

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 378 218**

51 Int. Cl.:
B66C 13/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **10005588 .8**
- 96 Fecha de presentación: **28.05.2010**
- 97 Número de publicación de la solicitud: **2272785**
- 97 Fecha de publicación de la solicitud: **12.01.2011**

54 Título: **Procedimiento para activar un accionamiento de grúa**

30 Prioridad:
08.07.2009 DE 102009032270

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
10.04.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
10.04.2012

73 Titular/es:
**Liebherr-Werk Nenzing GmbH
Dr.-Hans-Liebherr-Strasse 1
6710 Nenzing, AT**

72 Inventor/es:
**Schneider, Klaus;
Sawodny, Oliver y
Küchler, Sebastian**

74 Agente/Representante:
Carvajal y Urquijo, Isabel

ES 2 378 218 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

Procedimiento para activar un accionamiento de una grúa

5 La presente invención se refiere a procedimientos para activar accionamientos de una grúa. En especial la presente invención se refiere con ello a un procedimiento para activar un accionamiento de una grúa, en especial de un mecanismo de giro y/o de un mecanismo de basculamiento, en donde un movimiento nominal de la punta de pluma se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento. Asimismo la presente invención se refiere a un procedimiento para activar un mecanismo de elevación de una grúa, en el que un movimiento de elevación nominal de la carga se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento. En el caso del accionamiento de la grúa conforme a la invención puede tratarse en especial de un accionamiento hidráulico. Sin embargo, también es posible el uso de un accionamiento eléctrico. Con ello el mecanismo de basculamiento puede materializarse por ejemplo a través de un cilindro hidráulico o a través de un mecanismo de plegado.

15 En los procedimientos conocidos para activar accionamientos de una grúa, un operador prefija con ello mediante palancas manuales el movimiento nominal de la punta de pluma y de este modo el movimiento nominal de la carga en dirección horizontal, de lo que a causa de la cinemática del mecanismo de giro y del mecanismo de basculamiento se calcula una magnitud de control para activar estos accionamientos. Asimismo el operador prefija mediante palancas manuales el movimiento de elevación nominal de la carga, a partir del cual se calcula una magnitud de control para activar el mecanismo de elevación.

20 Asimismo se conocen procedimientos para amortiguar el penduleo de carga, por ejemplo del documento DE 102004052616, en el que en lugar del movimiento de la punta de pluma se usa un movimiento nominal de la carga como magnitud de entrada, para calcular una magnitud de control para activar los accionamientos. Aquí puede usarse por ejemplo un modelo físico del movimiento de la carga suspendida del cable de carga en función del movimiento de los accionamientos, para evitar oscilaciones pendulares esféricas de la carga mediante una activación correspondiente de los accionamientos.

25 Los procedimientos conocidos para activar grúas, sin embargo, pueden conducir a una carga considerable sobre la estructura de la grúa.

La tarea de la presente invención consiste por lo tanto en poner a disposición un procedimiento para la activación de un accionamiento de una grúa, el cual reduzca estas cargas sobre la estructura de la grúa.

30 Conforme a la invención esta tarea es resuelta mediante un procedimiento conforme a la reivindicación 1. En el caso del procedimiento conforme a la invención para activar un accionamiento de una grúa, en especial un mecanismo de giro y/o un mecanismo de basculamiento, un movimiento nominal de la punta de pluma se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento. Conforme a la invención está previsto con ello que, para el cálculo de la magnitud de control, se tenga en cuenta la dinámica interna de oscilación del sistema formada por el accionamiento y la estructura de la grúa, para amortiguar oscilaciones naturales. En el caso del accionamiento puede tratarse con ello de un accionamiento hidráulico. Sin embargo, el uso de un accionamiento eléctrico es también posible.

35 Con ello los inventores de la presente invención han determinado que las oscilaciones naturales pueden cargar fuertemente la estructura de la grúa y los accionamientos. Por el contrario, si se tiene en cuenta la dinámica interna de oscilación del accionamiento y de la estructura de la grúa a la hora de calcular la magnitud de control, pueden amortiguarse las oscilaciones naturales y de forma ventajosa evitarse en gran medida. Esto tiene la ventaja, por una parte, de que la punta de pluma sigue con precisión, sin oscilación, el movimiento nominal prefijado. Por otro lado la estructura de la grúa y los accionamientos no se cargan a causa de la oscilación natural. La amortiguación conforme a la invención de las oscilaciones naturales actúa por lo tanto positivamente sobre la vida útil y los costes de mantenimiento.

45 El procedimiento conforme a la invención se usa con ello ventajosamente en grúas en las que una pluma está articulada a una torre, de forma que puede bascular hacia arriba alrededor de un eje de basculamiento horizontal. La pluma puede bascular con ello hacia arriba y hacia abajo en el plano de basculamiento mediante un cilindro de pluma, dispuesto entre la torre y la pluma. También es posible usar como mecanismo de basculamiento un mecanismo de plegado, el cual mueva la pluma a través de un cableado en el plano de basculamiento. La torre puede girar a su vez a través de un mecanismo de giro, en especial en forma de un motor hidráulico, alrededor de un eje vertical. La torre puede estar dispuesta con ello sobre un carro de rodadura, el cual puede trasladarse sobre un mecanismo de traslación.

50 El procedimiento conforme a la invención puede usarse con cualquier grúa, por ejemplo con grúas de puerto y en especial con grúas móviles de puerto.

- 5 De forma ventajosa, la activación del accionamiento se realiza conforme a la invención sobre la base de un modelo físico, el cual describe el movimiento de la punta de grúa en función de la magnitud de control. La utilización de un modelo físico hace posible con ello una adaptación rápida del procedimiento de control a diferentes grúas. Con ello no es necesario establecer primero el comportamiento oscilante de forma laboriosa mediante mediciones, sino que puede describirse con base en el modelo físico. Además de esto, el modelo físico hace posible una descripción realista de la dinámica de oscilación de la estructura de la grúa, de tal modo que pueden amortiguarse todas las oscilaciones naturales relevantes. El modelo físico describe para esto no sólo la cinética de los accionamientos y de la estructura de la grúa, sino también la dinámica de oscilación del accionamiento y de la estructura de la grúa.
- 10 De forma ventajosa el cálculo de la magnitud de control se realiza con base en una inversión del modelo físico, el cual describe el movimiento de la punta de pluma en función de la magnitud de control. Mediante la inversión se obtiene de este modo la magnitud de control en función del movimiento nominal de la punta de pluma.
- De forma ventajosa el modelo, que describe el movimiento de la punta de grúa en función de la magnitud de control, no es lineal. Esto tiene como consecuencia una mayor precisión de la activación, ya que los efectos decisivos, que conducen a oscilaciones naturales de la estructura de la grúa, no son lineales.
- 15 Si se usa un accionamiento hidráulico, el modelo tiene en cuenta de forma ventajosa la dinámica de oscilación del accionamiento con base en la compresibilidad del fluido hidráulico. Esta compresibilidad conduce con ello a oscilaciones de la estructura de la grúa, que pueden cargar la misma considerablemente. Si se tiene en cuenta la compresibilidad del fluido hidráulico pueden amortiguarse estas oscilaciones.
- 20 El procedimiento conforme a la invención sirve de forma ventajosa con ello para activar el cilindro de basculamiento utilizado como mecanismo de basculamiento, en donde la cinemática de la articulación del cilindro así como la masa y la inercia de la pluma de la grúa se incluyen en el cálculo de la magnitud de control. Por medio de esto pueden amortiguarse oscilaciones naturales de la pluma en el plano de basculamiento.
- 25 Alternativamente al cilindro hidráulico puede usarse un mecanismo de plegado como mecanismo de basculamiento, en donde de forma ventajosa la cinemática y/o dinámica del cableado de plegado así como la masa y la inercia de la pluma de la grúa se incluyan en el cálculo de la magnitud de control.
- Alternativa o adicionalmente, el procedimiento conforme a la invención sirve para activar el mecanismo de giro, en donde el momento de inercia de la pluma de la grúa se incluye en el modelo. Por medio de esto pueden amortiguarse oscilaciones naturales de la estructura de la grúa alrededor del eje de giro vertical.
- 30 De forma ventajosa, la amortiguación de oscilaciones se realiza en el curso del control previo. Por medio de esto pueden ahorrarse costosos sensores, los cuales tendrían que usarse en caso contrario. Además de esto, el control previo hace posible una reducción efectiva de las oscilaciones naturales sin que, como en el caso de una regulación con circuito de regulación cerrado, se esté limitado a un determinado margen de frecuencias a causa de la velocidad de respuesta de los accionamientos.
- 35 De forma ventajosa se usan con ello la posición, la velocidad, la aceleración y/o la sacudida de la punta de pluma como magnitudes nominales del control previo. En especial se usan con ello ventajosamente al menos dos de estos valores como magnitudes nominales. Asimismo ventajosamente, aparte de la posición se utiliza al menos una de las otras magnitudes como magnitud nominal. Asimismo ventajosamente se utilizan todas estas magnitudes como magnitudes nominales del control previo.
- 40 Asimismo ventajosamente se genera, a partir de datos introducidos por un operador y/o un sistema de automatización, una trayectoria nominal de la punta de pluma como magnitud de entrada de la unidad de control. De este modo se genera una trayectoria nominal de la punta de pluma a partir de los datos introducidos por un operador mediante palancas manuales y/o de las señales de un sistema de automatización. El procedimiento de control conforme a la invención es responsable a continuación de que los accionamientos de la grúa se activen de tal modo, que la punta de pluma siga esta trayectoria nominal y de que se eviten oscilaciones naturales de la grúa.
- 45 El procedimiento conforme a la invención puede usarse con ello junto con una amortiguación del penduleo de carga, o bien también completamente sin una amortiguación del penduleo de carga. Los procedimientos conocidos para amortiguar el penduleo de carga se centran con ello exclusivamente en evitar oscilaciones pendulares de la carga, lo que en parte podría conducir incluso a un aumento de las oscilaciones naturales de la estructura de la grúa y, de este modo, a una carga mayor que en una activación sin amortiguación del penduleo de carga. La presente invención amortigua por el contrario las oscilaciones naturales de la estructura de la grúa y de este modo cuida la estructura de la grúa.
- 50

Con ello puede estar previsto que posibles oscilaciones pendulares esféricas de la carga no se incluyan como magnitud de medición en la activación. Por ello puede prescindirse de costosos aparatos de medición para medir el ángulo de cable.

5 Asimismo pueden no tenerse en cuenta posibles oscilaciones pendulares esféricas de la carga durante la activación del accionamiento. Por medio de esto el procedimiento conforme a la invención puede usarse también sin amortiguación del penduleo de carga, también en el caso de unidades de control de grúa más sencillas, para cuidar la estructura de la grúa.

10 El procedimiento conforme a la invención puede usarse sin embargo también en unidades de control de grúa con amortiguación del penduleo de carga. El procedimiento se implementa después de tal modo, que en primer lugar el movimiento de carga se usa como magnitud nominal, a partir de la cual se genera un movimiento nominal de la punta de pluma. Este movimiento nominal de la punta de pluma se usa después como magnitud de entrada del procedimiento conforme a la invención. Mediante este planteamiento en dos etapas puede conseguirse una amortiguación de las oscilaciones naturales de la estructura de la grúa, incluso en procedimientos con amortiguación del penduleo de carga. Los procedimientos conocidos para amortiguar el penduleo de carga, por el contrario, solamente están diseñados para evitar oscilaciones de la carga y, a causa de esto, pueden incluso intensificar las oscilaciones naturales de la estructura de la carga.

20 El procedimiento representado hasta ahora servía con ello de forma preferida para activar un mecanismo de giro y/o un mecanismo de plegado de una grúa. Sin embargo, también puede usarse para activar el mecanismo de elevación de una grúa. En especial puede tenerse en cuenta con ello la dinámica de oscilación del mecanismo de elevación, a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico.

Sin embargo, a la hora de activar el mecanismo de elevación se usa ventajosamente el movimiento de elevación nominal de la carga como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento.

25 La tarea de la presente invención consiste por ello también, a la hora de la activación del mecanismo de elevación de una grúa, en hacer posible el cuidado de una estructura.

30 Esta tarea es resuelta conforme a la invención mediante un procedimiento conforme a la reivindicación 10. Con ello está previsto un procedimiento para activar un mecanismo de elevación de una grúa, en el que un movimiento de elevación nominal de la carga se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento. Conforme a la invención está previsto con ello que, a la hora de calcular la magnitud de control, se tenga en cuenta la dinámica de oscilación del sistema formado por mecanismo de elevación, cable y carga en la dirección del cable, para amortiguar oscilaciones naturales. Los inventores de la presente invención han reconocido con ello que la dinámica de oscilación del sistema formado por mecanismo de elevación, cable y carga, puede conducir a oscilaciones de la carga o de la estructura de la grúa, que pueden cargar notablemente tanto el cable de carga como la pluma. Por ello a continuación se tiene en cuenta conforme a la invención esta dinámica de oscilación, para evitar oscilaciones naturales de la carga y/o del mecanismo de elevación. El mecanismo de elevación puede accionarse con ello hidráulica- y/o eléctricamente.

40 También este procedimiento se usa de forma ventajosa en grúas en las que está articulada una pluma a una torre, de forma que puede bascular alrededor de un eje de basculamiento horizontal. El cable de carga es guiado con ello ventajosamente mediante un torno sobre la base de torre, a través de uno o varios rodillos de inversión en la punta de torre, hasta uno o varios rodillos de inversión en la punta de pluma.

45 De forma ventajosa y conforme al procedimiento, conforme a la invención se tiene en cuenta en un funcionamiento de reducción de oscilaciones la dinámica de oscilación del sistema de elevación, mientras que posibles movimientos de la región de apoyo, sobre la que se apoya la estructura de la grúa, no se tienen en cuenta para la activación del mecanismo de elevación. La activación parte por lo tanto, en funcionamiento de reducción de oscilaciones, de una región de apoyo fija. La activación conforme a la invención sólo tiene por ello que tener en cuenta oscilaciones, que se produzcan a causa del cable de elevación y/o del mecanismo de elevación y/o de la estructura de la grúa. Por el contrario, los movimientos de la región de apoyo, como los que se producen por ejemplo en el caso de una grúa flotante a causa del movimiento ondulatorio, no se tienen en cuenta en funcionamiento de reducción de oscilaciones. De este modo, la unidad de control de la grúa puede configurarse de una forma considerablemente más sencilla.

50 El procedimiento conforme a la invención puede usarse con ello en una grúa que durante la elevación con la estructura de la grúa se apoye realmente sobre una región de apoyo fija, en especial sobre el terreno. La unidad de control de grúa conforme a la invención, sin embargo, también puede usarse en una grúa flotante, aunque no tiene en cuenta en funcionamiento de reducción de oscilaciones los movimientos del cuerpo flotante. Si la unidad de control de grúa presenta un modo de funcionamiento con seguimiento de oleaje activo, el funcionamiento de

reducción de oscilaciones se realiza de forma correspondiente sin funcionamiento de seguimiento de oleaje activo simultáneo.

5 Asimismo ventajosamente se usa el procedimiento conforme a la invención en grúas transportables y/o trasladables. La grúa presenta con ello ventajosamente medios de apoyo, a través de los cuales puede apoyarse en diferentes emplazamientos de elevación. Asimismo ventajosamente se usa el procedimiento en grúas de puerto, en especial en grúas de puerto móviles, en grúas de orugas, en grúas de vehículos, etc.

10 Para el cálculo de la magnitud de control se tiene en cuenta ventajosamente la dinámica de oscilación del sistema de elevación, a causa de la extensibilidad del cable de elevación. La extensibilidad del cable de elevación conduce a una velocidad de extensión del cable en la dirección del cable, que se amortigua conforme a la invención mediante una activación correspondiente del mecanismo de elevación. Con ello se tiene en cuenta ventajosamente la dinámica de oscilación del cable en el caso de una carga suspendida libremente en el aire.

El mecanismo de elevación de la grúa conforme a la invención puede accionarse con ello hidráulicamente. Alternativamente es también posible un accionamiento a través de un motor eléctrico.

15 Si se usa un mecanismo de elevación accionado hidráulicamente se tiene en cuenta asimismo, a la hora de calcular la magnitud de control, la dinámica de oscilación del mecanismo de elevación a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico. De este modo también se tienen en cuenta aquellas oscilaciones naturales, que se producen a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico con el que se impulsa el accionamiento del mecanismo de elevación.

20 De forma ventajosa se incluye con ello la longitud de cable variable del cable de elevación en el cálculo de la magnitud de control. El procedimiento conforme a la invención para activar el mecanismo de elevación tiene en cuenta de este modo oscilaciones de la carga suspendida del cable de elevación, las cuales son provocadas a causa de la extensibilidad del cable de elevación, en función de longitud de cable del cable de elevación. De forma ventajosa se incluyen asimismo en el cálculo constantes de material del cable de elevación, que influyen en su extensibilidad. De forma ventajosa se determina con ello la longitud de cable con base en la posición del mecanismo de elevación.

Asimismo ventajosamente se incluye el peso de la carga suspendida del cable de carga en el cálculo de la magnitud de control. De forma ventajosa se mide con ello este peso de la carga y se incluye como valor de medición en el procedimiento de control.

30 De forma ventajosa la activación del mecanismo de elevación se basa en un modelo físico de la grúa, el cual describe el movimiento de elevación de la carga en función de la magnitud de control del mecanismo de elevación. Como ya se ha representado, un modelo físico de este tipo hace posible una adaptación rápida a nuevos tipos de grúa. Además de esto se hace posible por medio de esto una amortiguación de oscilaciones más precisa y mejor. Con ello el modelo describe, aparte de la cinemática también la dinámica de oscilación, a causa de la extensibilidad del cable de elevación y/o a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico. El modelo parte con ello ventajosamente de una región de apoyo fija de la grúa.

De forma ventajosa la activación del mecanismo de elevación se basa con ello en la inversión del modelo físico. Esta inversión hace posible una activación precisa del accionamiento. El modelo físico describe con ello en primer lugar el movimiento de la carga en función de la magnitud de control. Mediante la inversión se obtiene por ello la magnitud de control en función del movimiento de elevación nominal de la carga.

40 Como ya se ha representado con relación a la activación del mecanismo de basculamiento y del de giro, también la activación del mecanismo de elevación puede combinarse según la presente invención con una amortiguación del penduleo de carga, la cual amortigüe movimientos pendulares esféricos de la carga. El presente procedimiento, sin embargo, puede usarse también sin una amortiguación del penduleo de carga, para amortiguar oscilaciones naturales del sistema a causa del gato, del cable y de carga, que discurren en la dirección del cable, y en especial oscilaciones de la carga en la dirección de elevación.

La presente invención comprende asimismo una unidad de control de grúa para llevar a cabo un procedimiento, como se ha representado anteriormente. La unidad de control de grúa presenta con ello ventajosamente un programa de control, a través del cual se implementa un procedimiento como el que se ha representado.

50 La presente invención comprende asimismo una grúa con una unidad de control, la cual presenta un programa de control, a través del cual se implementa un procedimiento como el que se ha representado anteriormente. Mediante la unidad de control de grúa o de la grúa se obtienen evidentemente las mismas ventajas que se han representado ya anteriormente con relación al procedimiento.

- La grúa presenta con ello ventajosamente un mecanismo de giro, un mecanismo de basculamiento y/o un mecanismo de elevación. La grúa presenta ventajosamente con ello una pluma, la cual está articulada a la grúa de forma que puede bascular alrededor de un eje de basculamiento y se mueve a través de un cilindro de basculamiento. Alternativamente puede usarse como mecanismo de basculamiento un mecanismo de plegado.
- 5 Asimismo la grúa presenta ventajosamente una torre, la cual puede girar alrededor de un eje de giro vertical. La pluma está articulada con ello ventajosamente a la torre. Asimismo ventajosamente el cable de elevación discurre con ello desde el mecanismo de elevación, a través de uno o más rodillos de inversión, hasta la carga. Asimismo ventajosamente la grúa presenta un carro de rodadura con un mecanismo de traslación.
- La presente invención se representa a continuación con más detalle con base en un ejemplo de ejecución así como en dibujos. Con ello muestran:
- 10 la figura 1: un ejemplo de ejecución de una grúa conforme a la invención,
- la figura 2: un dibujo de principio de la cinemática de la articulación de la pluma de una grúa conforme a la invención,
- la figura 3: un dibujo de principio de la hidráulica del cilindro de basculamiento de una grúa conforme a la invención,
- 15 la figura 4: un dibujo de principio de la hidráulica del mecanismo de giro y del mecanismo de elevación de una grúa conforme a la invención, y
- la figura 5: una representación de principio del modelo físico, el cual se utiliza para describir la dinámica del cable de carga.
- En la figura 1 se muestra un ejemplo de ejecución de la grúa conforme a la invención, en el que se implementa un ejemplo de ejecución de un procedimiento de control conforme a la invención. La grúa presenta con ello una pluma 1, la cual está articulada a la torre 2 de forma que puede bascular hacia arriba alrededor de un eje de basculamiento horizontal. En el ejemplo de ejecución está previsto, para que la pluma 1 pueda bascular hacia arriba y hacia abajo en el plano de basculamiento, un cilindro hidráulico 10 que está articulado entre la pluma 1 y la torre 2.
- 20 La cinemática de la articulación de la pluma 1 a la torre 2 se ha representado con ello con más detalle en la figura 2. La pluma 1 está articulada a la torre 2, en un punto de articulación 13, de forma que puede bascular alrededor de un eje de basculamiento horizontal. El cilindro hidráulico 10 está dispuesto, a través de un punto de articulación 11 sobre la torre 2 y un punto de articulación 12 sobre la pluma 1, entre estas dos. Mediante una modificación de longitud del cilindro hidráulico 10 puede bascular de este modo la pluma 1 hacia arriba y hacia abajo en el plano de basculamiento. Los ángulos y las longitudes pertinentes para ello se han dibujado en la figura 2.
- 25 La torre 2 está dispuesta de forma que puede girar alrededor de un eje de giro vertical z, como se muestra en la figura 1, en donde el movimiento giratorio se genera mediante un mecanismo de giro 20. La torre 2 está dispuesta para ello sobre una superestructura giratoria 7, la cual puede girar a través de un mecanismo de giro con relación a un carro de rodadura 8. En el ejemplo de ejecución se trata con ello de una grúa trasladable, para lo que el carro de rodadura 8 está equipado con un mecanismo de traslación 9. En el emplazamiento de elevación la grúa puede apuntarse después a través de elementos de apoyo 71.
- 30 La elevación de la carga se realiza con ello a través de un cable de elevación 3, sobre el que está dispuesto un elemento de alojamiento de carga 4, en este caso una pinza de agarre. El cable de elevación 3 es guiado con ello a través de rodillos de inversión sobre la punta de pluma 5 así como sobre la punta de torre 6 hasta el mecanismo de elevación 30 sobre la superestructura giratoria, a través del cual puede modificarse la longitud del cable de elevación.
- 35 Los inventores de la presente invención han reconocido ahora que en los procedimientos conocidos para activar el accionamiento de la grúa pueden producirse oscilaciones naturales de la estructura de la grúa y de los accionamientos, las cuales pueden cargar estos considerablemente.
- A la hora de activar el mecanismo de giro y/o el mecanismo de basculamiento conforme a la presente invención, se usa por ello un movimiento nominal de la punta de pluma como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar los accionamientos. Si en el caso del accionamiento se trata de un accionamiento hidráulico, la magnitud de control puede comprender con ello por ejemplo la presión hidráulica o el flujo hidráulico hacia el accionamiento hidráulico. Conforme a la invención se tiene en cuenta con ello, a la hora de calcular la magnitud de control, la dinámica de oscilación interna de los accionamientos o de la estructura de la grúa. Por medio de esto pueden evitarse oscilaciones naturales de la estructura de grúa y de los accionamientos.
- 45 A la hora de activar el mecanismo de elevación, por el contrario, las oscilaciones de la carga a causa de la extensibilidad del cables de carga forman un factor decisivo para las oscilaciones naturales de la estructura de la
- 50

grúa. Por ello se utiliza aquí como sistema de accionamiento el sistema completo formado por el mecanismo de elevación 30 y el cable 3, para calcular la activación del mecanismo de elevación. Con ello se usa la posición de elevación nominal de la carga como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula la magnitud de control para activar el mecanismo de elevación. Con ello se tiene en cuenta la dinámica de oscilación del sistema formado por mecanismo de elevación, cable y carga en el cálculo de la magnitud de control, para evitar oscilaciones naturales del sistema. En especial se tiene en cuenta la extensibilidad del cable de elevación a la hora de calcular la magnitud de control, para amortiguar las oscilaciones de extensión del cable. Aquí no se tiene en cuenta por lo tanto ninguna oscilación pendular esférica de la carga, al contrario que en las amortiguaciones de penduleo de carga conocidas, sino la oscilación de la carga en la dirección del cable a causa de la extensión o contracción del cable de elevación. Asimismo también puede tenerse en cuenta, en el caso del mecanismo de elevación 30, la oscilación del sistema formado por mecanismo de elevación 30 y el cable 3 a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico.

La presente invención hace posible de este modo un considerable cuidado de la estructura de la grúa, lo que a su vez ahorra costes en el mantenimiento y en la construcción. Al tener en cuenta la dinámica de oscilación de los accionamientos de la grúa, es decir del mecanismo de giro, del mecanismo de plegado así como del sistema formado por mecanismo de elevación y cable, se evitan con ello cargas sobre la estructura de la grúa, las cuales en los procedimientos conocidos para la amortiguación esférica del penduleo de la carga, por el contrario, incluso pueden intensificarse.

La activación de los accionamientos se realiza con ello sobre la base de un modelo físico, el cual describe el movimiento de la punta de grúa o de la carga en función de la magnitud de control, en donde el modelo tiene en cuenta la dinámica de oscilación interna de los respectivos accionamientos.

En la figura 3 se muestra con ello una representación de principio de la hidráulica del mecanismo de plegado. Con ello está previsto por ejemplo un motor diesel 15, el cual acciona una bomba de desplazamiento variable 16. Esta bomba de desplazamiento variable 16 entrega fluido hidráulico a las dos cámaras hidráulicas del cilindro de plegado 10. Alternativamente podría usarse para el accionamiento de la bomba de desplazamiento variable 16 también un motor eléctrico.

La figura 4 muestra un esquema de conexiones de principio de la hidráulica del mecanismo de giro y del mecanismo de elevación. Aquí está previsto a su vez por ejemplo un motor diesel o eléctrico 25, el cual acciona una bomba de desplazamiento variable 26. Esta bomba de desplazamiento variable 26 forma con un motor hidráulico 27 un circuito hidráulico y acciona el mismo. También el motor hidráulico 27 está ejecutado con ello como motor de desplazamiento variable. Alternativamente podría usarse también un motor de volumen constante. A través del motor hidráulico 27 se acciona después el mecanismo de giro o el mecanismo de elevación.

En la figura 5 se ha representado a continuación con más detalle el modelo físico, mediante el cual se describe la dinámica del cable de carga 3 y de la carga. El sistema formado por cable de carga y cable se contempla con ello como un péndulo elástico amortiguado, con una constante elástica C y una constante de amortiguación D. En la constante elástica C se incluye con ello la longitud del cable de elevación L, la cual se determina con base en valores de medición o se calcula a causa de la activación del gato. Asimismo se incluye en la activación la masa M, la cual se mide a través de un sensor de masa de carga.

A continuación se representa ahora con más detalle un ejemplo de ejecución de un procedimiento para activar los respectivos mecanismos.

40 1 Introducción

En el ejemplo de ejecución representado en la figura 1 se trata de una grúa móvil de puerto. Aquí se ponen en movimiento la pluma, la torre y el gato mediante accionamientos correspondientes. Los accionamientos hidráulicos que ponen en movimiento la pluma, la torre y el gato de la grúa generan, a causa de la dinámica propia de los sistemas hidráulicos, oscilaciones naturales. Las oscilaciones de fuerza que se producen influyen en la fatiga a largo plazo del cilindro y de los cables y, de este modo, reducen la vida útil de toda la estructura de la grúa, lo que conduce a un mayor mantenimiento. Conforme a la invención está prevista una ley de control que suprima las oscilaciones naturales provocadas por los movimientos de plegado, giro y elevación de la grúa y, por medio de esto, reduzca los ciclos de esfuerzo dentro del diagrama de Wöhler. Una reducción de los ciclos de esfuerzo aumenta lógicamente la vida útil de la estructura de la grúa.

A la hora de deducir la ley de control deben evitarse realimentaciones, ya que éstas necesitan señales sensoriales que dentro de aplicaciones industriales deben cumplir determinados requisitos de seguridad y a causa de ello conducen a unos mayores costes.

Por ello es necesario el diseño de un control previo puro sin realimentaciones. Dentro de este ámbito se deduce un control previo basado en planeidad, el cual invierte la dinámica del sistema, para los mecanismos de plegado, giro y elevación.

2 Mecanismo de plegado

- 5 La pluma de la grúa se pone en movimiento mediante un cilindro de plegado hidráulico, como se ha representado en la figura 1. El modelo dinámico y la ley de control para el cilindro de plegado se deducen en el siguiente apartado.

2.1 Modelo dinámico

Un modelo dinámico de la pluma accionada hidráulicamente de la grúa se deduce a continuación. La pluma se ha representado esquemáticamente junto con el cilindro hidráulico en la figura 2. El movimiento de la pluma se describe

- 10 mediante el ángulo de plegado φ_a y la velocidad angular $\dot{\varphi}_a$. El movimiento del cilindro hidráulico se describe mediante la posición de cilindro z_c , que se define como la distancia entre la unión del cilindro a la torre y la unión del cilindro a la pluma, y la velocidad del cilindro \dot{z}_c . Las dependencias geométricas entre el movimiento de la pluma y el cilindro se obtienen de las constantes geométricas d_a , d_b , α_1 y α_2 , así como de la ley del coseno. Para la posición del cilindro se aplica:

$$15 \quad z_c(\varphi_a) = \sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2d_a d_b \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_2 - \alpha_1 - \varphi_a\right)} \quad (1)$$

y para la velocidad del cilindro

$$\dot{z}_c(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) = \frac{\partial z_c(\varphi_a)}{\partial \varphi_a} \frac{\partial \varphi_a}{\partial t} = -d_a d_b \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_2 - \alpha_1 - \varphi_a\right) \frac{\dot{\varphi}_a}{z_c(\varphi_a)} \quad (2)$$

Debido a que el ángulo geométrico α_1 es pequeño, se desprecia a la hora de deducir el modelo dinámico. El procedimiento de Newton-Euler nos da la ecuación de movimiento para la pluma:

$$20 \quad J_b \ddot{\varphi}_a = (F_c + d_c \dot{z}_c(\varphi_a, \dot{\varphi}_a)) d_b \cos(\gamma) - m_b g s_b \cos(\varphi_a), \quad \varphi_a(0) = \varphi_{a0}, \dot{\varphi}_a(0) = 0 \quad (3)$$

en donde J_b y m_b designan el momento de inercia o la masa de la pluma, S_b es la distancia entre la unión de la pluma a la torre y el centro de gravedad de masas de la pluma, g es la constante de gravitación y F_c y d_c designan la fuerza del cilindro o los coeficientes de amortiguación del cilindro. Se supone que en el extremo de la pluma no está aplicada ninguna carga útil. El término $\cos(\gamma)$ en (3) se obtiene de la ley del seno:

$$25 \quad \cos(\gamma) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = \frac{d_a}{z_c(\varphi_a)} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_2 - \varphi_a\right) \quad (4)$$

en donde α_1 puede despreciarse.

El circuito hidráulico del cilindro de plegado se compone en principio de una bomba de desplazamiento variable y del propio cilindro hidráulico, como se ha representado en la figura 3. Para la fuerza del cilindro se aplica:

$$F_c = p_2 A_2 - p_1 A_1 \quad (5)$$

en donde A_1 y A_2 designan las superficies efectivas en cada cámara. Las presiones p_1 y p_2 se describen mediante la ecuación de establecimiento de presión, bajo la premisa de que no se produce ninguna fuga interior ni exterior. De este modo se aplica:

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{\beta V_1(z_c)}(q_l - A_1 \dot{z}_c), \quad p_1(0) = p_{10} \quad (6)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{1}{\beta V_2(z_c)}(-q_l + A_2 \dot{z}_c), \quad p_2(0) = p_{20} \quad (7)$$

5 en donde β es la compresibilidad del aceite y los volúmenes de cámara se obtienen mediante

$$V_1(z_c) = V_{\min} + A_1(z_c(\varphi_a) - z_{c,\min}) \quad (8)$$

$$V_2(z_c) = V_{\min} + V_{2,\max} - A_2(z_c(\varphi_a) - z_{c,\min}) \quad (9)$$

en donde V_{\min} designa el volumen mínimo en cada cámara y $V_{2,\max}$ y $z_{c,\min}$ son el volumen máximo en la segunda cámara, respectivamente la posición de cilindro mínima que se alcanza cuando $\varphi_a = \varphi_{a,\max}$. El caudal de aceite q_l se prefija mediante el ángulo de bomba y viene dado por:

$$q_l = K_l u_l \quad (10)$$

10

en donde u_l y K_l son la corriente de activación para el ángulo de bomba y el factor de proporcionalidad.

2.2 Ley de control

15 El control previo basado en planeidad conforme a la invención aprovecha la planeidad diferencial del sistema, para invertir la dinámica del sistema. Para deducir una ley de control de este tipo es necesario transformar el modelo dinámico deducido en el apartado 2.1 en el espacio de estado. Mediante la implantación del vector de estado $\mathbf{x} = [\varphi_a, \dot{\varphi}_a, F_c]^T$ puede describirse el modelo dinámico (3), (5), (6) y (7) como sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, que viene dado por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u, \quad y = h(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad t \geq 0 \quad (11)$$

en donde

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{(x_3 + d_c \dot{z}_c) d_b \cos(\gamma) - m_b g s_b \cos(x_1)}{J_b} \\ \left(\frac{A_2^2}{\beta V_2(z_c)} + \frac{A_1^2}{\beta V_1(z_c)} \right) \dot{z}_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{K_f A_2}{\beta V_2(z_c)} - \frac{K_f A_1}{\beta V_1(z_c)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$h(\mathbf{x}) = x_1 \quad (14)$$

y $z_c = z_c(x_1)$, $\dot{z}_c = \dot{z}_c(x_1, x_2)$, $\gamma = \gamma(x_1)$ y $u = u_i$.

- 5 Para el diseño de un control previo basado en planeidad, el grado relativo r con relación a la salida del sistema tiene que ser igual al orden n del sistema. Por ello se analiza a continuación el grado relativo del sistema contemplado (11). El grado relativo con relación a la salida del sistema se determina mediante las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} L_g L_f^i h(\mathbf{x}) &= 0 \quad \forall i = 0, \dots, r-2 \\ L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x}) &\neq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \quad (15)$$

Los operadores L_f y L_g representan las derivadas de Lie a lo largo de los campos vectoriales f o g . La utilización de (15) da como resultado $r = n = 3$, con lo que el sistema (11) con (12), (13) y (14) es plano y puede diseñarse un control previo basado en planeidad.

- 10 La salida del sistema (14) y sus derivadas en el tiempo se utilizan para invertir la dinámica del sistema. Las derivadas están formadas por las derivadas de Lie, con lo que se aplica:

$$y = h(\mathbf{x}) = x_1 \quad (16)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g h(\mathbf{x})}_{=0} u = x_2 \quad (17)$$

$$\ddot{\mathbf{y}} = \frac{\partial L_f h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f^2 h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g L_f h(\mathbf{x})}_{=0} u = f_2(\mathbf{x}) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{y}} &= \frac{\partial L_f^2 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f^3 h(\mathbf{x}) + L_g L_f^2 h(\mathbf{x}) u \\ &= \frac{x_2}{J_b} m_b g s_b \sin(x_1) - \frac{x_2}{J_b} (x_3 + d_c \dot{z}_c(x_1, x_2)) d_b \sin(\gamma(x_1)) \gamma'(x_1) \\ &\quad + \frac{x_2}{J_b} d_c d_b \cos(\gamma(x_1)) \frac{\partial \dot{z}_c(x_1, x_2)}{\partial x_1} + \frac{f_2(\mathbf{x})}{J_b} d_c d_b \cos(\gamma(x_1)) \frac{\partial \dot{z}_c(x_1, x_2)}{\partial x_2} \\ &\quad + \frac{f_3(\mathbf{x}) + g_3(\mathbf{x}) u}{J_b} d_b \cos(\gamma(x_1)) \end{aligned} \quad (19)$$

en donde $f_i(x)$ y $g_i(x)$ designan la fila i del campo vectorial $f(x)$ y $g(x)$, que se obtienen de (12) y (13). Los estados en función de la salida del sistema y sus derivadas se obtienen de (16), (17) y (18) y pueden escribirse como:

$$x_1 = y \quad (20)$$

$$x_2 = \dot{y} \quad (21)$$

$$x_3 = \frac{J_b \ddot{y} + m_b g s_b \cos(\gamma(y))}{d_b \cos(\gamma(y))} - d_c \dot{z}_c(y, \dot{y}) \quad (22)$$

- 5 la resolución de (19) según la entrada del sistema u produce, con la utilización de (20), (21) y (22), la ley de control para el control previo basado en planeidad para el cilindro de plegado

$$u_l = f(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{\ddot{y}}) \quad (23)$$

- 10 la cual invierte la dinámica del sistema. Las señales de referencia y así como las derivadas correspondientes se obtienen mediante una generación numérica de trayectoria, a partir de la señal de palanca manual del operador de grúa o de las señales de control de un sistema de automatización. Debido a que la corriente de activación u_i prefija la velocidad del cilindro (véase (10)), se planean las trayectorias originalmente en coordenadas cilíndricas para z_c , \dot{z}_c , \ddot{z}_c y $\ddot{\ddot{z}}_c$. A continuación se transforman las trayectorias así conseguidas en coordenadas φ_a y se calcula la corriente de activación real.

3 Mecanismo de giro

- 15 El movimiento de giro de la torre se realiza mediante un motor de rotación hidráulico. El modelo dinámico y la ley de control para el mecanismo de giro se deducen dentro del siguiente apartado.

3.1 Modelo dinámico

El movimiento de la torre alrededor del eje z (véase la figura 1) se describen a través del ángulo de giro φ_s y la velocidad angular $\dot{\varphi}_s$. La utilización del procedimiento de Newton-Euler produce la ecuación de movimiento para la torre accionada hidráulicamente:

$$(J_t + i_s^2 J_m) \ddot{\varphi}_s = i_s D_m \Delta p_s, \quad \varphi_s(0) = \varphi_{s0}, \quad \dot{\varphi}_s(0) = 0 \quad (24)$$

en donde J_t y J_m designan el momento de inercia de la torre y del motor, i_s la relación de transmisión del mecanismo de giro, Δp_s la diferencia de presión entre las cámaras de presión del motor y D_m el desplazamiento del motor hidráulico. El momento de inercia de la torre J_t comprende el momento de inercia de la propia torre, de la pluma, de la carga útil aplicada de la torre alrededor del eje z de la torre (véase la figura 1). El circuito hidráulico de mecanismo de giro se compone en principio de una bomba de desplazamiento variable y del propio motor hidráulico, como se ha representado en la figura 4. La diferencia de presión entre ambas cámaras de presión del motor se describe mediante la ecuación de establecimiento de presión, bajo la premisa de que no se produce ninguna fuga interna ni externa. Además de esto se desprecia a continuación la pequeña variación de volumen a causa del ángulo de motor φ_m . De este modo se considera constante el volumen en ambas cámaras de presión y se designa con V_m . Con ayuda de esta premisa puede escribirse la ecuación de establecimiento de presión como

$$\Delta \dot{p}_s = \frac{4}{V_m \beta} (q_s - D_m i_s \dot{\varphi}_s), \quad \Delta p_s(0) = \Delta p_{s0} \quad (25)$$

en donde β es la compresibilidad del aceite. El caudal de aceite q_s se prefija mediante el ángulo de bomba y viene dado por:

$$q_s = K_s u_s \quad (26)$$

en donde u_s y K_s son la corriente de activación del ángulo de bomba y el factor de proporcionalidad.

3.2 Ley de control

A continuación se transforma el modelo dinámico para el mecanismo de giro en el espacio de estado y se diseña un control previo basado en planeidad. El vector de estado para el mecanismo de giro se define como $\mathbf{x} = [\varphi_s, \dot{\varphi}_s, \Delta p_s]^T$. Con ayuda del vector de estado puede describirse el modelo formado por (24), (25) y (26) como sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, que viene dado por (11) con:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{i_s D_m x_3}{J_r + i_s^2 J_m} \\ \frac{-4D_m i_s x_2}{V_m \beta} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4K_s}{V_m \beta} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$h(\mathbf{x}) = x_1 \quad (29)$$

y $u = u_s$.

A su vez el grado relativo r con relación a la salida del sistema debe ser igual al orden n del sistema. La utilización de (15) produce $r = n = 3$, con lo que el sistema (11) es plano con (27), (28) y (29) y puede formularse un control previo basado en planeidad.

5

La salida del sistema (29) y sus derivadas en el tiempo se utilizan para invertir la dinámica del sistema. Las derivadas vienen dadas por las derivadas de Lie, es decir

$$y = h(\mathbf{x}) = x_1 \quad (30)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g h(\mathbf{x}) u}_{=0} = x_2 \quad (31)$$

$$\ddot{y} = \frac{\partial L_f h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f^2 h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g L_f h(\mathbf{x}) u}_{=0} = \frac{i_s D_m x_3}{J_r + i_s^2 J_m} \quad (32)$$

$$\ddot{\ddot{y}} = \frac{\partial L_f^2 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_f^3 h(\mathbf{x}) + L_g L_f^2 h(\mathbf{x}) u = \frac{-4D_m i_s x_2}{V_m \beta} + \frac{4K_s}{V_m \beta} u \quad (33)$$

Los estados en función de la salida del sistema y de sus derivadas se obtienen de (30), (31) y (32) y pueden escribirse como:

$$x_1 = y \tag{34}$$

$$x_2 = \dot{y} \tag{35}$$

$$x_3 = \frac{J_l + i_s^2 J_m}{i_s D_m} \ddot{y} \tag{36}$$

5 La resolución de (33) según la entrada del sistema u produce, con la utilización de (34), (35) y (36), la ley de control para el control previo basado en planeidad para el mecanismo de giro

$$u_s = f(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{\ddot{y}}) \tag{37}$$

el cual invierte la dinámica del sistema. La señal de referencia y así como sus derivadas se obtienen, mediante una generación de trayectoria numérica, a partir de la señal de palanca manual del operador de grúa.

4 Gato

10 El gato de la grúa se acciona mediante un motor de rotación accionado hidráulicamente. El modelo dinámico y la ley de control para el gato se deducen en el siguiente apartado.

4.1 Modelo dinámico

15 Debido a que la fuerza de elevación está influenciada directamente por el movimiento de la carga útil, es necesario tener en cuenta la dinámica del movimiento de la carga útil. Como se ha representado en la figura 1, la carga útil con la masa m_p está aplicada a un gancho y puede elevarse o bajarse mediante la grúa, por medio de un cable de longitud l_r . El cable se invierte mediante un rodillo de inversión en la punta de la pluma y sobre la torre. Sin embargo, el cable no se desvía directamente desde el extremo de la pluma hasta el gato, sino desde el extremo de la pluma hasta la torre, desde allí de vuelta al extremo de la pluma y después, a través de la torre, hasta el gato (véase la figura 1). De este modo se obtiene toda la longitud del cable mediante:

$$20 \quad l_r = l_1 + 3l_2 + l_3 \tag{38}$$

en donde l_1 , l_2 e l_3 designan las longitudes parciales entre el gato y la torre, la torre y el extremo de la pluma y el extremo de la pluma y el gancho. El sistema de elevación de la grúa, que se compone del gato, del cable y de la carga útil, se contempla a continuación como el sistema amortiguador de masa elástica y se ha representado en la figura 5. La utilización del procedimiento de Newton-Euler produce la ecuación de movimiento para la carga útil:

$$m_p \ddot{z}_p = m_p g - \underbrace{\left(c(z_p - r_w \varphi_w) + d(\dot{z}_p - r_w \dot{\varphi}_w) \right)}_{F_s}, \quad z_p(0) = z_{p0}, \dot{z}_p(0) = 0 \tag{39}$$

25

con la constante de gravitación g , la constante elástica c , la constante de amortiguación d , el radio del gato r_w , el ángulo φ_w , el gato, la velocidad angular $\dot{\varphi}_w$, la posición de carga útil z_p , la velocidad de carga útil \dot{z}_p y la aceleración de carga útil \ddot{z}_p . La longitud de cable l_r viene dada por

$$l_r(t) = r_w \varphi_w(t) \quad (40)$$

5 con

$$\varphi_w(0) = \varphi_{w0} = \frac{l_1(0) + 3l_2(0) + l_3(0)}{r_w} \quad (41)$$

La constante elástica c_r de un cable de longitud l_r viene dada por la ley de Hooke y puede escribirse como

$$c_r = \frac{E_r A_r}{l_r} \quad (42)$$

10 en donde E_r y A_r designan el módulo de elasticidad y la superficie de corte del cable. La grúa tiene n_r cables paralelos (véase la figura 1), con lo que la constante elástica del mecanismo de elevación de la grúa viene dada por:

$$c = n_r c_r \quad (43)$$

La constante de amortiguación d puede indicarse con ayuda de la magnitud de amortiguación de Lehrschen D

$$d = 2D\sqrt{cm_p} \quad (44)$$

15 La ecuación diferencial para el movimiento giratorio del gato se obtiene según el procedimiento de Newton-Euler como

$$(J_w + i_w^2 J_m) \ddot{\varphi}_w = i_w D_m \Delta p_w + r_w F_s, \quad \varphi_w(0) = \varphi_{w0}, \quad \dot{\varphi}_w(0) = 0 \quad (45)$$

20 En donde J_w y J_m designan el momento de inercia del gato o del motor, i_w es la relación de transmisión entre el motor y el gato, Δp_w es la diferencia de presión entre cámara de alta y baja presión del motor, D_m es el desplazamiento del motor hidráulico y F_s es la fuerza elástica dada en (39). La condición inicial φ_{w0} para el ángulo del gato viene dada por (41). El circuito hidráulico para el gato es básicamente el mismo que para el mecanismo de giro y se ha representado en la figura 4. La diferencia de presión Δp_w puede describirse de este modo análogamente al mecanismo de giro (véase (25)) como

$$\Delta \dot{p}_w = \frac{4}{V_m \beta} (q_w - D_m i_w \dot{\varphi}_w), \quad \Delta p_w(0) = \Delta p_{w0} \quad (46)$$

El caudal de aceite q_w se controla mediante el ángulo de bomba y viene dado por

$$q_w = K_w u_w \quad (47)$$

en donde u_w y K_w son la corriente de activación del ángulo de bomba y el factor de proporcionalidad.

4.2 Ley de control

5 A continuación se transforma el modelo dinámico para el gato en el espacio de estado, para diseñar un control previo basado en planeidad. La deducción de la ley de control desprecia la amortiguación, por lo que $D = 0$. El vector de estado del gato de la grúa se define como $\mathbf{x} = [\varphi_w, \dot{\varphi}_w, Z_p, \dot{Z}_p, \Delta p_w]^T$. De este modo el modelo dinámico formado por (39), (40), (43), (45), (46) y (47) puede escribirse como sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, que se obtiene de (11), con

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{J_w + i_w^2 J_m} \left(i_w D_m x_5 + r_w \left(\frac{E_r A_r n_r}{r_w x_1} (x_3 - r_w x_1) \right) \right) \\ x_4 \\ g - \frac{E_r A_r n_r}{r_w x_1 m_p} (x_3 - r_w x_1) \\ \frac{-4 D_m i_w x_2}{V_m \beta} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{4 K_w}{V_m \beta} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$10 \quad h(\mathbf{x}) = x_3 \quad (50)$$

y $u = u_w$.

A su vez, el grado relativo con relación a la salida del sistema debe ser igual al orden n del sistema. La utilización de (15) produce $r = n = 5$, con lo que el sistema (11) con (48), (49) y (50) es plano y puede diseñarse un control previo basado en planeidad para $D = 0$.

15 La salida del sistema (50) y sus derivadas en el tiempo se usan para invertir la dinámica del sistema, como se ha hecho para el mecanismo de plegado y el de giro.

Las derivadas vienen dadas por las derivadas de Lie, es decir

$$y = h(\mathbf{x}) \quad (51)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_r h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g h(\mathbf{x})}_{=0} u \quad (52)$$

$$\ddot{y} = \frac{\partial L_r h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_r^2 h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g L_r h(\mathbf{x})}_{=0} u \quad (53)$$

$$\dddot{y} = \frac{\partial L_r^2 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_r^3 h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g L_r^2 h(\mathbf{x})}_{=0} u \quad (54)$$

$${}^{(4)}y = \frac{\partial L_r^3 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_r^4 h(\mathbf{x}) + \underbrace{L_g L_r^3 h(\mathbf{x})}_{=0} u \quad (55)$$

$${}^{(5)}y = \frac{\partial L_r^4 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = L_r^5 h(\mathbf{x}) + L_g L_r^4 h(\mathbf{x}) u \quad (56)$$

Los estados en función de la salida del sistema y sus derivadas se obtienen de (51), (52), (53), (54) y (55) y pueden escribirse como:

$$x_1 = \frac{A_r E_r n_r y}{r_w (g m_p + A_r E_r n_r - m_p \ddot{y})} \quad (57)$$

$$x_2 = x_2(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{y}) \quad (58)$$

$$x_3 = y \quad (59)$$

$$x_4 = \ddot{y} \quad (60)$$

$$x_5 = x_5 \left(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{y}, y^{(4)} \right) \quad (61)$$

La resolución de (56) según la entrada del sistema u produce, con la utilización de (57), (58), (59), (60) y (61), la ley de control para el control previo basado en planeidad para el mecanismo de elevación.

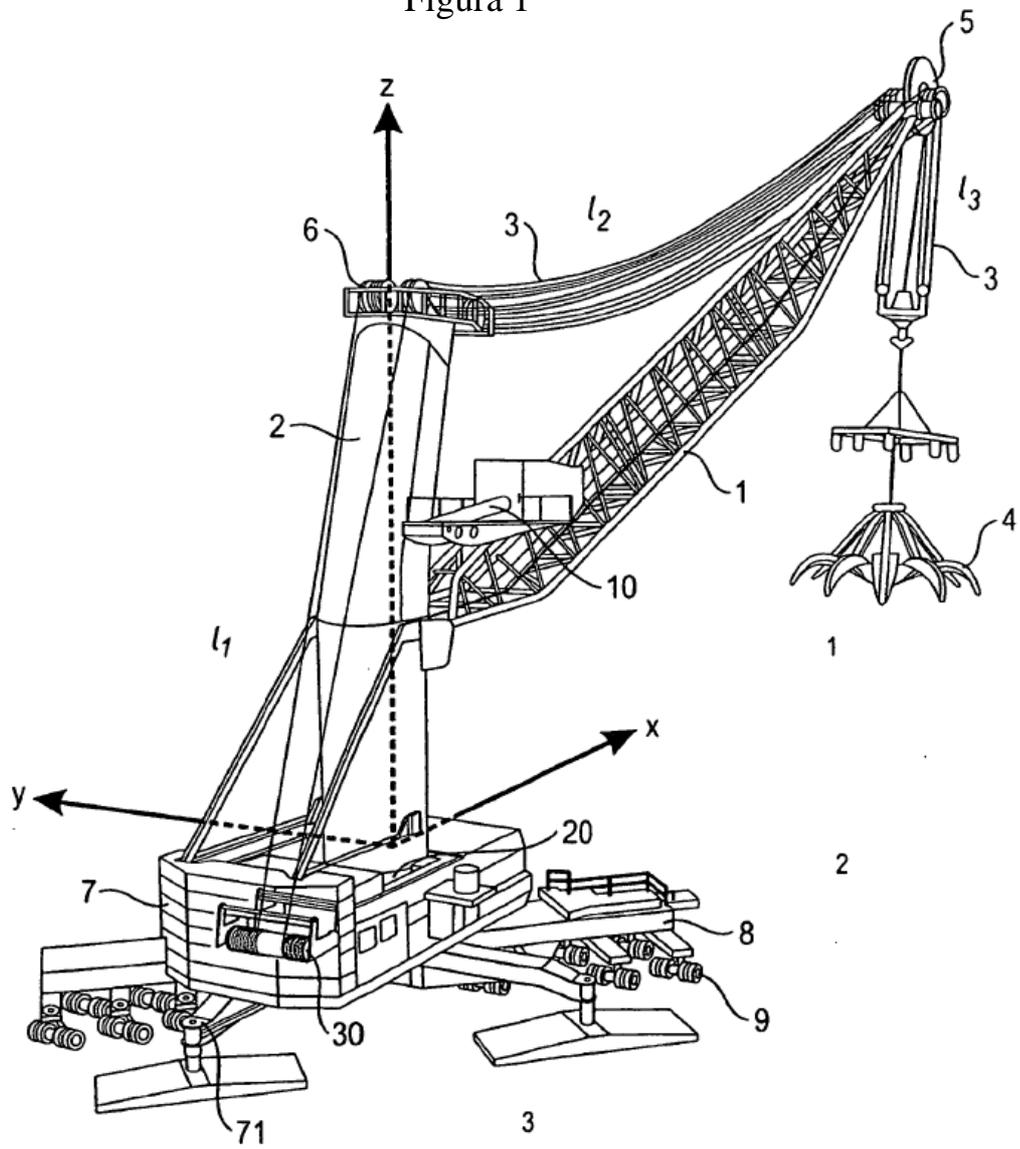
$$u_w = f \left(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{y}, y^{(4)}, y^{(5)} \right) \quad (62)$$

- 5 que invierte la dinámica del sistema. La señal de referencia y así como sus derivadas se obtienen mediante una generación numérica de trayectoria, a partir de la señal de palanca manual del operador de grúa.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para activar un accionamiento de una grúa, en especial de un mecanismo de giro y/o de un mecanismo de basculamiento, en donde un movimiento nominal de la punta de pluma se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento, caracterizado porque para el cálculo de la magnitud de control se tiene en cuenta la dinámica de oscilación del sistema formado por accionamiento y estructura de la grúa, para reducir oscilaciones naturales.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en donde la activación del accionamiento se realiza con base en un modelo físico, el cual describe el movimiento de la punta de grúa en función de la magnitud de control, y en donde ventajosamente el modelo no es lineal.
- 10 3. Procedimiento según la reivindicación 2, en donde la activación del accionamiento se realiza con base en una inversión del modelo.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde en el caso del accionamiento se trata de un accionamiento hidráulico y el modelo tiene en cuenta la dinámica de oscilación del accionamiento, con base en la compresibilidad del fluido hidráulico.
- 15 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores para activar el cilindro de plegado utilizado como mecanismo de plegado, en donde la cinemática de la articulación del cilindro así como la masa y el momento de inercia de la pluma de la grúa se incluyen en el cálculo de la magnitud de control.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores para activar el mecanismo de giro, en donde el momento de inercia de la pluma de la grúa se incluye en el modelo.
- 20 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde la amortiguación de oscilaciones se realiza en el curso del control previo, en donde de forma ventajosa se usan la posición, la velocidad, la aceleración y/o la sacudida de la punta de pluma como magnitudes nominales del control previo.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde se genera, a partir de datos introducidos por un operador y/o un sistema de automatización, una trayectoria nominal de la punta de pluma como magnitud de entrada de la unidad de control.
- 25 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde posibles oscilaciones pendulares esféricas de la carga no se incluyen como magnitud de medición en la activación, y/o en donde no se tienen en cuenta posibles oscilaciones pendulares esféricas de la carga durante la activación del accionamiento.
- 30 10. Procedimiento para activar un mecanismo de elevación de una grúa, en donde un movimiento de elevación nominal de la carga se usa como magnitud de entrada, sobre cuya base se calcula una magnitud de control para activar el accionamiento, caracterizado porque para el cálculo de la magnitud de control se tiene en cuenta la dinámica de oscilación del sistema formado por mecanismo de elevación, cable y carga en la dirección del cable, para reducir oscilaciones naturales.
- 35 11. Procedimiento según la reivindicación 10, en donde para el cálculo de la magnitud de control se tiene en cuenta la dinámica de oscilación a causa de la extensibilidad del cable de elevación.
12. Procedimiento según la reivindicación 10 u 11, en donde el mecanismo de elevación se acciona hidráulicamente y, a la hora de calcular la magnitud de control, se tiene en cuenta la dinámica de oscilación a causa de la compresibilidad del fluido hidráulico.
- 40 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 12, en donde se incluyen la longitud de cable variable del cable de elevación y/o el peso de la carga suspendida del cable de carga en el cálculo de la magnitud de control.
14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 13, en donde la activación del mecanismo de elevación se basa en un modelo físico de la grúa, el cual describe el movimiento de elevación de la carga en función de la magnitud de control del mecanismo de elevación, en donde ventajosamente la activación del mecanismo de elevación se basa en la inversión del modelo físico.
- 45 15. Grúa o unidad de control de grúa con una unidad de control, la cual presenta un programa de control a través del cual se implementa un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 14.

Figura 1



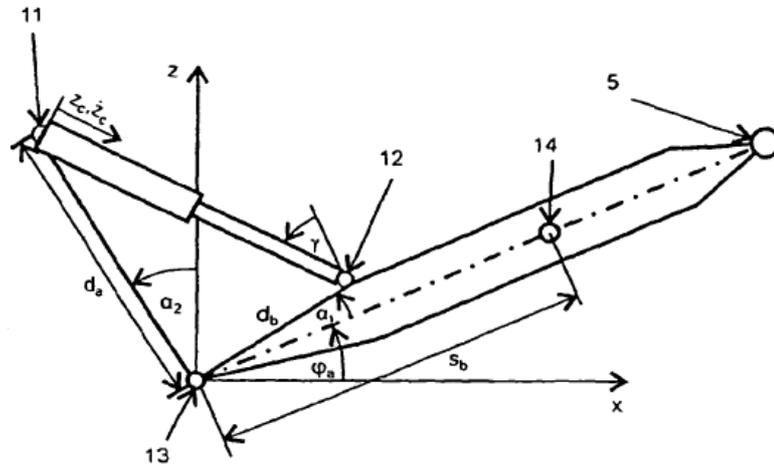


Figura 2

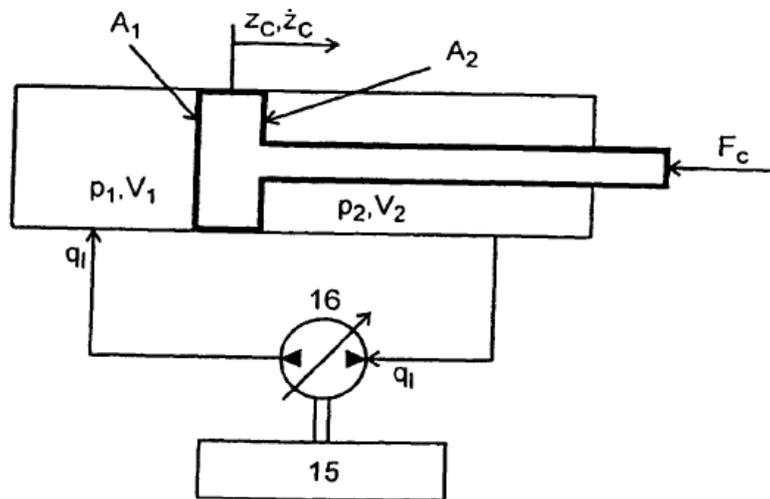


Figura 3

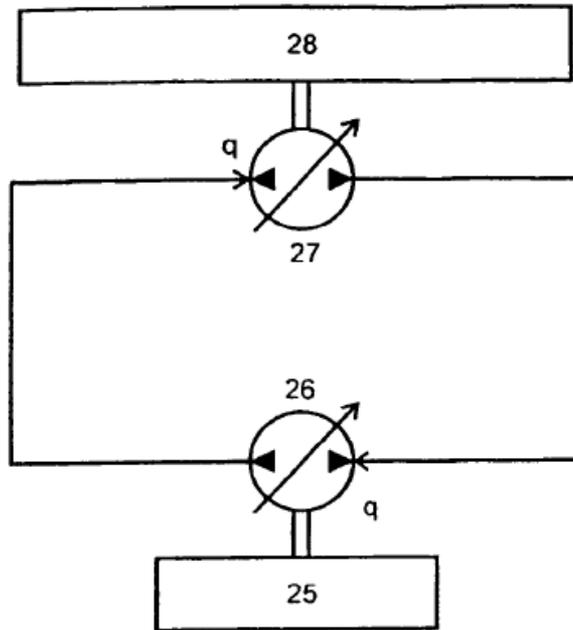


Figura 4

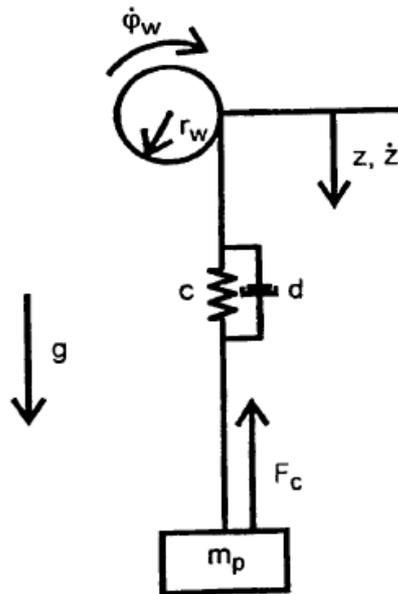


Figura 5