Flexión de la unidad de escalera en la dirección horizontal
 - v_z : Flexión de la unidad de escalera en la dirección vertical
 - β_x : Torsión del brazo articulado
- 65

w_y : Flexión del brazo articulado en la dirección horizontal
 w_z : Flexión del brazo articulado en la dirección vertical

5 [0034] En la creación del modelo, la escalera orientable o similar no se considera como un sistema de elementos grandes. Mediante el cálculo de las masas equivalentes y los momentos de inercia equivalentes, la totalidad del sistema puede considerarse como un sistema que consiste en tres masas puntuales. Los elementos del sistema se aproximan de ese modo mediante tres masas equivalentes y los grados elásticos de libertad considerados como elementos amortiguadores de resorte (véase la figura 6). Mediante el método de las ecuaciones de Lagrange de 2º orden, se obtienen diez ecuaciones diferenciales mutuamente independientes con un total de diez grados de libertad del sistema. Representado en forma matricial, esto da como resultado:

$$\underline{M}\ddot{\underline{q}} + \underline{D}\dot{\underline{q}} + \underline{C}[\dot{\underline{q}}, \underline{q}] + \underline{K}\underline{q} + \underline{G}[\underline{q}] = \underline{F} \quad (10)$$

15 \underline{M} : Matriz de masas
 \underline{D} : Matriz de amortiguación
 \underline{C} : Vector de Coriolis y centrípeto
 \underline{K} : Vector de rigidez
 \underline{G} : Vector de gravedad
 \underline{F} : Vector de fuerzas externas

20 [0035] Las fuerzas generalizadas F al lado derecho de la ecuación de movimiento son los momentos o fuerzas que aplican las unidades de accionamiento hidráulico. La ecuación de movimiento (ecuación 11) se simplifica de la siguiente forma. El desplazamiento de los centros de gravedad de los cuerpos parciales resulta exclusivamente a partir de los movimientos en las coordenadas rígidas, mediante lo cual los desplazamientos en flexión y torsión en los elementos de la matriz de masa pueden ajustarse a cero. Los grados elásticos de libertad que pertenecen al brazo articulado se desprecian debido a la alta rigidez frente a flexión y frente a torsión del brazo articulado. Estas dos suposiciones dan como resultado una reducción en las dimensiones del sistema de diez a siete grados de libertad. Los elementos de las ecuaciones individuales de movimiento de la ecuación 10 pueden determinarse mediante el uso de los métodos simbólicos disponibles en los sistemas algebraicos informáticos comerciales. La estructura simplificada de la matriz de masa de las ecuaciones de movimiento (ecuación 10) da como resultado:

$$\underline{M}\ddot{\underline{q}} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{15} & m_{16} & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} & 0 & 0 & m_{27} \\ 0 & m_{32} & m_{33} & m_{34} & 0 & 0 & m_{37} \\ 0 & m_{42} & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} & 0 \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} & 0 \\ 0 & m_{72} & m_{73} & 0 & 0 & 0 & m_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_D \\ \ddot{\phi}_A \\ \ddot{\phi}_S \\ \ddot{l}_A \\ \ddot{\alpha}_x \\ \ddot{v}_y \\ \ddot{v}_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

35 [0036] Dos grupos de ecuaciones diferenciales pueden extraerse de la ecuación 11, cada uno de los cuales puede resumirse en un subsistema. Las columnas marcadas por una única línea discontinua muestran la rotación del subsistema y las columnas marcadas por una línea de puntos muestran la elevación / inclinación del subsistema. Con la simplificación implementada se obtiene la siguiente estructura para las otras matrices de la ecuación de movimiento:

Matriz de amortiguación:

$$\underline{D}\underline{\dot{q}} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_D \\ \dot{\phi}_A \\ \dot{\phi}_S \\ \dot{l}_A \\ \dot{\alpha}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

5 Vector de Coriolis y centrípeto:

$$\underline{C}[\underline{\dot{q}}, \underline{q}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & c_{15} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & c_{25} & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 & 0 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & 0 & c_{55} & 0 & 0 \\ c_{61} & 0 & c_{63} & 0 & c_{65} & 0 & 0 \\ c_{71} & c_{72} & c_{73} & 0 & c_{75} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_D \\ \dot{\phi}_A \\ \dot{\phi}_S \\ \dot{l}_A \\ \dot{\alpha}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & z_{12} & z_{13} & 0 & z_{15} & 0 & 0 \\ z_{21} & 0 & z_{23} & 0 & z_{25} & 0 & 0 \\ z_{31} & z_{32} & 0 & 0 & z_{35} & 0 & 0 \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_{51} & z_{52} & z_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_{61} & 0 & z_{63} & 0 & z_{65} & 0 & 0 \\ z_{71} & z_{72} & z_{73} & 0 & z_{75} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_D^2 \\ \dot{\phi}_A^2 \\ \dot{\phi}_S^2 \\ \dot{l}_A^2 \\ \dot{\alpha}_x^2 \\ \dot{v}_y^2 \\ \dot{v}_z^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

10 Matriz de rigidez:

$$\underline{K}\underline{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{55} \hat{=} c_{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{66} \hat{=} c_{vy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{77} \hat{=} c_{vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_D \\ \phi_A \\ \phi_S \\ l_A \\ \alpha_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

(Los elementos de la matriz de rigidez dependen fuertemente de la longitud de extensión de la escalera. Una función que refleja esta dependencia se calcula a partir de simulaciones).

15

Vector de gravedad:

$$\underline{G}[\underline{q}] = \begin{bmatrix} 0 \\ g_{21} \\ g_{31} \\ g_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

5 **[0037]** En lo sucesivo, se especifican las ecuaciones de movimiento de los subsistemas, necesarias para el
 establecimiento del modelo de espacio de estados y el cálculo de la siguiente unidad de control. Los elementos de
 las ecuaciones de movimiento que se enumeran en lo sucesivo son, en parte, bastante exhaustivos, de tal modo que
 en el presente caso se prescindirá de una descripción detallada. En el presente caso solo se menciona que los
 10 elementos de las siguientes ecuaciones de movimiento son dependientes, en general, de forma no lineal de diversas
 variables de sistema tales como, por ejemplo, las masas equivalentes, los momentos de inercia, los diversos
 ángulos del grado rotacional de libertad, etc.

[0038] Rotación del subsistema:

15 • Ecuación de movimiento para φ_D :

$$m_{11}\ddot{\varphi}_D + m_{15}\ddot{\alpha}_x + m_{16}\ddot{v}_y + c_{11}\dot{\varphi}_D + c_{13}\dot{\alpha}_x + d_{11}\dot{\varphi}_D = M_D \quad (16)$$

20 • Ecuación de movimiento para α_x :

$$m_{51}\ddot{\varphi}_D + m_{55}\ddot{\alpha}_x + m_{56}\ddot{v}_y + k_{55}\alpha_x + c_{51}\dot{\varphi}_D + c_{53}\dot{\varphi}_S + d_{55}\dot{\alpha}_x = 0 \quad (17)$$

• Ecuación de movimiento para v_y :

$$m_{61}\ddot{\varphi}_D + m_{65}\ddot{\alpha}_x + m_{66}\ddot{v}_y + k_{66}v_y + c_{61}\dot{\varphi}_D + c_{63}\dot{\varphi}_S + d_{66}\dot{v}_y = 0 \quad (18)$$

[0039] Elevación / inclinación del subsistema:

30 • Ecuación de movimiento para φ_A :

$$m_{22}\ddot{\varphi}_A + m_{23}\ddot{\varphi}_S + m_{24}\ddot{l}_A + m_{27}\ddot{v}_z + g_{21} + c_{21}\dot{\varphi}_D + c_{22}\dot{\varphi}_A + z_{21}\dot{\varphi}_D^2 + z_{23}\dot{\varphi}_S^2 \\ + z_{25}\dot{\alpha}_x^2 + d_{22}\dot{\varphi}_A = M_A \quad (19)$$

• Ecuación de movimiento para φ_K :

$$m_{32}\ddot{\varphi}_A + m_{33}\ddot{\varphi}_S + m_{34}\ddot{l}_A + m_{37}\ddot{v}_z + g_{31} + c_{31}\dot{\varphi}_D + c_{32}\dot{\varphi}_A + z_{31}\dot{\varphi}_D^2 \\ + z_{32}\dot{\varphi}_A^2 + z_{35}\dot{\alpha}_x^2 + d_{33}\dot{\varphi}_S = M_K \quad (20)$$

- Ecuación de movimiento para I_A :

$$m_{42}\ddot{\phi}_A + m_{43}\ddot{\phi}_S + m_{44}\ddot{I}_A + g_{41} + c_{41}\dot{\phi}_D + c_{42}\dot{\phi}_A + z_{41}\dot{\phi}_D^2 + z_{42}\dot{\phi}_A^2 + z_{43}\dot{\phi}_S^2 + d_{44}\dot{I}_A = M_{IA} \quad (21)$$

- 5 • Ecuación de movimiento para v_z :

$$m_{72}\ddot{\phi}_A + m_{73}\ddot{\phi}_S + m_{77}\ddot{v}_z + g_{71} + c_{71}\dot{\phi}_D + c_{72}\dot{\phi}_A + z_{71}\dot{\phi}_D^2 + z_{72}\dot{\phi}_A^2 + z_{73}\dot{\phi}_S^2 + z_{75}\dot{\alpha}_x^2 + d_{77}\dot{v}_z + k_{77}v_z = 0 \quad (22)$$

10 **[0040]** En lo sucesivo, en primer lugar se obtendrá el modelo de espacio de estados para la rotación del subsistema, que forma entonces la base para el diseño del controlador y el control de piloto.

[0041] El par motor de accionamiento M_D , a partir de la ecuación 16, suministrado por un motor hidráulico correspondiente, puede describirse mediante las siguientes ecuaciones:

$$M_D = i_D \frac{V_D}{2\pi} \Delta p_D$$

$$\Delta \dot{p}_D = \frac{1}{V_D \beta} (Q_{FD} - i_D \frac{V_D}{2\pi} \dot{\phi}_D)$$

$$Q_{FD} = K_{PD} u_{SID} \quad (23)$$

15

Mediante lo cual

- 20 M_D denota el par motor de accionamiento
 Δp_D denota la diferencia de presiones
 $\dot{\phi}_D$ denota la velocidad angular
 Q_{FD} denota el caudal del aceite hidráulico
 u_{SID} denota la válvula de servo de tensión de control sin zona muerta
 25 i_D denota la relación de transmisión
 V_D denota el volumen de desplazamiento del motor hidráulico
 β denota la compresibilidad del aceite hidráulico
 K_{PD} denota el factor de proporcionalidad

30 **[0042]** Las ecuaciones 10 a 23 también pueden usarse para estimar las señales de flexión a partir de las señales de presión de las unidades de accionamiento hidráulico mediante el diseño de un observador.

[0043] Para la representación en el espacio de estados del sistema y el subsiguiente cálculo de controlador, puede aplicarse la siguiente simplificación para las unidades de accionamiento hidráulico, teniendo en cuenta el control de caudal auxiliar:

35

$$Q_{FD} = \frac{K_{PD}}{1 + sT} u_{SID} \quad (24)$$

[0044] T es una constante de retardo de tiempo que se determina a partir de mediciones sobre sistemas reales. Suponiendo que $\Delta p_D = 0$ (estado estacionario), se obtiene la siguiente relación:

40

$$0 = \frac{1}{V_D \beta} (Q_{FD} - i_D \frac{V_D}{2\pi} \dot{\phi}_D) \xrightarrow{\text{Transposición}} Q_{FD} = i_D \frac{V_D}{2\pi} \dot{\phi}_D \quad (25)$$

[0045] Si las ecuaciones 24 y 25 se igualan y la expresión resultante se reordena de forma correspondiente con respecto a $\dot{\phi}_D$, se obtiene como resultado la siguiente expresión:

$$\ddot{\phi}_D = \frac{K_{PD} 2\pi}{i_D V_D T} \cdot u_{SID} - \frac{1}{T} \cdot \dot{\phi}_D \quad (26)$$

5

[0046] Una simplificación adicional consiste en despreciar los términos de Coriolis y centrípeto en las ecuaciones 16 a 18 a causa de su pequeño efecto. Mediante la aplicación de las simplificaciones que se describen, la representación de las ecuaciones de movimiento para la rotación del subsistema en forma de espacio de estados es tal como sigue:

10

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_D &= \underline{A}_D \underline{x}_D + \underline{B}_D \underline{u}_D \\ \underline{y}_D &= \underline{C}_D \underline{x}_D \end{aligned} \quad (27)$$

con:

15

$$\text{Vector de estados} \quad \underline{x}_D = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_D \\ \alpha_x \\ \dot{\alpha}_x \\ v_y \\ \dot{v}_y \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\text{Valor de control:} \quad u_D = u_{SID} \quad (29)$$

$$\text{Valor de salida:} \quad y_D = \dot{\phi}_D \quad (30)$$

20 [0047] Con la forma del vector de estados elegido en la ecuación 28, en primer lugar se obtiene la relación

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & m_{55} & 0 & m_{56} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ m_{61} & 0 & m_{65} & 0 & m_{66} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_H \cdot \dot{\underline{x}}_D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{55} & -d_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{66} & -d_{66} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_D + \begin{bmatrix} \frac{K_{PD} 2\pi}{i_D V_D T} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{u}_D$$

(31)

[0048] Las matrices de sistema y de entrada A_D y B_D resultan de la multiplicación de la ecuación matricial 31 con la inversa de H . La composición solo se muestra de forma esquemática en el presente caso, a causa de la complejidad de los elementos individuales:

25

$$\underline{A}_D = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad \underline{B}_D = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ b_3 \\ 0 \\ b_5 \end{bmatrix} \quad (32)$$

[0049] A partir de la ecuación 30 el vector de salida \underline{C}_D produce:

$$\underline{C}_D = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (33)$$

5

[0050] El modelo dinámico del eje de rotación se interpreta como un sistema de parámetros variables con respecto a la longitud de extensión l , el ángulo de elevación φ_A y el ángulo de articulación φ_K . Las ecuaciones de estado deducidas son la base para el control de piloto 71 y el controlador de estados 73 que se describen en el siguiente diseño (figura 7). Las variables de entrada del bloque de control de piloto 71 son la velocidad angular de referencia $\dot{\varphi}_{Dref}$, la aceleración angular de referencia $\ddot{\varphi}_{Dref}$ y la sobreaceleración de referencia $\dddot{\varphi}_{Dref}$ (si es necesario también la derivada de la sobreaceleración de referencia). La variable de mando \underline{w}_D es, por lo tanto

10

$$15 \quad \underline{w}_D = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{Dref} \\ \ddot{\varphi}_{Dref} \\ \dddot{\varphi}_{Dref} \end{bmatrix} \quad (34)$$

15

[0051] Las componentes de \underline{w}_D se ponderan con las ganancias de control de piloto K_{VD0} a K_{VD2} y el total se suministra a la entrada de servo. El bloque de control de piloto 71 está soportado por un controlador de estados 73, debido a que el modelo dinámico, como ya se ha mencionado, solo reproduce de forma abstracta las relaciones reales y también puede reaccionar a perturbaciones no deterministas (por ejemplo, los efectos del viento, fluctuaciones de la carga en la jaula, etc.) con la ayuda del controlador. Por lo menos una de las cantidades que va a medirse del vector de estado (ecuación 28) se pondera con una ganancia de control y se realimenta de vuelta a la entrada de servo. Allí se genera la diferencia entre el valor de salida del bloque de control de piloto 71 y el valor de salida del bloque de controlador de estados 73. Lo sucesivo profundiza con más detalle en el cálculo de las ganancias de control de piloto. Si el controlador de estados se encuentra disponible, como se supone siempre en lo sucesivo, esto ha de tenerse en cuenta en el cálculo de las ganancias de control de piloto. (Sin el controlador de estados, la realimentación en la ecuación 34 dejaría de aplicarse y solo la matriz de sistema A_D se tendría en cuenta en la relación anterior. El procedimiento continúa entonces de la misma forma).

20

25

[0052] La representación en el espacio de estados a partir de la ecuación 27 se amplía, teniendo en cuenta el control de piloto y la realimentación de controlador, a:

30

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_D &= (\underline{A}_D - \underline{B}_D \underline{K}_D) \underline{x}_D + \underline{B}_D \underline{S}_D \underline{w}_D \\ \underline{y}_D &= \underline{C}_D \underline{x}_D \end{aligned} \quad (35)$$

con la matriz de control de piloto:

35

$$\underline{S}_D = [K_{VD0} \quad K_{VD1} \quad K_{VD2}] \quad (36)$$

y las ganancias de control de piloto K_{VD0} a K_{VD2} (que van a calcularse). Después del análisis de la ecuación 35, la tensión de salida del bloque de control de piloto viene dada por:

40

$$u_{D C.pil.} = K_{VD0} \dot{\phi}_{Dref} + K_{VD1} \ddot{\phi}_{Dref} + K_{VD2} \dddot{\phi}_{Dref} \quad (37)$$

[0053] Los coeficientes de control de piloto individuales se calculan tal como sigue. La transformación de Laplace de la ecuación 35 conduce al siguiente resultado:

5

$$\begin{aligned} \underline{x}_D &= (sI - \underline{A}_D + \underline{B}_D \underline{K}_D)^{-1} \cdot \underline{B}_D \underline{S}_D \begin{bmatrix} w_D \\ s w_D \\ s^2 w_D \end{bmatrix} = (sI - \underline{A}_D + \underline{B}_D \underline{K}_D)^{-1} \cdot \underline{B}_D \underline{S}_D \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \cdot w_D(s) \\ \underline{y}_D(s) &= \underbrace{\underline{C}_D \cdot (sI - \underline{A}_D + \underline{B}_D \underline{K}_D)^{-1} \cdot \underline{B}_D \underline{S}_D}_{G_D(s)} \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \cdot w_D(s) \end{aligned} \quad (38)$$

[0054] A partir de esto, se obtiene como resultado la función de transferencia de control que se da posteriormente (el valor de salida $y_D(s)$ se corresponde con la velocidad de rotación a partir de la ecuación 30):

10

$$\frac{y_D(s)}{w_D(s)} = \underbrace{\frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_{n-2} s^{n-2}}{N(s)} (K_{VD0} + K_{VD1} s + K_{VD2} s^2)}_{\tilde{G}_D(s)} \quad (39)$$

[0055] El valor de salida sigue, por lo tanto, exactamente la variable de mando si es válido que $\tilde{G}_D(s) \approx 1$. En este caso se obtiene un rendimiento de sistema ideal con respecto a la velocidad de rotación, la aceleración y la sobreaceleración. A pesar de que estos requisitos no pueden satisfacerse completamente, puede conseguirse un rendimiento favorable si las siguientes condiciones se cumplen:

15

$$\begin{aligned} \tilde{G}_D(s) &\stackrel{!}{=} \frac{\tilde{b}_0(K_{VDi}) + \tilde{b}_1(K_{VDi})s + \tilde{b}_2(K_{VDi})s^2 + \dots}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots} \\ a_0 &= \tilde{b}_0(K_{VDi}) \\ a_1 &= \tilde{b}_1(K_{VDi}) \\ a_2 &= \tilde{b}_2(K_{VDi}) \\ &: \end{aligned} \quad (40)$$

20

[0056] El conjunto de ecuaciones lineales anteriores puede resolverse de forma analítica para las ganancias de control de piloto desconocidas K_{VD0} a K_{VD2} . En el presente caso se prescinde de la representación de la función de transferencia $\tilde{G}_D(s)$ a partir de la ecuación 39, debido a la complejidad de la totalidad del sistema.

25

[0057] Las ganancias de control de piloto se encuentran disponibles de aquí en adelante dependientes de los elementos de la matriz de masa, la matriz de amortiguación, la matriz de rigidez y parámetros de modelo adicionales. Los elementos de matriz correspondientes son a su vez dependientes de características adicionales, tal como el ángulo de elevación, el ángulo de articulación, la longitud de extensión, etc. Si estos parámetros cambian, entonces las ganancias de control de piloto también cambian de forma automática, de tal modo que el comportamiento de amortiguación de vibración del control de piloto se mantiene a la vez que se mueve la jaula. Además, puede identificarse una dependencia de los coeficientes de control de piloto con las ganancias de control K_{1D} a K_{5D} en las ganancias de control de piloto. Su deducción se explica en la siguiente sección de la descripción de la invención.

30

[0058] La realimentación de control 73 se configura como un controlador de estados. Un controlador de estados se caracteriza por que cada parámetro de estado, que es cada componente del vector de estado \underline{x}_D , se pondera con una ganancia de control k_{iD} y se realimenta de vuelta a la entrada de servo del sistema de control.

5 **[0059]** Las ganancias de control k_{iD} se combinan como el vector de realimentación \underline{K}_D .

[0060] De acuerdo con "Unbehauen, Regelungstechnik 2, a. a. O.", el comportamiento dinámico del sistema se determina mediante la posición de los valores propios de la matriz de sistema \underline{A}_D , que, al mismo tiempo, son los polos de la función de transferencia en el intervalo de frecuencias. Los valores propios de la matriz pueden determinarse tal como sigue mediante el cálculo de los ceros de los determinantes con respecto a las variables s de los polinomios característicos.

$$\det(s\underline{I} - \underline{A}_D) \equiv 0 \quad (42)$$

15 **[0061]** \underline{I} es la matriz unidad. En el caso del modelo de espacio de estados elegido a partir de la ecuación 32, el análisis de la ecuación 42 conduce a un polinomio de quinto orden con la forma general:

$$s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \equiv 0 \quad (43)$$

20 **[0062]** Estos valores propios pueden desplazarse de forma selectiva mediante la realimentación de las variables de estado por medio de la matriz de control \underline{K}_D a la entrada de control, debido a que la posición de los valores propios se determina a continuación mediante el análisis de los siguientes determinantes:

$$\det(s\underline{I} - \underline{A}_D + \underline{B}_D \cdot \underline{K}_D) \equiv 0 \quad (44)$$

25 **[0063]** El análisis de la ecuación 44 conduce de nuevo a un polinomio de quinto orden que es ahora, no obstante, dependiente de las ganancias de control k_{iD} ($i = 1 \dots 5$). En el caso del modelo a partir de la ecuación 32, la ecuación 43 se vuelve

$$s^5 + a_4(k_{5D}, k_{3D}, k_{1D})s^4 + a_3(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}, k_{2D}, k_{1D})s^3 + a_2(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}, k_{2D}, k_{1D})s^2 + a_1(k_{4D}, k_{1D}, k_{1D})s + a_0(k_{1D}) \equiv 0 \quad (45)$$

30 **[0064]** Ahora se requiere que las ecuaciones 44 y 45 adopten, de forma respectiva, ceros particulares a través de las ganancias de control k_{iD} con el fin de influir de forma selectiva sobre la dinámica del sistema que se refleja en los ceros de este polinomio. La forma en la que se encuentran los polos se conoce a partir del cálculo de los polos en lazo abierto para la rotación del subsistema (ecuación 42). Existe un polo real negativo (condicionado por la constante de retardo de tiempo de la hidráulica a partir de la ecuación 24) y uno de cada uno de pares de polos complejos conjugados condicionados por la flexión y la torsión. Con este conocimiento a priori, se obtiene como resultado la siguiente estructura del polinomio de especificación de polos:

$$p_D(s) = (s - p_h) \cdot (s - (p_{\alpha,r} + i \cdot p_{\alpha,im})) \cdot (s - (p_{\alpha,r} - i \cdot p_{\alpha,im})) \cdot (s - (p_{\nu,r} + i \cdot p_{\nu,im})) \cdot (s - (p_{\nu,r} - i \cdot p_{\nu,im})) \quad (46)$$

40 p_h Polo hidráulico

$p_{\alpha,r}$ Polo de torsión de parte real

45 $p_{\alpha,im}$ Polo de torsión de parte imaginaria

$p_{\nu,r}$ Polo de flexión de parte real

50 $p_{\nu,im}$ Polo de flexión de parte imaginaria

[0065] Con respecto a esto, los polos complejos conjugados no se abordan de forma individual sino a través de un acceso directo a las partes real e imaginaria. De esta forma, se puede influir de forma selectiva sobre la vibración y la amortiguación para la torsión y la flexión del brazo mediante el ajuste del controlador. Los coeficientes de control son, por lo tanto, una función de las partes real e imaginaria del polo.

[0066] Las posiciones de los polos han de elegirse a partir de la ecuación 46 de tal forma que el sistema sea estable, el controlador funcione adecuadamente rápido con una buena amortiguación y el límite de las variables no se alcance bajo las desviaciones de control que surgen típicamente. Los valores exactos pueden establecerse antes del funcionamiento inicial por medio de simulación de acuerdo con estos criterios.

[0067] Las ganancias de control pueden determinarse a continuación mediante la comparación de los coeficientes de las ecuaciones polinómicas 46 y 44.

$$\det(sI - \underline{A}_D + \underline{B}_D \cdot \underline{K}_D) \equiv p_D(s) \quad (47)$$

[0068] Basándose en la ecuación 47, se obtiene como resultado un conjunto de ecuaciones lineales que ha de resolverse, dependientes de las ganancias de control k_{iD} . El análisis de este conjunto de ecuaciones conduce a unas expresiones analíticas para las ganancias de control respectivas dependientes de los polos deseados a partir de la ecuación 46 y los parámetros de sistema individuales. Si estos parámetros cambian, como por ejemplo el ángulo de articulación o la longitud de extensión, entonces estos cambios se tienen en cuenta de forma inmediata mediante una variación de los parámetros de control individuales. En el presente caso se prescindirá de una descripción independiente de los coeficientes de control individuales, a causa de la complejidad de las expresiones individuales.

[0069] Con la realimentación de $\dot{\phi}_D, \alpha_x, \dot{\alpha}_x, v_y, \dot{v}_y$, la salida del bloque de controlador de estados 73 es entonces

$$u_{Drealim.} = k_{1D}\dot{\phi}_D + k_{2D}\alpha_x + k_{3D}\dot{\alpha}_x + k_{4D}v_y + k_{5D}\dot{v}_y \quad (48)$$

[0070] Teniendo en cuenta el control de piloto 71, la tensión de control de referencia de la válvula proporcional para el eje de rotación es entonces

$$u_{Dref} = u_{DC.pil.} - u_{Drealim.} \quad (49)$$

[0071] Los estados $\dot{\phi}_D, \alpha_x, \dot{\alpha}_x, v_y, \dot{v}_y$ de la rotación del subsistema que se está considerando se miden o bien directamente o bien indirectamente mediante unos sensores adecuados. La velocidad angular se mide en general con unos encóder correspondientes en la unión giratoria. Si se usan galgas extensométricas (SG, *strain gauge*) como sensores de captación de mediciones para los grados elásticos de libertad, se persigue ubicar estas en las posiciones correspondientes en la unidad de escalera. Por ejemplo, dos SG pueden instalarse a los lados derecho e izquierdo, respectivamente, en los raíles inferior y superior de la escalera en una dirección preferida vertical (SG vertical) y en una dirección preferida horizontal (SG horizontal), de tal modo que se obtiene como resultado una sensibilidad diferencial con las desviaciones de torsión. Por lo tanto, los movimientos de flexión horizontal así como los movimientos de torsión se miden acoplados por medio de este montaje de las SG. Las señales se desacoplan de acuerdo con la invención por medio de un acondicionador de señales de datos de medición 75, de tal modo que puede conseguirse la ley de realimentación (48). Por lo tanto, se supone que la señal de diferencia de la SG vertical es una medida adecuada del ángulo de torsión.

[0072] Puede hacerse uso de pruebas estáticas para la torsión y la flexión para calibrar las señales de SG. A partir de esto, se obtiene como resultado

$$\alpha_x = k_t \frac{(\varepsilon_{vr} - \varepsilon_{vl}) \cdot l_A^3}{(l_A - l_{0v})} \quad (49a)$$

con

- ε_v - Deformación en la posición de SG (SG vertical)
- l_{0v} - Posición de SG (distancia a partir del punto de fijación en la dirección x)

k_t - factor de proporcionalidad

[0073] La flexión horizontal tiene, esencialmente, un efecto sobre la señal de diferencia de la SG horizontal. Como se ha mencionado, esta también se ve influida por la torsión de la escalera. Suponiendo que

$$\varepsilon_{hr} - \varepsilon_{hl} = \frac{l_A - l_{0h}}{l_A^3} \cdot \frac{v_y}{k_h} + \frac{l_A - l_{0h}}{l_A^3} \cdot \frac{\alpha_x}{k_{th}} \quad (49b)$$

se obtiene

$$v_y = k_h \frac{(\varepsilon_{hr} - \varepsilon_{hl}) \cdot l_A^3}{l_A - l_{0h}} - \frac{k_t \alpha_x}{k_{th}} \quad (49c)$$

con

- ε_h - Deformación en la posición de SG (SG horizontal)
- l_{0h} - Posición de SG (distancia a partir del punto de fijación en la dirección x)
- k_h - factor de proporcionalidad
- k_{th} - factor de proporcionalidad

[0074] Esto puede resumirse como la solución a un conjunto de ecuaciones lineales

$$\begin{bmatrix} v_y \\ \alpha_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_A - l_{0h}}{l_A^3 k_h} & \frac{l_A - l_{0h}}{l_A^3 k_{th}} \\ 0 & \frac{l_A - l_{0v}}{l_A^3 k_t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{hr} - \varepsilon_{hl} \\ \varepsilon_{vr} - \varepsilon_{vl} \end{bmatrix} \quad (49d)$$

[0075] Las derivadas de tiempo correspondientes de los estados de flexión desacoplados pueden implementarse con la ayuda de módulos diferenciadores reales adecuados.

[0076] En el contexto del cálculo para una amortiguación de vibración activa, la escalera articulada se considera como un sistema de múltiples cuerpos discretos con tres masas puntuales y los correspondientes elementos amortiguadores y de resorte. En la práctica, tienen lugar unos efectos dinámicos que, de ese modo, no se tienen en cuenta. Debido a que existe un sistema con unos parámetros localmente distribuidos, unos armónicos más altos tienen lugar, por ejemplo, que se registran de forma correspondiente mediante los elementos de sensor y de ese modo se acoplan en el flujo de señales de la realimentación de control. Por lo tanto, el comportamiento de control se ve influido de forma negativa. Por otro lado, puede ocurrir que la señal de medición de los grados elásticos de libertad tenga un desfase. Esto puede conducir a un movimiento giratorio no amortiguado. Con el fin de solucionar este problema, el procesamiento de los datos medidos puede complementarse mediante un observador de perturbación con las siguientes funciones:

- 1.) Corrección de los desfases en la señal medida inherente en el principio de medición.
- 2.) Eliminación del contenido de frecuencia en la señal de medición, causado por unos armónicos más altos de la escalera.

[0077] Como resultado, para el procesamiento de señales, se usa un observador de perturbación para las vibraciones de torsión y las vibraciones de flexión horizontal de forma respectiva. La ecuación diferencial de vibración que describe la evolución de las vibraciones que van a amortiguarse de forma activa se representa tal como sigue:

$$\ddot{\varphi}_{\alpha x, \gamma y} = -w_{\alpha x, \gamma y}^2 \cdot \varphi_{\alpha x, \gamma y} - 2d_{\alpha x, \gamma y} w_{\alpha x, \gamma y} \cdot \dot{\varphi}_{\alpha x, \gamma y} \quad (49e)$$

5 **[0078]** La amplitud angular de la vibración $\varphi_{\alpha x,vy}$ se aproxima mediante una ecuación diferencial amortiguada de segundo orden con los parámetros de la frecuencia de resonancia $\omega_{\alpha x,vy}$ y la amortiguación $\underline{d}_{\alpha x,vy}$. En el presente caso, es esencial que los parámetros sean variables con respecto a los estados del sistema, tal como la longitud de la escalera, los ángulos de elevación y de articulación o las masas de carga. Estos pueden obtenerse, por ejemplo, de forma experimental o a partir de unos modelos físicos adecuados.

[0079] Se supone que el error de desfase angular $\dot{\varphi}_{\text{desfase},\alpha x,vy}$ es, en parte, constante.

$$\ddot{\varphi}_{\text{desfase},\alpha x,vy} = 0 \quad (49f)$$

10 **[0080]** Con el fin de eliminar los armónicos más altos de la escalera con respecto a la señal de medición, la frecuencia de resonancia $\omega_{arm,\alpha x,vy}$ y la amortiguación $\underline{d}_{arm,\alpha x,vy}$ se determinan de forma experimental, siendo estas también en el presente caso dependientes, en general, de unos parámetros de sistema variables tales como la longitud de la escalera, los ángulos de elevación y de articulación y las masas de carga. Como alternativa, la frecuencia de resonancia y la amortiguación puede determinarse a partir de una descripción adecuada del modelo físico. La ecuación diferencial de vibración correspondiente del armónico es:

$$\ddot{\varphi}_{arm,\alpha x,vy} = -\omega_{arm,\alpha x,vy}^2 \cdot \varphi_{arm,\alpha x,vy} - 2\underline{d}_{arm,\alpha x,vy} \omega_{arm,\alpha x,vy} \cdot \dot{\varphi}_{arm,\alpha x,vy} \quad (49g)$$

20 **[0081]** La representación en el espacio de estados a partir de los submodelos anteriores muestra:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_{\alpha x,vy} &= \underline{A}_{\alpha x,vy} \cdot \underline{x}_{\alpha x,vy} + \underline{B}_{\alpha x,vy} \cdot \underline{u}_{\alpha x,vy} \\ y_{m\alpha x,vy} &= \underline{C}_{\alpha x,vy} \cdot \underline{x}_{\alpha x,vy} \end{aligned} \quad (49h)$$

mediante lo cual se adoptan las siguientes matrices y vectores:

25

$$\text{Vector de estado: } \underline{x}_{\alpha x,vy} = \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha x,vy} \\ \dot{\varphi}_{\alpha x,vy} \\ \varphi_{\text{desfase},\alpha x,vy} \\ \varphi_{arm,\alpha x,vy} \\ \dot{\varphi}_{arm,\alpha x,vy} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de entrada: } \underline{B}_{\alpha x,vy} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de sistema:

$$\underline{A}_{ax,vy} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -w_{ax,vy} & -2d_{ax,vy}w_{ax,vy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -w_{arm.ax,vy} & -2d_{arm.ax,vy}w_{arm.ax,vy} \end{bmatrix}$$

Matriz de salida:

$$\underline{C}_{ax,vy} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \quad (49i)$$

[0082] De acuerdo con la invención, las porciones de señal de perturbación se eliminan de la señal de medición con un procedimiento de estimación que está soportado por un observador. Un observador completo se obtiene en el caso en cuestión. La ecuación de observador para el modelo de espacio de estados modificado es, por lo tanto:

$$\hat{\underline{x}}_{ax,vy} = (\underline{A}_{ax,vy} - \underline{H}_{ax,vy} \underline{C}_{ax,vy}) \cdot \underline{x}_{ax,vy} + \underline{B}_{ax,vy} \cdot \underline{u}_{ax,vy} + \underline{H}_{ax,vy} \underline{y}_{max,vy} \quad (49j)$$

[0083] La matriz de observador de perturbación $\underline{H}_{ax,vy} = [h_{ax,vy,1}, h_{ax,vy,2}, h_{ax,vy,3}, h_{ax,vy,4}, h_{ax,vy,5}]^T$ se calcula, por ejemplo, de acuerdo con el procedimiento de diseño de Riccati. En el presente caso, es esencial que los parámetros variables tales como la longitud de la escalera, el ángulo de elevación y las masas de carga se tengan en cuenta de forma similar en el observador mediante la adaptación de la ecuación diferencial de observador y las ganancias de observador. Los valores estimados para $\hat{\phi}_{ax,vy}$ y $\hat{\psi}_{ax,vy}$ a partir del observador de perturbación pueden suministrarse directamente al controlador de estados. De esta forma, la función de amortiguación de vibración puede mejorarse de forma significativa.

[0084] Como alternativa a la eliminación basada en observador de los armónicos más altos, la ganancia de realimentación del controlador de estados 73 durante el movimiento de rotación también puede atenuarse por medio del atenuador proporcional 72. De esta forma, la función de control para la escalera en reposo puede mejorarse si no se ha realizado eliminación basada en observador alguna.

[0085] Las componentes individuales del controlador de eje para el eje de rotación se explican de ese modo. Como resultado, la combinación del módulo de planificación de trayectoria de posición y el controlador de eje de rotación cumple el requisito de un movimiento libre de vibraciones y preciso en cuanto a la trayectoria de posición con el eje de rotación.

[0086] En lo sucesivo, se explicará el controlador de eje para el eje de elevación / inclinación 7 mediante el uso de los resultados a partir de la deducción del módulo de control para el eje de rotación. La figura 8 muestra la estructura básica del controlador de eje para el eje de elevación / inclinación.

[0087] Las funciones de salida del módulo de planificación de trayectoria de posición, en forma de la velocidad de referencia de la jaula en la dirección del eje de elevación / inclinación así como sus derivadas (la aceleración, la sobreaceleración y, si es necesario, la derivada de la sobreaceleración) se dan al bloque de control de piloto 91 (se corresponde con el bloque 71 para el eje de rotación). Estas funciones se amplifican en el bloque de control de piloto de tal forma que se obtiene como resultado una orientación precisa en cuanto a la trayectoria de posición de la escalera sin vibraciones bajo las condiciones idealizadas del modelo dinámico. La base para la determinación de las ganancias de control de piloto es el modelo dinámico que se obtendrá en las siguientes secciones para el eje de elevación / inclinación. De esta forma, bajo unas condiciones idealizadas, la vibración de la escalera se suprime y la jaula sigue la trayectoria de posición generada.

[0088] Al igual que con el eje de rotación, el control de piloto puede complementarse opcionalmente mediante un bloque de controlador de estados 93 para compensar las perturbaciones (por ejemplo, los efectos del viento) y los errores de modelado (véase el eje de rotación 73). En este bloque, por lo menos una de las cantidades que va a medirse, el ángulo de elevación φ_A , el ángulo de articulación φ_K , la longitud de extensión 1, la flexión de la escalera en la dirección vertical v_z o la derivada de la flexión vertical V_z , se amplifica y se realimenta de vuelta a la entrada de servo. La derivada de las mediciones φ_A y V_z se forma numéricamente en el control de microprocesador.

[0089] El valor para la entrada de servo que se forma a partir del control de piloto $U_{Ac.pil.}$ y la salida de controlador de estados opcional $U_{Arealim.}$ se suministra entonces a la válvula proporcional para el cilindro del eje de elevación / inclinación del circuito hidráulico.

[0090] La deducción del modelo dinámico para el eje de elevación que es la base para el cálculo de las ganancias de control de piloto y el controlador de estados se ejemplificará a continuación.

[0091] La cinemática del eje de elevación / inclinación se muestra en la figura 9. El accionamiento tiene lugar por medio de dos cilindros hidráulicos, mediante lo cual la posición y la celeridad del pistón han de tenerse en cuenta en el modelo. El momento de accionamiento M_A a partir de la ecuación 19 puede describirse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 M_A &= F_{cil.A} d_{bA} \cos \varphi_{PA} \\
 F_{cil.A} &= p_{cil.A} A_{cil.A} \\
 \dot{p}_{cil.A} &= \frac{2}{\beta V_{cil.A}} (Q_{FA} - A_{cil.A} \dot{z}_{cil.A}) \\
 Q_{FA} &= K_{PA} \bar{u}_{StA} \\
 z_{cil.A} &= \sqrt{d_{aA}^2 + d_{bA}^2 - 2d_{aA}d_{bA} \cos(\varphi_A + \varphi_{0A})} \\
 \dot{z}_{cil.A} &= \frac{d_{aA}d_{bA} \sin(\varphi_A + \varphi_{0A})}{z_{cil.A}} \dot{\varphi}_A \\
 \cos \varphi_{PA} &= \frac{d_{aA} \sin(\varphi_A + \varphi_{0A})}{z_{cil.A}}
 \end{aligned} \tag{50}$$

mediante lo cual

- M_A denota el momento de accionamiento
- φ_{PA} denota el ángulo de proyección
- $p_{cil.A}$ denota la presión en el cilindro hidráulico
- $A_{cil.A}$ denota el área en sección transversal afectiva
- $\dot{\varphi}_A$ denota la elevación / inclinación de la velocidad angular
- $z_{cil.A}$ denota la posición del pistón
- Q_{FA} denota el flujo de volumen del aceite hidráulico
- u_{StA} denota la tensión de activación de la válvula de servo
- $u_{StA,min}$ denota la tensión de activación mínima de la válvula de servo
- \bar{u}_{StA} denota la tensión de activación de funcionamiento
- $V_{cil.A}$ denota el volumen del cilindro hidráulico (cada cilindro)
- β denota la compresibilidad del aceite hidráulico
- K_{PA} denota el factor de proporcionalidad
- d_{aA} denota la distancia del punto de pivote al punto de acoplamiento del cilindro hidráulico en la unidad de transmisión de escalera
- d_{bA} denota la distancia del punto de pivote al punto de acoplamiento del cilindro hidráulico en la unidad de escalera
- φ_{0A} denota el ángulo, véase la figura 9

[0092] Las señales de flexión y de torsión también pueden estimarse para el eje de elevación a partir de las señales de presión de la ecuación 50 por medio de un observador, como para el eje de rotación.

[0093] Al despreciar los términos de Coriolis y centrípeto, así como la aceleración angular del brazo articulado $\dot{\phi}_K$, la ecuación 22 sirve como punto de partida para la compilación del modelo de espacio de estados y, por consiguiente, se presenta tal como sigue.

$$m_{72}\ddot{\phi}_A + m_{77}\ddot{v}_z + g_{71} + d_{77}\dot{v}_z + k_{77}v_z = 0 \quad (51)$$

5

[0094] La relación que se muestra en la ecuación 50, para el cálculo de los cambios de presión en el cilindro hidráulico $\dot{p}_{cil.A}$, se toma como la base para los siguientes cálculos. Un elemento de retardo de primer orden se elige como modelo de cálculo para la determinación por aproximación de la variable Q_{FA} contenida en la ecuación. Por consiguiente, los aspectos dinámicos de un control de caudal auxiliar se tienen en cuenta en un enfoque simple. Esta simplificación describe de forma o bastante precisa la correlación entre la tensión de activación y el flujo de volumen del aceite hidráulico.

10

$$Q_{FA} = \frac{K_{PA}}{1 + sT} u_{SLA} \quad (52)$$

15

[0095] Poniendo $\dot{p}_{cil.A} = 0$ (estado estacionario), se obtiene la siguiente relación a partir de la ecuación 50:

$$0 = \frac{2}{V_{cil.A}\beta} (Q_{FA} - A_{cil.A}\dot{z}_{cil.A}) \xrightarrow{\text{Transposición}} Q_{FA} = A_{cil.A} \cdot \dot{z}_{cil.A} \quad (53)$$

20

[0096] Mediante el uso de la relación entre la celeridad del pistón y la celeridad de elevación a partir de la ecuación 50, la dependencia del flujo de volumen con la celeridad de elevación da como resultado:

$$\dot{z}_{cil.A} = \underbrace{\frac{d_{aA}d_{bA} \sin(\varphi_A + \varphi_{0A})}{z_{cil.A}}}_{\Psi(\varphi_A)} \cdot \dot{\varphi}_A \xrightarrow{\text{Sustituir}} Q_{FA} = A_{cil.A} \cdot \Psi(\varphi_A) \cdot \dot{\varphi}_A \quad (54)$$

25

[0097] Igualando las ecuaciones 52 (en el dominio del tiempo) y 54 y reordenando subsiguientemente la expresión resultante para $\dot{\varphi}_A$, conduce, después de la captación correspondiente de los coeficientes, a la siguiente expresión.

$$\ddot{\varphi}_A = \frac{K_{PA}}{A_{cil.A} \cdot T \cdot \Psi} \cdot u_{SLA} + \left(-\frac{1}{T} - \frac{\dot{\Psi}}{\Psi} \right) \cdot \dot{\varphi}_A \quad (55)$$

30

[0098] Mediante el uso de la relación deducida, la siguiente representación de las ecuaciones de movimiento para la elevación / inclinación del subsistema en forma de espacio de estados se produce:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_A &= \underline{A}_A \underline{x}_A + \underline{B}_A \underline{u}_A \\ \underline{y}_A &= \underline{C}_A \underline{x}_A \end{aligned} \quad (56)$$

con:

$$\text{Vector de estado: } \underline{x}_A = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_A \\ v_z \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\text{Variable de control: } u_A = u_{SLA} \quad (58)$$

$$\text{Variable de salida: } y_A = \Psi \dot{\phi}_A \quad (59)$$

5

[0099] Con la forma del vector de estado elegido en la ecuación 57, inicialmente se obtiene la relación

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ m_{72} & 0 & m_{77} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_H \cdot \dot{\underline{x}}_A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} - \frac{\dot{\Psi}}{\Psi} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{77} & -d_{77} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_A + \begin{bmatrix} \frac{K_{PA}}{A_{cil.A} \cdot T \cdot \Psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_A \quad (60)$$

10

[0100] Las matrices de sistema y de entrada A_A y B_A se obtienen mediante la multiplicación matricial de las inversas de H en la ecuación 60.

$$\underline{A}_A = \begin{bmatrix} -\frac{\Psi + \dot{\Psi}T}{\Psi T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{m_{72}(\Psi + \dot{\Psi}T)}{m_{77}\Psi T} & -\frac{k_{77}}{m_{77}} & -\frac{d_{77}}{m_{77}} \end{bmatrix} \quad \underline{B}_A = \begin{bmatrix} \frac{K_{PA}}{A_{cil.A} \cdot T \cdot \Psi} \\ 0 \\ -\frac{m_{72}K_{PA}}{m_{77}A_{cil.A} \Psi T} \end{bmatrix} \quad (61)$$

15

[0101] Debido a que la celeridad del pistón de cilindro hidráulico ha de adoptarse como variable de salida, el vector de salida \underline{C}_A , a partir de la ecuación 59, se vuelve:

$$\underline{C}_A = [\Psi \ 0 \ 0] \quad (62)$$

20

[0102] El modelo dinámico del eje de elevación / inclinación se entiende como un sistema de parámetros variables con respecto a la longitud de extensión l , la componente de la función trigonométrica del ángulo de elevación ϕ_A y del ángulo de articulación ϕ_K . Las ecuaciones 56 - 62 forman la base para el diseño del control de piloto 91 y el controlador de estados 93, que va a describirse a continuación.

25

[0103] Las variables de entrada del bloque de control de piloto 91 son la velocidad angular de referencia $\dot{\phi}_{Aref}$ la aceleración angular de referencia $\dot{\phi}_{Aref}$ y la sobreaceleración de referencia $\ddot{\Phi}_{Aref}$ (y, si es necesario, la derivada de la sobreaceleración de referencia). El vector de variable de mando \underline{w}_A es, por lo tanto

$$\underline{w}_A = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{Aref} \\ \ddot{\phi}_{Aref} \\ \ddot{\phi}_{Aref} \end{bmatrix} \quad (63)$$

5 **[0104]** Las componentes de \underline{w}_A se ponderan con las ganancias de control de piloto K_{VA0} a K_{VA2} en el bloque de control de piloto 91 y su suma se suministra a la entrada de servo. El bloque de control de piloto 91 está soportado por un controlador de estados 93 debido a que, como ya se ha mencionado, el modelo dinámico solo reproduce las relaciones reales de una forma abstracta y, con la ayuda del controlador, también puede reaccionarse a las perturbaciones no deterministas (por ejemplo, los efectos del viento, las fluctuaciones de la carga en la jaula, etc.). Por lo menos una de las cantidades medidas del vector de estado a partir de la ecuación 57 se pondera con una ganancia de control y se realimenta de vuelta a la entrada de servo. Allí, de nuevo, se forma la diferencia entre el valor de salida del bloque de control de piloto 91 y el valor de salida del controlador de estados 93, de forma análoga a la estructura del controlador de eje para la rotación del subsistema. La existencia del bloque de controlador de estados, que debería suponerse en lo sucesivo, ha de tenerse en cuenta en el cálculo de las ganancias de control de piloto. (Sin el controlador de estados, la disposición implementada en la deducción del controlador de eje de rotación es válida).

10
15 **[0105]** Teniendo en cuenta el control de piloto y la realimentación de control, el controlador de estados a partir de la ecuación 56 se amplía a:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_A &= (\underline{A}_A - \underline{B}_A \underline{K}_A) \underline{x}_A + \underline{B}_A \underline{S}_A \underline{w}_A \\ \underline{y}_A &= \underline{C}_A \underline{x}_A \end{aligned} \quad (64)$$

20 con la matriz de control de piloto:

$$\underline{S}_A = [K_{VA0} \quad K_{VA1} \quad K_{VA2}] \quad (65)$$

25 y las ganancias de control de piloto K_{VD0} a K_{VD2} , que van a calcularse. Después de evaluar la ecuación 65, la tensión de salida del bloque de control de piloto 91 viene dada por:

$$\underline{u}_{A.C.pil.} = K_{VA0} \dot{\phi}_{Aref} + K_{VA1} \ddot{\phi}_{Aref} + K_{VA2} \ddot{\phi}_{Aref} \quad (66)$$

30 **[0106]** El cálculo de los coeficientes de control de piloto individuales se lleva a cabo de la misma forma que se describe en las ecuaciones 38 - 40 para el controlador de eje de rotación.

35 **[0107]** Las ganancias de control de piloto se encuentran, a su vez, disponibles dependiendo de los elementos de la matriz de masa, la matriz de amortiguación, la matriz de rigidez y parámetros de modelo adicionales. Los elementos de matriz correspondientes son dependientes de características adicionales, tal como el ángulo de elevación, el ángulo de articulación, la longitud de extensión, etc. Si estos parámetros cambian, entonces las ganancias de control de piloto también cambian de forma automática, de tal modo que el comportamiento de amortiguación de vibración del control de piloto se mantiene a la vez que se mueve la jaula. Además, en las ganancias de control de piloto para la elevación, puede identificarse una dependencia de los coeficientes de control de piloto con las ganancias de control k_{1A} a k_{3A} , como ya se hizo en el controlador de eje de rotación.

40 **[0108]** La deducción de estos coeficientes de realimentación se explica en la siguiente sección de la descripción de la invención.

45 **[0109]** La realimentación de control 93 se implementa como un controlador de estados. Las ganancias de realimentación individuales se calculan de forma análoga al controlador de eje de rotación (ecuaciones 42 - 48). Las componentes del vector de estado \underline{x}_A se ponderan con las ganancias de control k_{iA} de la matriz de control \underline{K}_A y se realimentan de vuelta al sistema de control de entrada de servo.

50 **[0110]** Los valores propios del sistema pueden desplazarse de forma selectiva mediante la realimentación de las variables de estado por medio de la matriz de control \underline{K}_A a la entrada de control, debido a que la posición de los

valores propios se determina a su vez mediante el análisis de los siguientes determinantes:

$$\det(sI - \underline{A}_A + \underline{B}_A \cdot \underline{K}_A) \equiv 0 \quad (68)$$

- 5 **[0111]** El análisis de la ecuación 68 conduce a un polinomio de 3^{er} orden que es de nuevo dependiente de las ganancias de control k_{iA} ($i = 1 \dots 3$). La ecuación característica del sistema controlado se vuelve entonces:

$$s^3 + a_2(k_{3A}, k_{1A})s^2 + a_1(k_{2A}, k_{1A})s + a_0 \equiv 0 \quad (69)$$

- 10 **[0112]** Los ceros de la ecuación 45 (y, por lo tanto, la dinámica del sistema en lazo cerrado) pueden de nuevo verse influidos por las ganancias de control k_{iA} . La posición de los polos se conoce a partir del cálculo de los polos en lazo abierto. Existe un polo real negativo (condicionado por la constante de retardo de tiempo de la hidráulica a partir de la ecuación 52) y un par de polos complejos conjugados condicionados por la flexión vertical. Con este conocimiento a priori, se obtiene como resultado la siguiente estructura del polinomio de especificación de polos:

15

$$p_A(s) = (s - p_h) \cdot (s - (p_{vz,r} + i \cdot p_{vz,im})) \cdot (s - (p_{vz,r} - i \cdot p_{vz,im})) \quad (70)$$

p_h Polo hidráulico

- 20 $p_{vz,r}$ Polo de flexión de parte real

$p_{vz,im}$ Polo de flexión de parte imaginaria

- 25 **[0113]** El acceso al par de polos complejos conjugados tiene lugar, de nuevo, de forma directa sobre las partes real e imaginaria. De esta forma, se puede influir de forma selectiva sobre la vibración y la amortiguación para la flexión vertical del brazo mediante el ajuste del controlador. Al igual que con el controlador de eje de rotación, los coeficientes de control son funciones de las partes real e imaginaria del par de polos complejos conjugados.

- 30 **[0114]** Las posiciones de los polos, de acuerdo con la ecuación 70, han de elegirse de tal modo que el sistema sea estable, el controlador funcione adecuadamente rápido con una buena amortiguación y el límite de las variables no se alcance bajo las desviaciones de control que surgen típicamente. Los valores exactos pueden establecerse antes del funcionamiento inicial por medio de simulación de acuerdo con estos criterios.

- 35 **[0115]** Al igual que con el eje de rotación, las ganancias de control pueden determinarse mediante la comparación de los coeficientes de los polinomios de forma análoga a la ecuación 47

$$\det(sI - \underline{A}_A + \underline{B}_A \cdot \underline{K}_A) \equiv p_A(s) \quad (71)$$

- 40 **[0116]** Basándose en la ecuación 71, se obtiene como resultado un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales que ha de resolverse dependiente de las ganancias de control k_{iA} , al igual que con el eje de rotación. El análisis de este conjunto de ecuaciones produce unas expresiones analíticas para las ganancias de control respectivas dependientes de los polos deseados a partir de la ecuación 70 y los parámetros de sistema individuales. Si estos parámetros cambian, como por ejemplo el ángulo de articulación o la longitud de extensión, entonces estos cambios se tienen en cuenta de forma inmediata mediante una variación de los parámetros de control individuales.

45

- [0117]** Con la realimentación de $\dot{\phi}_A, v_z, \dot{v}_z$, la salida del bloque de controlador de estados 93 es entonces

$$u_{A \text{ realim.}} = k_{1A} \dot{\phi}_A + k_{2A} v_z + k_{3A} \dot{v}_z \quad (73)$$

- 50 **[0118]** Teniendo en cuenta el control de piloto 91, la tensión de control de referencia de la válvula proporcional para el eje de elevación / inclinación es entonces

$$u_{Aref} = u_{A\ c.pil.} - u_{A\ realim.} \quad (74)$$

5 [0119] Los estados $\dot{\phi}_A, v_z, \dot{V}_z$, de la elevación del subsistema en consideración se miden o bien directamente o bien indirectamente mediante unos sensores adecuados. La velocidad de elevación se mide, habitualmente, sobre la articulación de escalera con unos encóder correspondientes. Si se usan galgas extensométricas (SG) como sensores de captación de mediciones para los grados elásticos de libertad, se persigue ubicar estas en las posiciones correspondientes en la unidad de escalera. Los datos de sensor se procesan adicionalmente en el bloque 95, procesamiento de datos de medición. Por ejemplo, dos SG pueden instalarse a los lados derecho e izquierdo, respectivamente, en los raíles inferior y superior de la escalera en una dirección preferida vertical (SG vertical). A partir de esto, se obtiene como resultado

$$v_z = b_{ev} \frac{-(\varepsilon_{vr} + \varepsilon_{vl})/2 \cdot l_A^3}{(l_A - l_{0v})} \quad (75)$$

con

- 15 ε_v - Deformación en la posición de SG
 l_{0v} - Posición de SG (distancia a partir del punto de fijación en la dirección x)
 b_{ev} - factor de proporcionalidad

20 [0120] Solo las porciones de señal dinámicas de la flexión son relevantes para el control. Las porciones de señal en estado estacionario surgen a través de la fuerza de la gravedad de la escalera y a través de unas porciones de desfase posiblemente existentes de la señal de SG y han de eliminarse por filtración de forma fiable. Con fines de compensación, puede usarse un filtro de paso alto en combinación con una compensación gravitatoria aguas arriba.

$$v'_z = b_{ev} \frac{-((\varepsilon_{vr} + \varepsilon_{vl})/2 - \varepsilon_{desf}) \cdot l_A^3}{(l_A - l_{0v})} - \frac{m_{ers} g \cos \varphi_A}{c_v(l_A)} \quad (76)$$

25 con

- 30 v'_z - desplazamiento vertical en la unión articulada de punto de referencia después de la compensación gravitatoria
 ε_{desf} - SG-Desfase ($\varepsilon_{desf} = -69,65 \mu\text{m} / \text{m}$)

35 [0121] El parámetro ε_{desf} puede determinarse a partir de una serie de mediciones con una longitud de extensión de escalera lentamente variable.

[0122] Las derivadas de tiempo correspondientes de los estados de flexión desacoplados pueden implementarse con la ayuda de módulos diferenciadores reales adecuados.

40 [0123] Debido a que existe un sistema con unos parámetros localmente distribuidos, unos armónicos más altos también tienen lugar en la elevación del subsistema. Estos se registran de forma correspondiente mediante los elementos de sensor y se acoplan en el flujo de señales de la realimentación de control. Por lo tanto, el comportamiento de control se ve influido de forma negativa. Por otro lado, puede ocurrir que la señal de medición de la flexión vertical tenga un desfase, o la compensación gravitatoria no presente un rendimiento lo bastante robusto. Esto puede conducir a un movimiento de elevación no amortiguado. Con el fin de solucionar este problema, el procesamiento de los datos medidos puede complementarse mediante un observador de perturbación con las siguientes funciones:

- 50 1. Corrección de los desfases en la señal medida debido a la gravedad e inherentes en el principio de medición.
 2. Eliminación del contenido de frecuencia en la señal de medición, causado por unos armónicos más altos de la escalera.

[0124] La ecuación diferencial de vibración que describe la evolución de vibraciones de las vibraciones verticales que van a amortiguarse de forma activa, se representa, de forma análoga a la ecuación 49e para el eje de rotación, como una vibración amortiguada con una frecuencia resonante determinada de forma experimental ω_{vz} , dependiente del ángulo de elevación, la longitud de extensión y el ángulo de articulación, y la amortiguación \bar{d}_{vz} :

5

$$\ddot{\varphi}_{vz} = -\omega_{vz}^2 \cdot \varphi_{vz} - 2d_{vz} \omega_{vz} \cdot \dot{\varphi}_{vz} \quad (77)$$

[0125] Se supone que el error de desfase angular es, en parte, constante.

$$\ddot{\varphi}_{\text{desfase}, vz} = 0 \quad (78)$$

10

[0126] Con el fin de eliminar los armónicos más altos de la escalera con respecto a la señal de medición, la frecuencia de resonancia $\omega_{arm., vz}$ y la amortiguación $\bar{d}_{arm., vz}$ se determinan de forma experimental, siendo estas también en el presente caso dependientes, en general, de unos parámetros de sistema variables tales como la longitud de la escalera, los ángulos de elevación y de articulación y las masas de carga. Como alternativa, la frecuencia de resonancia y la amortiguación puede determinarse a partir de un modelo físico adecuado.

15

$$\ddot{\varphi}_{arm., vz} = -\omega_{arm., vz}^2 \cdot \varphi_{arm., vz} - 2d_{arm., vz} \omega_{arm., vz} \cdot \dot{\varphi}_{arm., vz} \quad (79)$$

20 [0127] Con la representación en el espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_{vz} &= \underline{A}_{vz} \cdot \underline{x}_{vz} + \underline{B}_{vz} \cdot \underline{u}_{vz} \\ y_{m\,vz} &= \underline{C}_{vz} \cdot \underline{x}_{vz} \end{aligned} \quad (80)$$

Vector de estado: $\underline{x}_{vz} = \begin{bmatrix} \varphi_{vz} \\ \dot{\varphi}_{vz} \\ \varphi_{\text{desfase}, vz} \\ \varphi_{arm., vz} \\ \dot{\varphi}_{arm., vz} \end{bmatrix}$ Matriz de entrada: $\underline{B}_{vz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Matriz de sistema: $\underline{A}_{vz} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_{vz}^2 & -2d_{vz} \omega_{vz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_{arm., vz}^2 & -2d_{arm., vz} \omega_{arm., vz} \end{bmatrix}$

Matriz de salida: $\underline{C}_{vz} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$ (81)

[0128] De acuerdo con la invención, las porciones de señal de perturbación se eliminan de la señal de medición con un procedimiento de estimación que está soportado por un observador. La ecuación de observador para un observador completo para el modelo de espacio de estados modificado es, por lo tanto:

$$\hat{\underline{x}}_{vz} = (\underline{A}_{vz} - \underline{H}_{vz} \underline{C}_{vz}) \cdot \underline{x}_{vz} + \underline{B}_{vz} \cdot \underline{u}_{vz} + \underline{H}_{vz} \underline{y}_{m,vz} \quad (82)$$

5

[0129] La matriz de observador de perturbación

$$\underline{H}_{vz} = [h_{vz,1}, h_{vz,2}, h_{vz,3}, h_{vz,4}, h_{vz,5}]^T$$

10

se calcula, por ejemplo, de acuerdo con el procedimiento de diseño de Riccati. En el presente caso, es esencial que los parámetros variables tales como la longitud de la escalera, el ángulo de elevación y las masas de carga se tengan en cuenta de forma similar en el observador mediante la adaptación de la ecuación diferencial de observador

15 y las ganancias de observador. Los valores estimados para $\hat{\phi}_{vz}$ y $\dot{\phi}_{vz}$ a partir del observador de perturbación pueden suministrarse directamente al controlador de estados. De esta forma, la función de amortiguación de vibración puede mejorarse de forma significativa.

20 **[0130]** Como alternativa a la eliminación basada en observador de los armónicos más altos, la ganancia de realimentación del controlador de estados 93 durante el movimiento de elevación también puede atenuarse por medio del atenuador proporcional 92. De esta forma, la función de control para la escalera en reposo puede mejorarse si no se ha realizado eliminación basada en observador alguna.

25 **[0131]** Las componentes individuales del controlador de eje para el eje de elevación se explican de ese modo. Como resultado, la combinación del módulo de planificación de trayectoria de posición y el controlador de eje de elevación / inclinación cumple el requisito de un movimiento libre de vibraciones y preciso en cuanto a la trayectoria de posición de la jaula durante la elevación y el descenso.

30 **[0132]** Los controladores de eje para extender y recoger la escalera 47, para telescopar el brazo articulado 413, para el eje de nivel 49 y para el brazo articulado 411 están provistos de un control en cascada convencional con un lazo de servo externo para la posición y uno interno para la celeridad, debido a que estos ejes muestran solo una ligera tendencia a la vibración.

35 **[0133]** Por lo tanto, se consigue una escalera orientable, el control de trayectoria de posición de la cual permite un desplazamiento preciso en cuanto a la trayectoria de posición de la jaula con todos los ejes y suprime las vibraciones activas de la escalera en el proceso.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Escalera orientable o similar, con una unidad de escalera telescópica y, acoplado en el extremo de la unidad de escalera, un brazo articulado que porta una jaula, escalera orientable que contiene un control para mover las secciones de escalera, estando la escalera orientable **caracterizada por que**, durante el desplazamiento de la jaula, se suprimen las vibraciones de las secciones de escalera, mediante la realimentación de por lo menos una de las siguientes variables medidas, la flexión de la unidad de escalera en la dirección horizontal y vertical, el ángulo de elevación, el ángulo de rotación, la longitud de extensión y la torsión de la unidad de escalera por medio de un controlador a las variables de control para las unidades de accionamiento y para las cuales se proporciona un control de piloto que representa el comportamiento de movimiento idealizado de la escalera durante el desplazamiento de la jaula en un modelo dinámico, basado en ecuaciones diferenciales y calcula las variables de control idealizadas para las unidades de accionamiento de sección de escalera a partir del modelo dinámico para un movimiento esencialmente libre de vibraciones de la escalera en la que se usan galgas extensométricas como sensores de medición para la flexión de la unidad de escalera en la dirección horizontal y vertical y para su torsión, y en la que los grados elásticos de libertad que pertenecen al brazo articulado se desprecian.
- 10 2. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizada por que** el brazo articulado es telescópico y **por que** un controlador de eje para telescopar el brazo articulado está provisto de un control en cascada con un lazo de servo externo para la posición y uno interno para la celeridad.
- 15 20 3. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, **caracterizada por que** un módulo de planificación de trayectoria de posición se encuentra disponible para la generación de la trayectoria de posición de movimiento de escalera en el área de funcionamiento que suministra la trayectoria de posición de movimiento en forma de funciones del tiempo para la posición de la jaula, la celeridad de la jaula, la aceleración de la jaula, la sobreaceleración de la jaula y, si es necesario, la derivada de la sobreaceleración de la jaula a un bloque de control de piloto que controla las unidades de accionamiento de sección de escalera.
- 25 30 4. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 3, **caracterizada por que** el módulo de planificación de trayectoria de posición permite la entrada de restricciones cinemáticas para las funciones del tiempo de la posición de la jaula, la celeridad de la jaula, la aceleración de la jaula y la sobreaceleración de la jaula.
- 35 40 5. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizada por que** el módulo de planificación de trayectoria de posición también genera la función del tiempo para la derivada de la sobreaceleración.
6. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 4 y 5, **caracterizada por que** el módulo de planificación de trayectoria de posición contiene unos limitadores de inclinación para tener en cuenta las restricciones cinemáticas.
7. Escalera orientable de acuerdo con la reivindicación 6, **caracterizada por que** el módulo de planificación de trayectoria de posición genera unas funciones de sobreaceleración continuas y a partir de estas determina, a través de integración, las funciones del tiempo para la aceleración de la jaula, la celeridad de la jaula y la posición de la jaula.
- 45 8. Escalera orientable de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizada por que** la flexión de la unidad de escalera en la dirección horizontal y vertical y su torsión puede reconstruirse a partir de las señales de presión de las unidades de accionamiento hidráulico de las secciones de escalera.
9. Escalera orientable de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por** un módulo de observador de perturbación para corregir el desfase de las señales de medición de la flexión de la unidad de escalera en la dirección horizontal y vertical y la torsión y para eliminar la porción de frecuencia de las señales respectivas que se corresponden con los armónicos más altos de la unidad de escalera.
- 50 55 10. Escalera orientable de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** el controlador está diseñado para ponderar los valores de medición de realimentación con una ganancia de control y para reducir la ganancia de control para eliminar los armónicos más altos de la unidad de escalera.

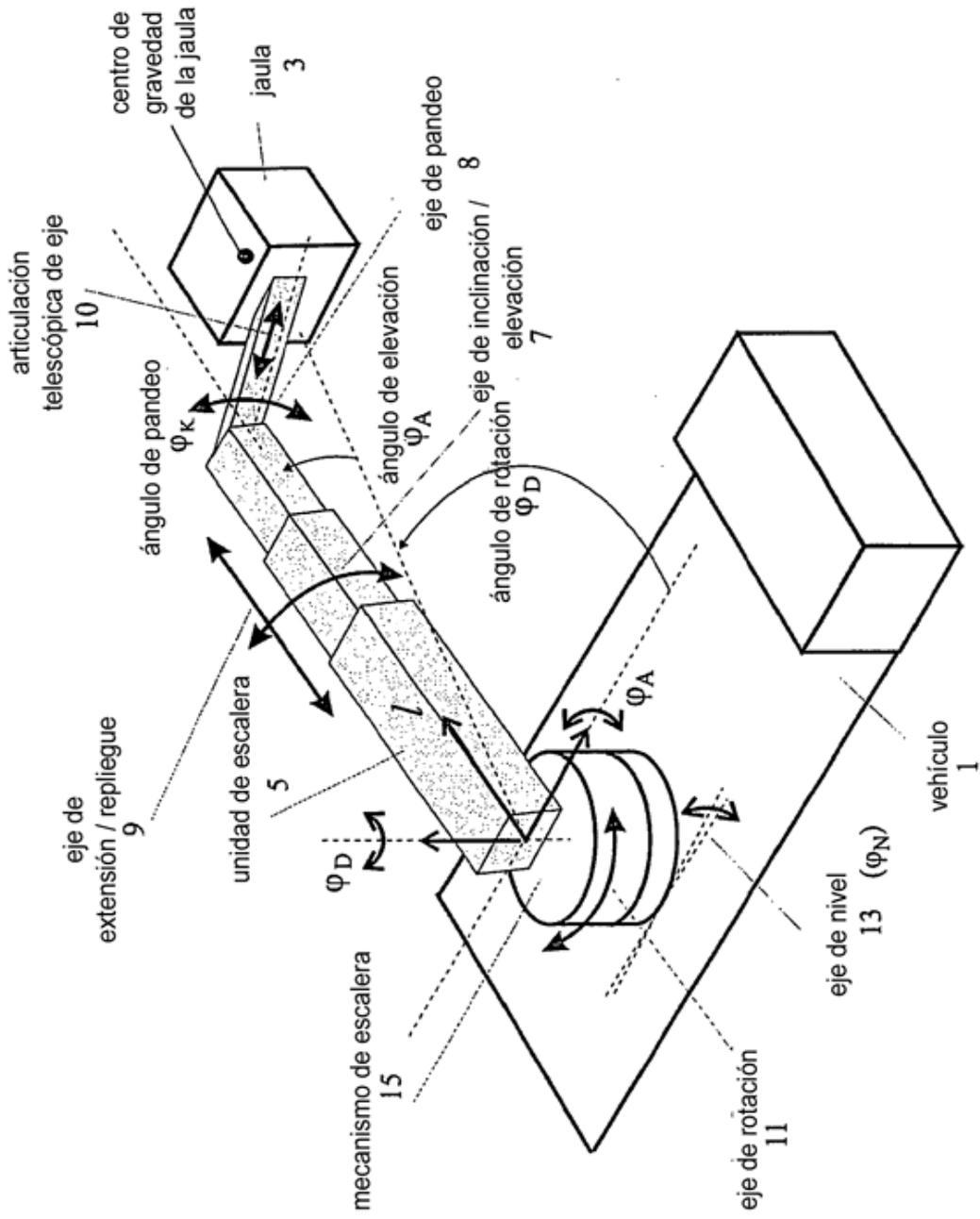
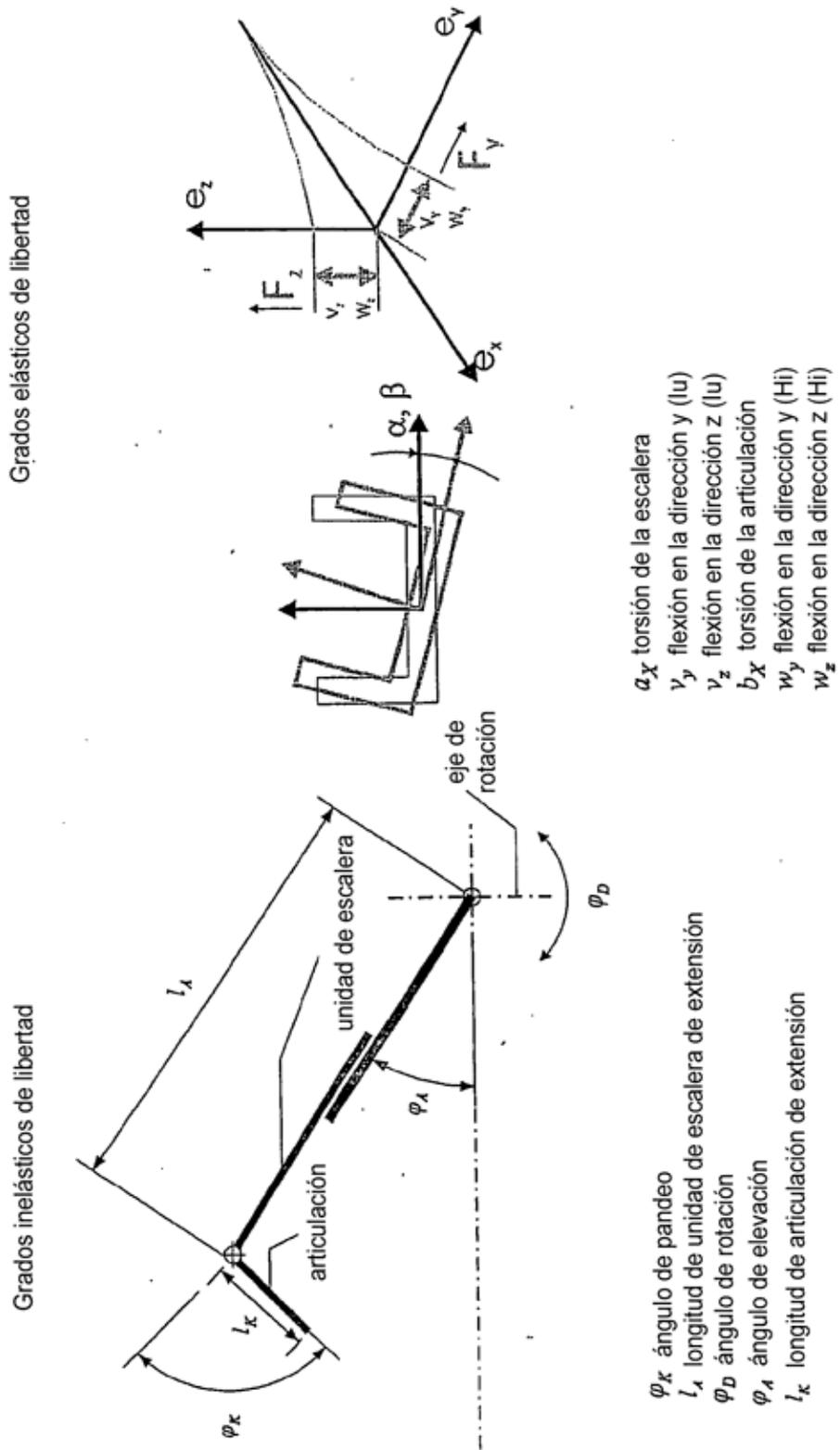


Fig.1

Fig.2



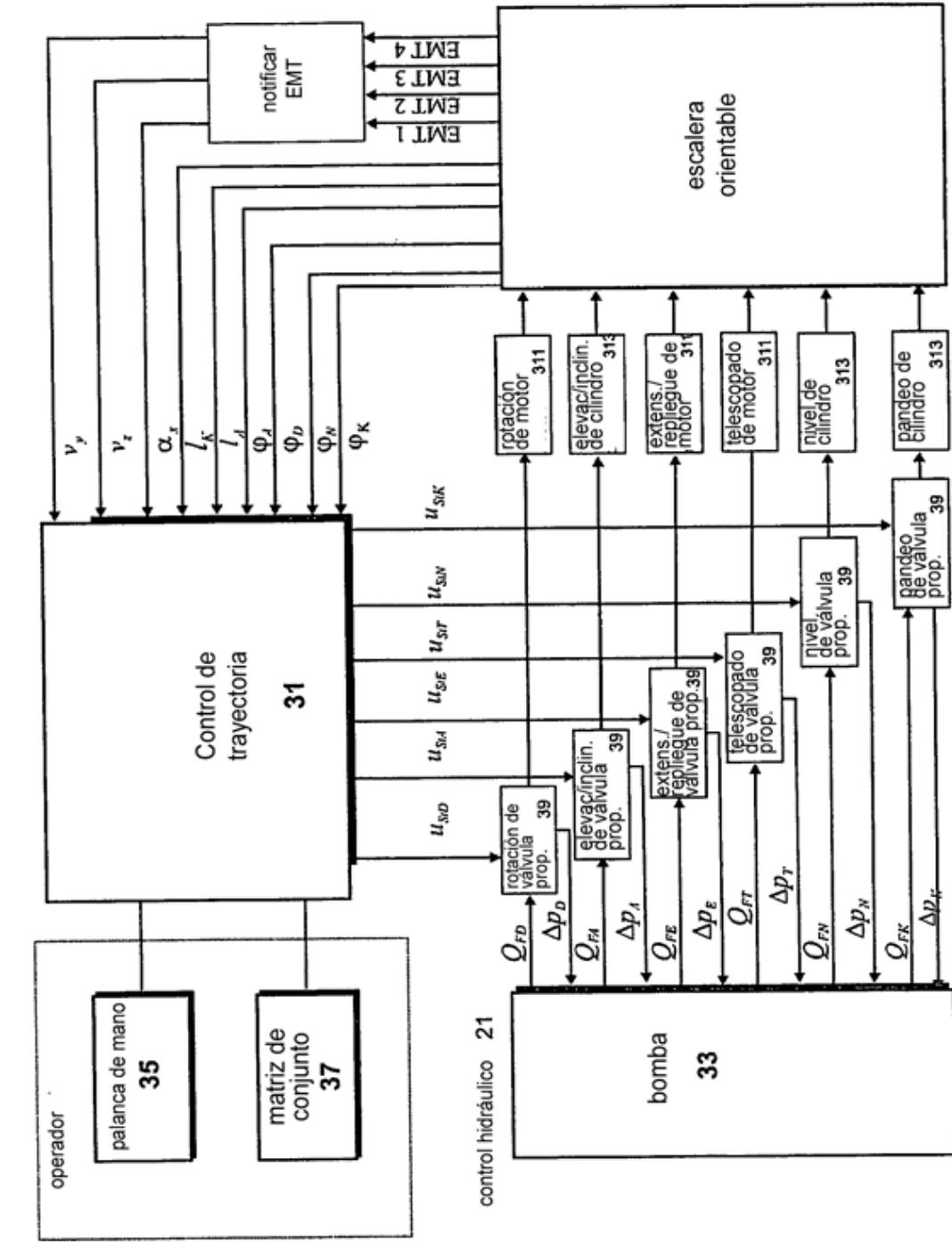


Fig.3

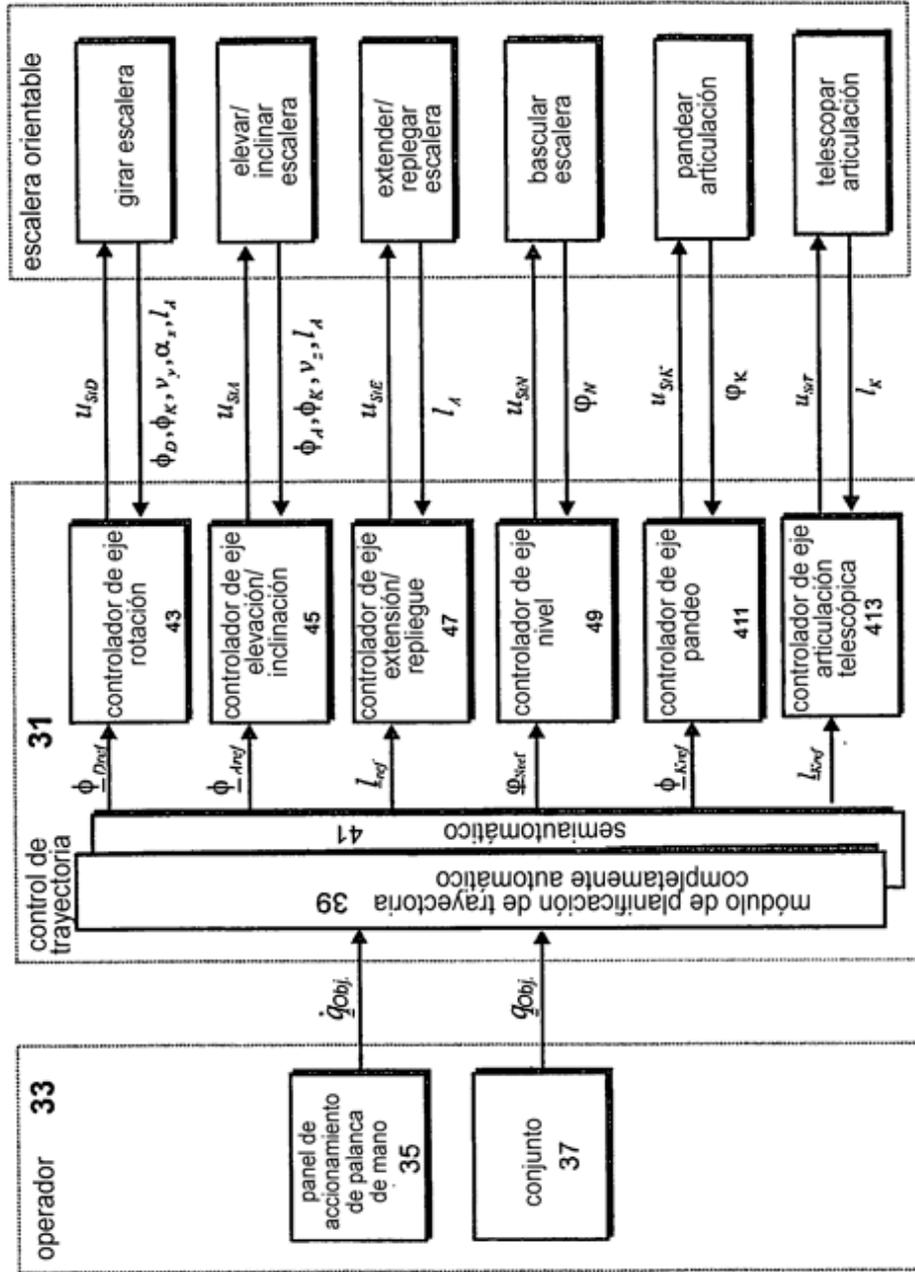


Fig.4

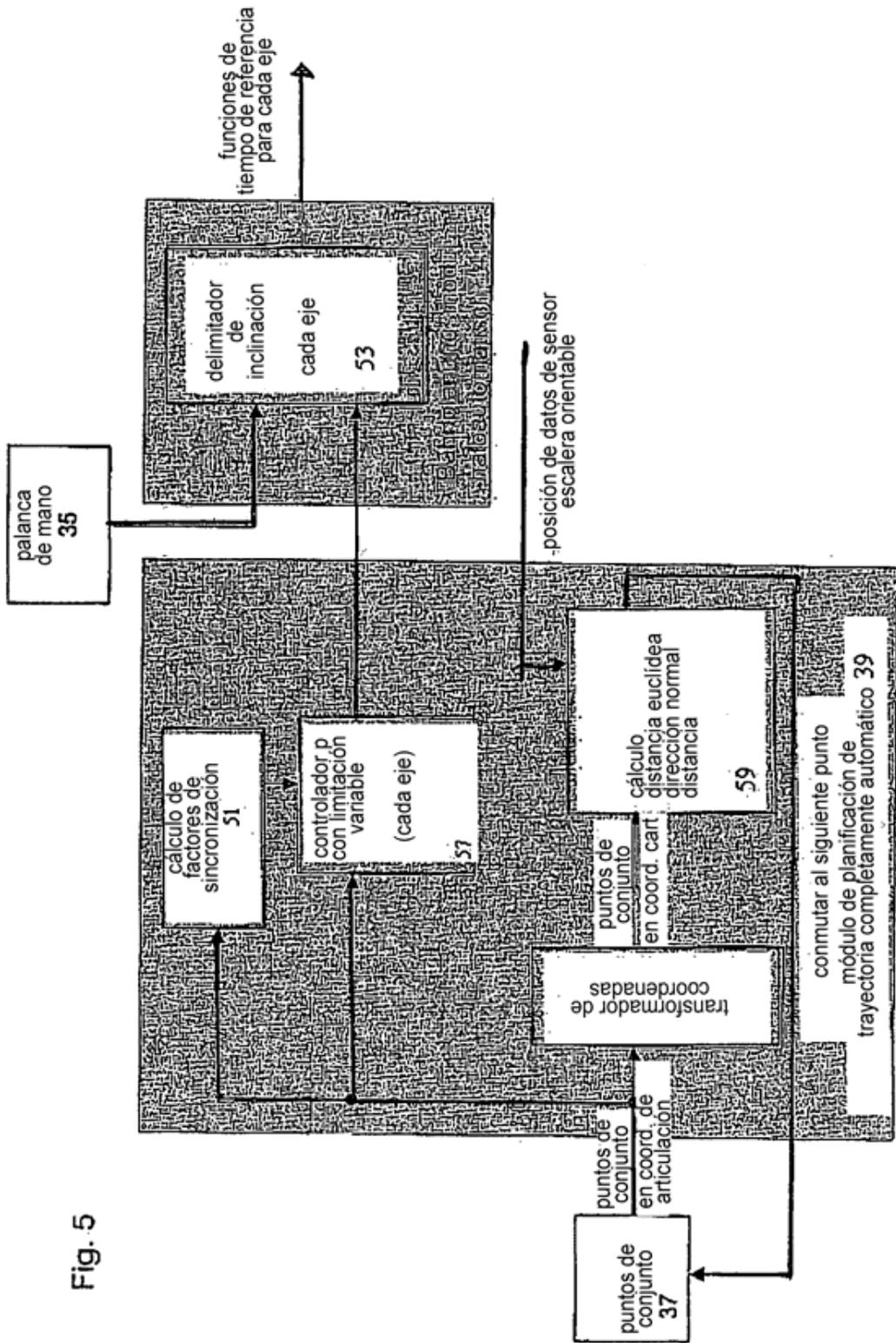


Fig. 5

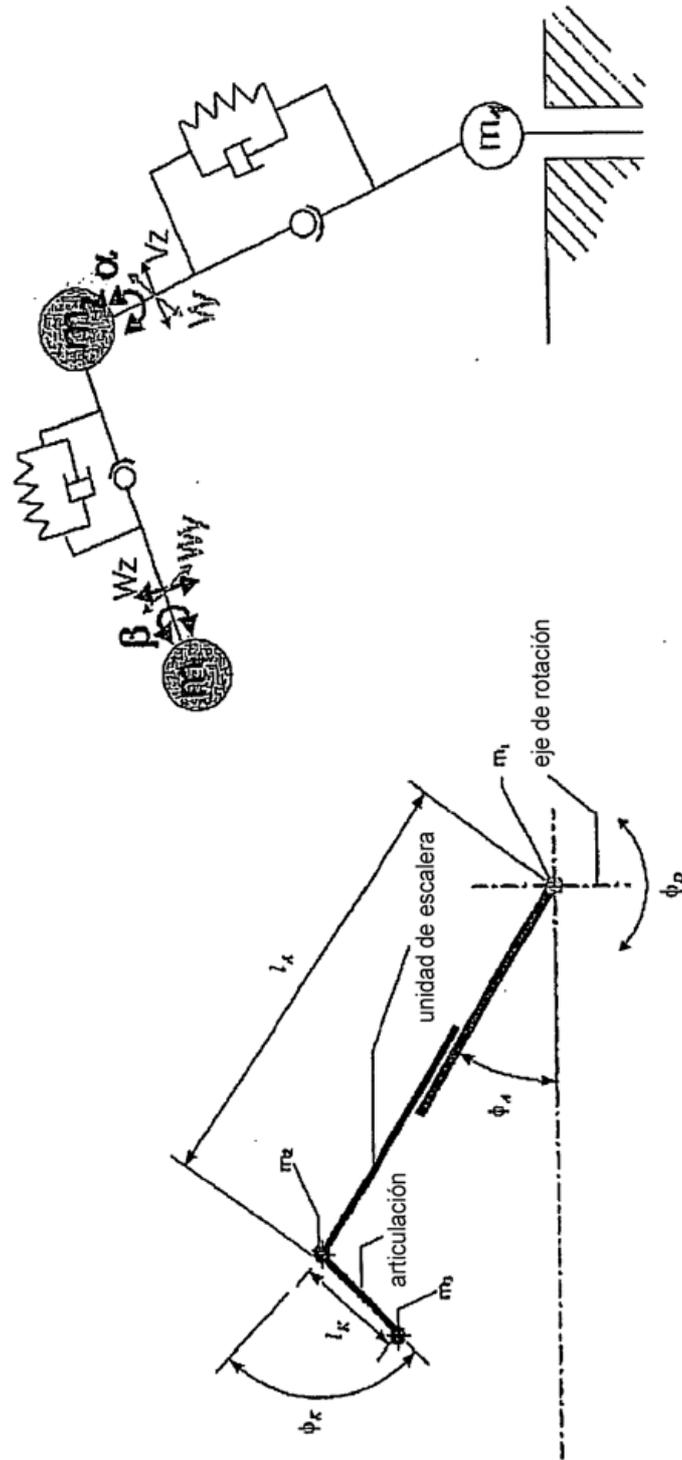


Fig.6

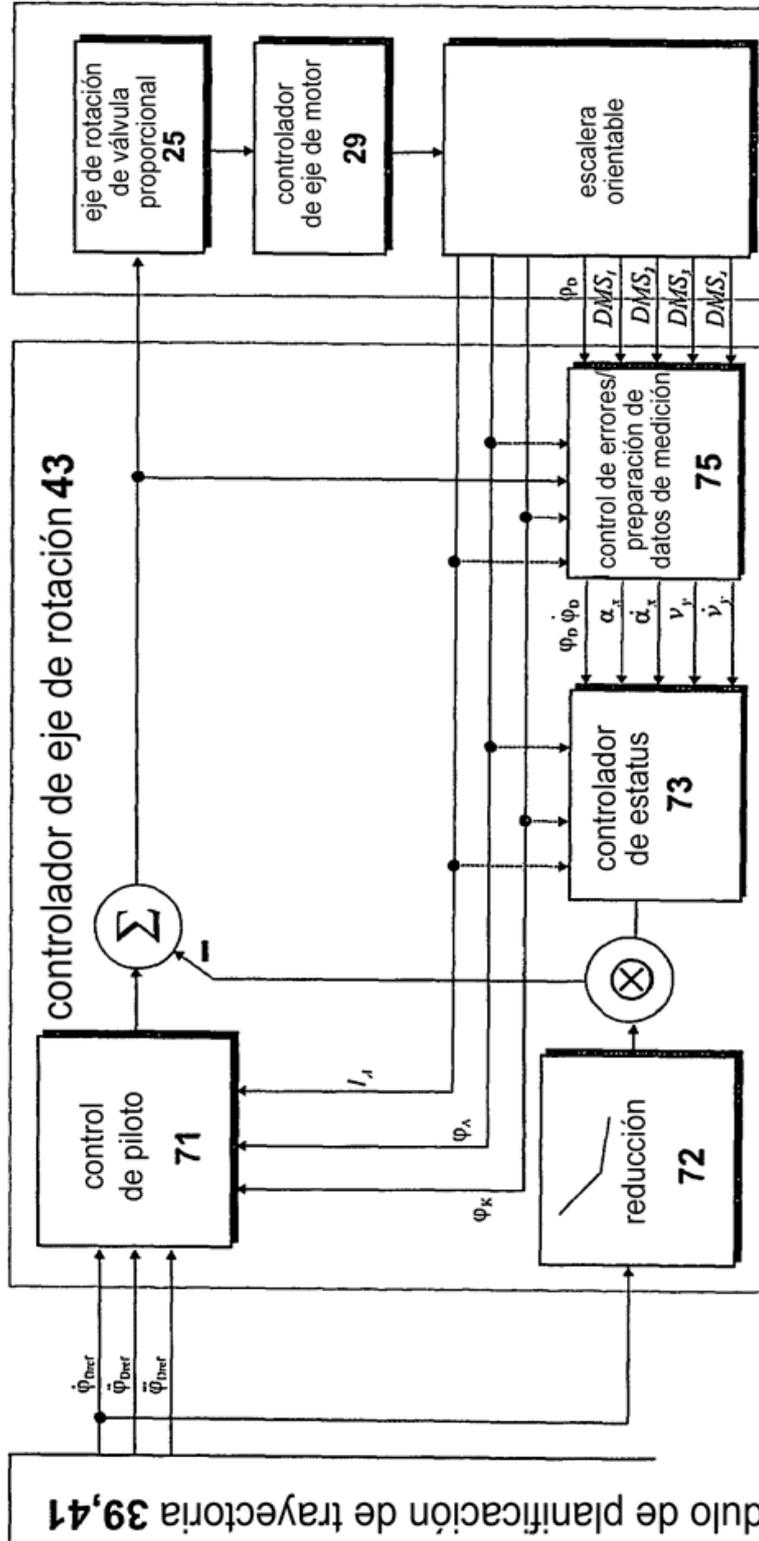


Fig.7

módulo de planificación de trayectoria 39,41

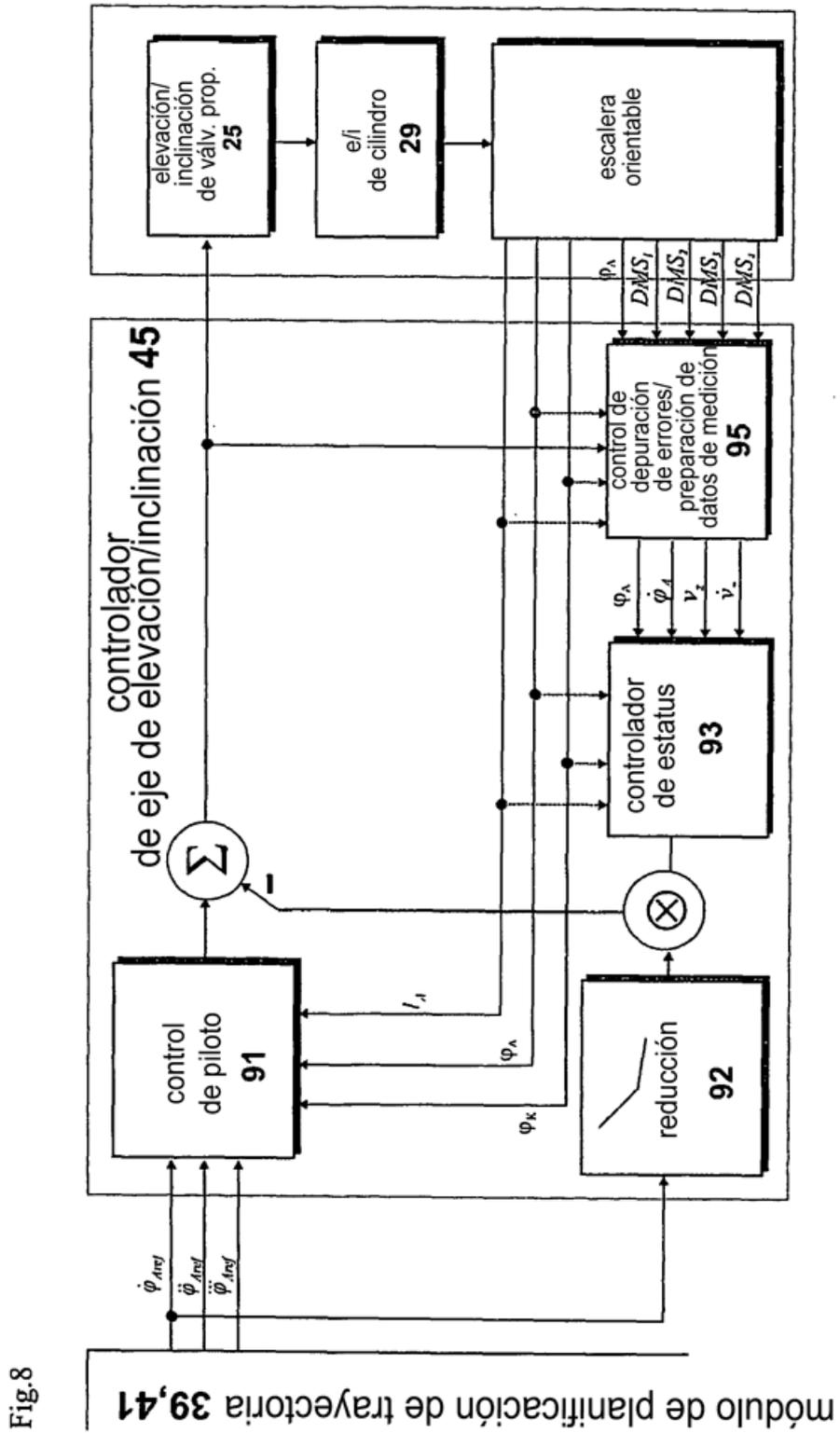


Fig.8

Fig.9

