

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 608 403**

51 Int. Cl.:

**B66C 13/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.04.2007 E 07007445 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.09.2016 EP 1880971**

54 Título: **Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa**

30 Prioridad:

**18.07.2006 DE 102006033277**

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

**10.04.2017**

73 Titular/es:

**LIEBHERR-WERK NENZING GMBH (100.0%)  
Dr.-Hans-Liebherr-Strasse 1  
6710 Nenzing, AT**

72 Inventor/es:

**NEUPERT, JÖRG;  
SAWODNY, OLIVER, PROF. DR.-ING. y  
SCHNEIDER, KLAUS, DR. DIPL.-ING.**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 608 403 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 controlar la orientación de una carga de grúa

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa, en el que un manipulador para manipular una carga está unido mediante un dispositivo rotador con un gancho suspendido de cuerdas y el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga se controla mediante un dispositivo de control usando el momento de inercia  $J_L$  de la carga como parámetro más importante.

10 En el documento DE 100 64 182 y el documento DE 103 24 692, cuyo contenido completo se recoge por mención en la presente solicitud, se divulgan conceptos de control y automatización para grúas móviles de puerto. En estas grúas de ménsula articulada el manipulador para alojar la carga la suspende de cuerdas, y un posicionamiento del manipulador para alojar contenedores provoca movimientos de péndulo. Los conceptos de control usan un control de seguimiento de trayectoria para controlar el movimiento de la carga y para evitar automáticamente el movimiento pendular, por lo que se mejora la efectividad del proceso de transbordo de mercancía en pequeña velocidad.

15 Para sistemas de control de este tipo se conoce un procedimiento para controlar la orientación de la carga de grúa por el documento DE 100 29 579, cuyo contenido completo se recoge por mención en la presente invención. Allí el gancho suspendido de cuerdas presenta un dispositivo rotador que contiene un accionamiento hidráulico, de modo que el manipulador para alojar contenedores se puede girar alrededor de un eje vertical. Por ello es posible cambiar la orientación de las cargas de grúa. Cuando el gruista o el control automático da una señal para girar el manipulador y por ello la carga alrededor del eje vertical, se accionan los motores hidráulicos del dispositivo rotador y una circulación resultante provoca un par de fuerzas. Cuando el gancho está suspendido de cuerdas, el par de fuerzas llevaría a una oscilación torsional del manipulador y de la carga. Para posicionar la carga en un ángulo específico  $\varphi_L$  se debe compensar la oscilación torsional.

25 El procedimiento de control conocido usa un modelo dinámico del sistema basándose en las ecuaciones de movimiento de un modelo físico de la grúa, estando compuesto el control de oscilación anti-torsional por un módulo de planificación de trayectoria y un módulo de seguimiento de trayectoria. El módulo de planificación de trayectoria calcula la trayectoria de las variables, que describen el estado del sistema, y genera una función de referencia. El control de seguimiento de trayectoria puede dividirse en supresión de perturbación, regulación con una magnitud de ajuste auxiliar (denominada *Feed Forward Control*) y regulación con retroalimentación de estado (denominada *State Feed back Control*). Los parámetros usados por el dispositivo de regulación son la masa de la carga y sobre todo el momento de inercia de la carga.

30 Sin embargo, no se conoce la distribución de masa en la carga, por ejemplo, un contenedor, y por lo tanto tampoco se conoce el momento de inercia de la carga. Por lo tanto el momento de inercia  $J_L$  de la carga debe estimarse. En el sistema de control conocido esto tiene lugar al suponer una distribución de masa homogénea en la carga y al calcular un momento de inercia estimado  $J_L$  de la carga solo a partir de la masa del contenedor y las dimensiones conocidas del contenedor.

35 La distribución de carga en un contenedor, en la mayoría de los casos, es todo lo contrario a homogénea, de modo que el valor estimado de la carga  $J_L$  solo es una aproximación muy imprecisa. Ya que el dispositivo de control usa el momento de inercia  $J_L$  de la carga como parámetro para controlar la orientación de una carga de grúa, la diferencia entre el valor real del momento de inercia  $J_L$  y la estimación aproximada lleva a una imprecisión en el control de la orientación de la carga.

40 Por el documento DE 199 07 989 A1 se conoce un procedimiento para el control de trayectoria de grúas, así como un dispositivo para el procedimiento exacto de trayectoria de una carga. Para la regulación de trayectoria se recurre así mismo al momento de inercia de la carga.

El objetivo de la presente invención consiste por lo tanto en facilitar un procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa, que presente una mejor precisión.

45 Este objetivo se realiza mediante un procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, en el que el dispositivo de control para controlar el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga es un dispositivo de control adaptivo, determinándose el momento de inercia  $J_L$  de la carga durante el funcionamiento de la grúa por medio de datos, que se obtienen mediante medición del estado del sistema.

50 De esta manera, el momento de inercia  $J_L$  de la carga se puede determinar, lo que lleva a una mejor precisión en este parámetro importante, que se usa por el dispositivo de control para controlar la orientación de una carga de grúa. El dispositivo de control se adapta como parámetro durante el funcionamiento de la grúa usando un valor corregido del momento de inercia  $J_L$ , que durante el funcionamiento de la grúa se determina por medio de los datos obtenidos mediante medición del estado del sistema. Por lo tanto el dispositivo de control no usa un valor fijo estimado de una

vez, sino un valor, que se ajusta con ayuda de otras informaciones obtenidas durante el funcionamiento de la grúa.

5 En el procedimiento de acuerdo con la invención para controlar el giro de la grúa, el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la grúa se controla ventajosamente con ayuda de un control de seguimiento de trayectoria adaptivo. Esto permite un control eficaz de los movimientos de la carga de grúa. Por ejemplo, se puede usar una regulación con magnitud de ajuste auxiliar para calcular las trayectorias de las variables del sistema por medio de integración vertical de las ecuaciones de movimiento del sistema, y una regulación de la retroalimentación de estado puede usar datos obtenidos mediante medición del estado del sistema.

10 En el procedimiento de acuerdo con la invención para controlar el giro de una carga de grúa se usa ventajosamente un modelo dinámico del sistema para calcular datos, que describen el estado del sistema, es decir, de las trayectorias de las variables del sistema. Estos datos entonces pueden formar la base para controlar el giro de la carga de grúa, permitiendo el modelo dinámico del sistema una descripción exacta del sistema y, por lo tanto, un control preciso de la orientación de la carga de grúa.

15 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de la carga de grúa se puede cambiar la diferencia  $\varphi_C$  entre el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho mediante un dispositivo rotador. Esto tiene lugar ventajosamente usando un motor hidráulico para el dispositivo rotador, de modo que mediante el dispositivo rotador se puede aplicar par de fuerzas. Esto hace posible un giro del manipulador y con ello de la carga alrededor de un eje vertical, por lo que se permite una orientación de la carga en cualquier dirección deseada.

20 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de la carga de grúa se evitan oscilaciones torsionales mediante un dispositivo de oscilación anti-torsional usando los datos calculados del modelo dinámico. Este dispositivo de oscilación anti-torsional emplea los datos calculados del modelo dinámico para controlar un dispositivo rotador de tal manera que se evitan oscilaciones de la carga. Por ello el dispositivo de oscilación anti-torsional puede generar señales de control, que contrarrestan las posibles oscilaciones de la carga predichas por el modelo dinámico. Cuando se usa un motor hidráulico para el rotador, el dispositivo de oscilación anti-torsional puede generar señales para accionar el motor hidráulico, por lo que se aplica un par de fuerzas generado por el paso.

25 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de la carga de grúa se mide la diferencia  $\varphi_C$  entre el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho mediante un sensor de valores medidos unido con el dispositivo rotador. Este sensor de valores medidos hace posible la medición exacta de la diferencia  $\varphi_C$  y por tanto contribuye a controlar la orientación de la carga de grúa.

30 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de la carga de grúa se miden los movimientos de un elemento cardán conducido por la cuerda, para obtener datos, por los que se pueden determinar el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga. El elemento cardán está unido preferentemente mediante una unión cardán con la cabeza de pluma de la grúa y sigue los movimientos de la cuerda, por la que se conduce por roldanas. Midiendo el movimiento del elemento cardán se pueden determinar los movimientos de la cuerda. Ya que el gancho cuelga de varias cuerdas, se prevén preferentemente al menos dos elementos cardán, para determinar el movimiento de al menos dos de estas cuerdas. El ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho suspendido de las cuerdas y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga pueden entonces averiguarse de los datos medidos de los movimientos de los elementos cardán.

35 En el procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se usa un giroscopio, para obtener datos, mediante los que se pueden determinar el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga. El uso de un giroscopio es una posibilidad especialmente efectiva para obtener estos datos con precisión suficiente. El giroscopio se puede colocar en distintos sitios de la grúa. Cuando se usan elementos cardán, el giroscopio se puede colocar en los elementos cardán, para medir sus movimientos, pero también es posible, colocar el giroscopio directamente en el gancho o en el manipulador.

40 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se mide la variación  $\dot{\varphi}_H$  del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o la variación  $\dot{\varphi}_L$ , del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga mediante un giroscopio. El giroscopio se puede colocar o bien en el gancho o bien en el manipulador, pero preferentemente en el gancho. Los giroscopios pueden medir las velocidades angulares  $\dot{\varphi}_H$  y  $\dot{\varphi}_L$ , lo que hace posible  
 45 determinar el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y de  $\varphi_L$ . Cuando  $\dot{\varphi}_H$  se mide por el giroscopio,  $\varphi_H$  se puede determinar mediante integración. El ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga entonces se puede calcular usando la diferencia  $\varphi_C$  entre el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho medido por el sensor de valores medidos. Ya que el valor medido de  $\dot{\varphi}_H$  por el giroscopio contiene ruido y un offset, una integración directa llevaría a una suma de estos errores, lo que llevaría a malos resultados en cuanto a la precisión. Por ello se usa ventajosamente un observador de

perturbación para la compensación del offset. Esto permite una estimación más estable del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la velocidad angular  $\varphi_H$ .

5 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa el modelo dinámico del sistema se basa en ecuaciones de movimiento de un modelo físico de al menos las cuerdas, el gancho y la carga. En un modelo físico de este tipo el gancho y la carga, suspendidos de las cuerdas, forman un péndulo torsional, cuyas ecuaciones de movimiento se pueden determinar con ayuda por ejemplo del formalismo de Lagrange. Esto hace posible una descripción realista del sistema y por ello una planificación y un control de trayectoria precisos.

10 Ventajosamente el momento de inercia  $J_H$  del gancho y  $J_{Sp}$  del manipulador se usan como parámetros para el control del ángulo de giro  $\varphi_L$ . También cuando el momento de inercia  $J_H$  del gancho y  $J_{Sp}$  del manipulador generalmente es más pequeño que el elemento de inercia  $J_L$  de la carga, a pesar de ello contribuyen al comportamiento de giro del sistema y deberían tenerse en cuenta en los cálculos y en el modelo físico.

15 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa durante el funcionamiento de la grúa se aplica un par de fuerzas en la carga y/o en el gancho. Los datos obtenidos mediante medición del estado del sistema durante el accionamiento de un par de fuerzas en el gancho y/o de la carga permiten la estimación del momento de inercia  $J_L$  de la carga, por ejemplo, utilizando un observador.

20 Los datos obtenidos mediante medición del estado del sistema ventajosamente comprenden al menos la variación de  $\varphi_H$  del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o la variación de  $\dot{\varphi}_H$ , del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga como reacción al par de fuerzas aplicado en la carga y/o en el gancho. Estos datos entonces se pueden usar para la estimación del momento de inercia  $J_L$  de la carga, por ejemplo, comparando los datos calculados por el modelo dinámico con los datos medidos.

25 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se usa un valor del momento de inercia  $J_{L0}$ , que solo se estima basándose en la masa y las dimensiones de la carga, como valor inicial  $J_L$ , y se determinan valores corregidos  $J_{Lk}$  en un proceso iterativo, para determinar el momento de inercia  $J_L$ . De esto resulta mediante los datos, que están rápidamente disponibles, una estimación aproximada del valor inicial  $J_L$  mientras que se determinan mejores estimaciones durante el funcionamiento de la grúa mediante otros datos, que se obtienen midiendo el estado del sistema.

30 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se calculan los datos que describen del estado del sistema durante el funcionamiento de la grúa por el modelo dinámico basado en un valor  $J_{Lk-1}$  del momento de inercia  $J_L$ , y se determina un valor corregido  $J_{Lk}$  del momento de inercia  $J_L$  mediante los datos calculados y por los datos obtenidos por la medición del estado del sistema, para determinar el momento de inercia  $J_L$ . Esto permite una estimación mucho mejor del momento de inercia  $J_L$  que solo el uso de la masa y de las dimensiones de la carga.

35 El momento de inercia  $J_L$  se determina de acuerdo con la invención con ayuda de un observador. Este procedimiento para la estimación del momento de inercia  $J_L$  usa datos calculados por el modelo dinámico y combina estos con datos, que se obtuvieron midiendo el estado del sistema, para estimar el parámetro  $J_L$  del modelo dinámico. Ya se conocía el uso de un observador para determinar variables del sistema, como, por ejemplo, del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho de la velocidad angular  $\varphi_H$  medida por el giroscopio. Sin embargo, a este respecto se determina un parámetro del modelo con ayuda de un observador, lo que lleva a un control adaptivo.

40 Cuando un parámetro del modelo se estima por el observador, el problema se convierte en no lineal, de modo que el momento de inercia  $J_L$  ventajosamente se determina con ayuda de un observador no lineal. Existen distintas posibilidades para implementar un observador no lineal, particularmente en modelos que varían en el tiempo, por ejemplo, un planteamiento *High-Gain* o un filtro de Kalman ampliado.

La última posibilidad ofrece un sistema muy estable para la estimación rápida de parámetros del sistema, de modo que el momento de inercia  $J_L$  ventajosamente se puede determinar con ayuda de un filtro de Kalman ampliado.

45 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se asume para la estimación de un valor inicial  $J_{L0}$  del momento de inercia  $J_L$  de la carga una distribución homogénea de la masa en la carga. Esto permite un cálculo rápido, que solo necesita la masa y las dimensiones de la carga como entrada.

50 En un perfeccionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención para controlar la orientación de una carga de grúa se tiene en cuenta ruido en los datos obtenidos por medición en la determinación del momento de inercia  $J_L$ . Esto lleva a más precisión en la estimación del momento de inercia  $J_L$ , que se sostiene en los datos medidos y por ello está influida por ruido en las mediciones.

Ventajosamente el ruido en los datos obtenidos por las mediciones se modela por matrices de covarianza. Esto permite una descripción cuantitativa de la influencia del ruido y puede minimizar los errores provocados por el ruido.

Estas matrices de covarianza se determinan ventajosamente de forma experimental. Sometiendo a prueba el sistema de control con distintos valores para las matrices de covarianza se pueden determinar los mejores valores para una estimación rápida y estable del momento de inercia  $J_L$  y se pueden usar para el observador.

La presente invención abarca además un sistema para controlar la orientación de una carga de grúa con ayuda de un procedimiento arriba descrito. Un sistema de control de este tipo comprende un dispositivo de control para controlar el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga. El dispositivo de control contiene un dispositivo de planificación de trayectoria y un dispositivo de control de trayectoria, así como un observador para estimar el momento de inercia  $J_L$ .

La presente invención abarca además una grúa, particularmente una grúa de pluma, que comprende además un sistema para controlar el giro de una carga de grúa con ayuda de un procedimiento anteriormente descrito. Una grúa de este tipo comprende un gancho suspendido de cuerdas, un dispositivo rotador y un manipulador. Ventajosamente la grúa comprende también un sistema anti-péndulo, que interactúa con el sistema para controlar el giro de una grúa. Cuando la grúa es una grúa de pluma, comprende una pluma, que está pivotada alrededor de un eje horizontal y se puede girar por la torre alrededor de un eje vertical. Además, se puede cambiar la longitud de la cuerda.

Ahora la presente invención se describe más en detalle por medio de los siguientes dibujos. En ellos muestran

- la figura 1a una vista lateral y una vista en planta de una grúa móvil de puerto,
- la figura 1b una vista lateral de una cabeza de pluma de la grúa móvil de puerto con un elemento cardán,
- la figura 2 la estructura de control de la grúa móvil de puerto,
- la figura 3 la estructura del control de oscilación anti-torsional,
- la figura 4 un dispositivo rotador suspendido de una cuerda con manipulador y carga,
- la figura 5 la estructura de un entorno de simulación,
- la figura 6 el rendimiento determinado del otro filtro de Kalman dependiente de la matriz de probabilidad  $P_0$ ,
- la figura 7 la determinación de  $J_L$  con valor inicial erróneo,
- la figura 8 la determinación de  $J_L$  con valor inicial correcto.

Las grúas de pluma a menudo se usan para realizar procesos de transbordo de mercancía en puertos. Una grúa móvil de puerto de este tipo se muestra en la figura 1 a. La grúa presenta una capacidad de carga de hasta 140 t y una longitud de cuerda de hasta 80 m. Comprende una pluma 1, que se puede pivotar hacia arriba y hacia abajo alrededor de un eje horizontal, que se forma por el eje articulado 2, con el que está colocado en una torre 3. La torre 3 puede girarse alrededor de un eje vertical, por lo que también la pluma 3 puede girarse con este. La torre 3 está fijada en un chasis 6 colocado en uno de los bordes 7. La longitud de la cuerda 8 puede cambiarse por enrollado. La carga 10 puede ser acogida por un manipulador o un spreader 20, que puede ser girado mediante un dispositivo rotador 15, que está colocado en un gancho suspendido de la cuerda 8. La carga 10 o bien se gira por giro de la torre o por ello de la grúa completa o usando un dispositivo rotador 15. En la práctica ambos giros deben usarse al mismo simultáneamente, para adaptar la carga en la posición deseada.

Por simplicidad aquí solo se explica el giro de una carga, que está suspendida de una por lo demás grúa fija. El concepto de control de acuerdo con la invención se puede integrar sin problema en un concepto de control sin problema alguno para la grúa completa.

Particularmente para un transbordo de contenedor se ha ampliado el control anti-péndulo ya conocido por el documento DE 100 64 182 y el documento DE 103 24 692 para un concepto de control y de automatización para la orientación de contenedor basada en el modelo dinámico del sistema, para evitar una oscilación indeseada de la carga. Este concepto de control para la orientación de contenedor se divulga en el documento DE 100 29 579, donde el momento de inercia de la carga de grúa está estimado en base de la suposición, que la distribución de la masa en el contenedor es homogénea.

Ya que el sistema spreader/rotador puede considerarse como un robot con brazos flexibles con un comportamiento dinámico lento, se emplea un procedimiento adaptivo y basado en el modelo para el control del manipulador. Para

mejorar el rendimiento del concepto de control, los parámetros del modelo dinámico del sistema y particularmente del momento de inercia de la carga deben conocerse lo más exacto posible. La presente invención divulga un procedimiento de determinación para el mejoramiento de estos conceptos de control y de automatización de una grúa móvil de puerto, que se describen en el documento DE 10064182, el documento DE 10324692 y el documento DE 10029579 así como en O. Sawodny, H. Aschemann, J. Kumpel, C. Tarin, K. Schneider, *Anti-Sway Control for Boom Cares, American Control Conference*, Anchorage EEUU, Proc. páginas 244-249 2002; O. Sawodny, A. Hildebrandt, K. Schneider, *Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes, International Conference on Robotics & Automation*, Taipei Taiwán, Proc. páginas 2182-2187, 2003 y J. Neupert, A. Hildebrandt, O. Sawodny, K. Schneider, *A Trajectory Planning Strategy for Large Serving Robots, SICE Annual Conference*, Okayama Japón, Proc. páginas 2180-2185, 2005.

Debido a una distribución no homogénea poco común de la carga en el contenedor, mediante la suposición, que la distribución de la carga es homogénea, el momento de inercia estimado solo es una aproximación próxima a este parámetro, lo que lleva a un control inexacto de la orientación del contenedor. Por ello la presente invención divulga un procedimiento para determinar el momento de inercia de la carga durante el funcionamiento de la grúa que se basa en los datos obtenidos por la medición del sistema. Esta manera de estimación del momento de inercia de la carga con ayuda de una prolongación de observador lleva a mejor exactitud del procedimiento de control.

Los datos, en los que se basa el cálculo del momento de inercia de la carga, se pueden obtener mediante distintos procedimientos. La figura 1 muestra un elemento 35 cardán, que está colocado en la cabeza de pluma 30 de una pluma 1 mediante unión 32 y 33 cardán bajo la roldana principal 31. El elemento 35 cardán presenta roldanas 26, por la que se conduce a la cuerda 8, de modo que sigue los movimientos de la cuerda 8. La unión 32 y 33 cardán permite al elemento 35 cardán moverse libremente alrededor de un eje horizontal y uno vertical, pero impiden movimientos de giro. Se pueden medir los movimientos del elemento cardán y con ello los movimientos de la cuerda. En esta realización se prevén dos elementos 35 cardán, que se conducen por las dos cuerdas, en las que está suspendido el gancho. Estos datos entonces se pueden usar para calcular la torsión de las cuerdas y el ángulo  $\varphi_H$  torsión del gancho. Para este fin el giroscopio se puede colocar en los elementos cardán. Si no se usan elementos cardán, el giroscopio también puede colocarse directamente en el gancho o el manipulador, para determinar el ángulo de giro.

En la presente invención se pueden usar distintos procedimientos de observador para determinar el momento de inercia de la carga durante el funcionamiento de la grúa mediante los datos obtenidos por la medición del sistema.

Empleando el método de los mínimos cuadrados en los datos de entrada/salida medidos se puede estimar el parámetro del sistema. El método estándar de los mínimos cuadrados no es satisfactorio al estimar parámetros que cambian en el tiempo. Para la solución de este problema se puede usar un olvido exponencial de los datos viejos usados. El denominado factor de *Forgetting* puede elegirse de tal manera, que la matriz *gain* resultante mantiene una traza constante- Este planteamiento puede perfeccionarse al procedimiento del olvido adaptado *gain*, en el que el factor *forgetting* correspondiente a la norma de la matriz *gain* cambia constantemente.

Otro procedimiento para la determinación de los parámetros de sistemas dinámicos es el filtro de Kalman ampliado, que se usa en la realización de acuerdo con la invención. Con el uso de este procedimiento existen varias ventajas, que se tratarán después.

La figura 2 muestra un concepto de control adaptivo conocido para manipulador la orientación de la carga (del contenedor). Este concepto de control presentado en (O. Sawodny, A. Hildebrandt, K. Schneider, *Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes, International Conference on Robotics & Automation*, Taipei Taiwán, Proc. páginas 2182-2187, 2003) y también desvelado en el documento DE 10029579, cuyo contenido se retoma por mención en esta solicitud, se compone de un control de seguimiento de trayectoria, un observador de perturbación y una regulación con retroalimentación de estado, para evitar oscilaciones torsionales. Para el control de la orientación de carga se reconstruye el ángulo torsional de la velocidad angular, la que se mide por un giroscopio en el gancho. El ángulo entre el gancho y el contenedor se mide por un sensor de valores medidos. La orientación de carga se obtiene por la suma de ambos ángulos. Debido al hecho, de que todas las partes del concepto de control son algoritmos basados en el modelo, tienen que adaptarse a variaciones de parámetros. La mayoría de los parámetros pueden medirse directamente, pero la distribución de la masa de carga en el contenedor es desconocida y con ello el momento de inercia del contenedor.

Ya que este parámetro tiene una gran influencia sobre el comportamiento dinámico del oscilador torsional y con ello sobre el rendimiento del control de anti-oscilación, debe ser determinado en línea.

#### **Modelo dinámico para el manipulador suspendido de la cuerda**

Para el transbordo del contenedor, la grúa de pluma está equipada con un manipulador especial, el denominado spreader. El manipulador se puede girar alrededor del eje vertical mediante un dispositivo rotador que contiene un accionamiento hidráulico. Como se muestra en la figura 4, en este dispositivo está instalado un gancho.

5 El gancho está fijado en dos cuerdas, indicando  $r$  e  $l_s$  la distancia efectiva de las dos cuerdas paralelas o la longitud de cuerda. El sistema se compone de tres cuerpos ampliados. La carga (contenedor), caracterizado por el momento de inercia  $J_L$ , y la masa  $m_L$ , el manipulador (spreader-contenedor) y el gancho.  $J_{Sp}$  y  $J_H$  indican el momento de inercia del spreader y del gancho,  $m_{Sp}$  y  $m_H$  indican respectivamente la masa de ambos cuerpos. El ángulo de giro del spreader con la carga se denomina como  $\varphi_L$ . El segundo ángulo  $\varphi_H$  indica el ángulo torsional.

Para derivar las ecuaciones de movimiento del sistema mecánico observado se usa la formulación de Lagrange (según L. Sciavicco, B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, editorial Springer, Londres, Gran Bretaña, 2001).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \xi_i \quad (1)$$

10 La función de Lagrange  $L$  está definida como diferencia entre la energía cinética  $T$  y de la energía potencial  $U$  del sistema.

$$L = T - U \quad (2)$$

Bajo la suposición de que ganchos, spreader y carga (contenedor) se juntan en un cuerpo ampliado con el momento de inercia total  $J_{total} = J_H + J_{Sp} + J_L$ , la energía cinética y potencial se obtienen tal como sigue:

$$T = \frac{J_{total}}{2} \dot{\varphi}_H^2; \quad U = \frac{c_l}{2} \varphi_H^2 \quad (3)$$

15  $c_l$  describe la rigidez torsional linealizada de las dos cuerdas paralelas como función de los parámetros  $M_{total} = m_H + m_{Sp} + m_L$  e  $l_s$ , (es la constante gravitacional):

$$c_l = \frac{m_{total} g r^2}{4l_s} \quad (4)$$

20 La solución de la ecuación (1) con la función de Lagrange resultante y la coordenada generalizada  $q = \varphi_H$  lleva al modelo dinámico del dispositivo rotador con carga.

$$J_{total} \ddot{\varphi}_H + c_l \varphi_H = \xi \quad (5)$$

La fuerza generalizada es el momento del motor hidráulico y se puede definir como

$$\xi = -(J_{Sp} + J_L) \ddot{\varphi}_l \quad (6)$$

siendo  $\ddot{\varphi}_C$  la aceleración angular relativa entre el gancho y el spreader

$$(\ddot{\varphi}_l = \ddot{\varphi}_C - \ddot{\varphi}_H).$$

25 Para el procedimiento de determinación el modelo continuo (ecuación (5) y (6)) se transforma en modelo espacial de estado discreto con la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \underline{x}_{k+1} &= \underline{\Phi} \underline{x}_k + \underline{H} u_k \\ \underline{y}_k &= \underline{C} \underline{x}_k \end{aligned} \quad (7)$$

Las matrices del sistema, el vector de estado y el vector de entrada se obtienen:

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}(T) &= \begin{bmatrix} \cos(aT) & \frac{1}{a} \sin(aT) \\ -a \sin(aT) & \cos(aT) \end{bmatrix} \\ \underline{H}(T) &= \begin{bmatrix} \frac{J_{sp} + J_l}{c_l} [\cos(aT) - 1] \\ -\frac{J_{sp} + J_l}{a J_{total}} \sin(aT) \end{bmatrix} \\ \underline{C} &= [0 \quad 1] \\ \underline{x}_k &= [\varphi_{hk} \quad \dot{\varphi}_{hk}]^T; u_k = \ddot{\varphi}_{ck} \end{aligned} \quad (8)$$

siendo

$$a = \sqrt{\frac{c_l}{J_{total}}}$$

5

y el tiempo de exploración  $T$ .

**Determinación del parámetro incierto**

10 Para el caso de aplicación predeterminado debe determinarse el momento de inercia del contenedor durante el funcionamiento de la grúa, para ajustar el concepto de control basado en el modelo. Debido a este hecho el algoritmo de determinación para el momento de inercia debe ser iterativo, de modo que cada vez que se obtenga una medición exacta de datos de entrada/salida, se genera una nueva estimación de parámetro. En el pasado se discutieron algunos procedimientos de determinación del sistema. Uno de los procedimientos para una determinación del parámetro en línea es un filtro de Kalman ampliado.

15 Para la estimación del momento de inercia desconocido del contenedor se amplía el vector de estado  $x_k$  del modelo de estado discreto (ecuación (7) y (8)) por el parámetro desconocido  $J_L$  (C.K. Chui, G. Chen, *Kalman Filtering with Real-Time Application*, editorial Springer Berlín Heidelberg, Alemania, 3. Edición 1999).

$$\tilde{x}_k = [\varphi_{hk} \quad \dot{\varphi}_{hk} \quad J_{Lk}]^T \quad (9)$$

Con este perfeccionamiento resulta un modelo discreto no lineal de la siguiente forma:

$$\tilde{x}_{k+1} = \underline{f}(\tilde{x}_k, u_k) + \underline{g}_k v_k \quad (10)$$

20 siendo  $v_k$  una secuencia de ruido blanco gaussiano con valor medio cero, para describir el sistema real de manera más precisa. El ruido del sistema se caracteriza por la siguiente matriz de covarianza

$$\underline{Q} = E(v_k v_k^T) \quad (11)$$

Las funciones que valoran el vector  $f$  y  $g$  se obtienen por:

$$\underline{f}(\tilde{x}_k, u_k) = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}(J_{Lk})\tilde{x}_k + \underline{H}(J_{Lk})u_k \\ J_{Lk} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\underline{g}_k = \begin{bmatrix} \underline{H}(J_{Lk}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Como se explica en la sección 1 el ángulo de giro del gancho  $\varphi_H$  no se puede medir directamente. Debe reconstruirse

- 5 a partir de la velocidad angular  $\dot{\varphi}_{Hgyro}$ , que se mide mediante un giroscopio en el gancho. Ya que la señal de giroscopio está perturbada, debe tenerse en cuenta el ruido de medida, lo que lleva a una salida del sistema que se puede modelar,

$$\bar{y}_k = \underline{h}\tilde{x}_k + w_k \quad (13)$$

- 10 siendo

$$\underline{h} = [0 \quad 1 \quad 0] \quad (14)$$

y  $w_k$  un ruido blanco gaussiano con valor medio cero con la siguiente matriz de covarianza

$$\underline{R} = E(w_k w_k^T) \quad (15)$$

- 15 Para aplicar el filtro de Kalman en el sistema no lineal conservado, debe hacerse la linealización con una aproximación Taylor lineal a la estimación del estado  $\underline{x}_k$  anterior:

$$\tilde{x}_{k+1} \approx \underline{f}(\hat{\tilde{x}}_k, u_k) + \underline{F}(\hat{\tilde{x}}_k, u_k)(\tilde{x}_k - \hat{\tilde{x}}_k) \quad (16)$$

$$+ \underline{g}(\hat{J}_{Lk})v_k$$

siendo  $\underline{F}$  la matriz jacobiana  $\underline{f}$  con los siguientes coeficientes:

$$F_{ij} = \frac{\partial f_i(\tilde{x}, u)}{\partial \tilde{x}_j} \quad (17)$$

Calculando los coeficientes para  $i, j = 1, \dots, 3$  la matriz jacobiana se obtiene como:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}(J_{l,k}) & \frac{\partial}{\partial J_{l,k}}(\underline{\Phi}(J_{l,k})\underline{x}_k + \underline{H}(J_{l,k})\underline{u}_k) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Con el modelo linealizado y las matrices de covarianza  $\underline{Q}$  y  $\underline{R}$  se puede derivar el algoritmo de filtro de Kalman óptimo de la siguiente forma (T. Iwasaki, T. Kataoka, *Application Of An Extended Kalman Filter To Parameter Identification Of An Induction Motor*, Industry Applications Society Annual Meeting, Volumen 1, páginas 248-253, 1989):

- 5 1ª Etapa: La predicción de los estados  $[\varphi_{HK} \dot{\varphi}_{HK}]$  y del parámetro  $J_{Lk}$  se calcula a partir de la entrada  $u_k$  y los estados estimados no perturbados  $\underline{x}_k$ .

$$\underline{x}_{k+1}^* = \underline{F}(\hat{J}_{Lk})\hat{x}_k + \underline{H}(\hat{J}_{Lk})\underline{u}_k \quad (19)$$

2ª Etapa: Las matrices de covarianza del error de predicción  $\underline{M}_{k+1}$  y de los errores de estimación  $\underline{P}_{k+1}$  así como la matriz Kalman Gain  $\underline{K}_{k+1}$  se calculan con ayuda de lo siguiente (I es la matriz identidad):

$$\underline{M}_{k+1} = \underline{F}(\hat{x}_k, u_k) \underline{P}_k \underline{F}(\hat{x}_k, u_k)' + \underline{g}(\hat{J}_{l,k}) \underline{Q} \underline{g}(\hat{J}_{l,k})' \quad (20)$$

$$\underline{K}_{k+1} = \underline{M}_{k+1} \underline{C}' (\underline{C} \underline{M}_{k+1} \underline{C}' + \underline{R})^{-1} \quad (21)$$

$$\underline{P}_{k+1} = (\underline{I} - \underline{K}_{k+1} \underline{C}) \underline{M}_{k+1} \quad (22)$$

- 10 3ª Etapa: La estimación del vector de estado y del momento de inercia del contenedor se obtienen mediante corrección de los valores predichos con la diferencia ponderada entre la velocidad angular medida y predicha del gancho.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{J}_{l,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{x}_{k+1}^* \\ \hat{J}_{l,k} \end{bmatrix} + \underline{K}_{k+1} \left( \dot{\varphi}_{Hgyro} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \underline{x}_{k+1}^* \right) \quad (23)$$

- 15 El algoritmo descrito se realiza cada vez que está disponible una nueva medición de datos de entrada/salida ( $k = 1, 2, \dots$ ). Para inicializar el otro filtro de Kalman ampliado en ese momento, ya que se coge un contenedor, se genera el impulso de arranque. Los estados  $[\varphi_H \dot{\varphi}_H]$  observados por el observador de perturbación en ese momento son la estimación inicial  $\hat{x}_0$  para el algoritmo de filtro. El valor inicial para el momento de inercia del contenedor  $\hat{J}_{L0}$  se puede mantener suponiendo, que el contenedor tiene una masa distribuida uniforme. Ya que la longitud  $l_{contenedor}$  y la masa  $m_L$  del contenedor se pueden medir y el ancho es constante ( $b_{contenedor} = 2,4m$ ), se puede calcular el momento de inercia como a continuación:

$$\hat{J}_{l,u} = \frac{m_l}{12} (l_{contenedor}^2 + b_{contenedor}^2) \quad (24)$$

La matriz de covarianza de salida para el error de estimación  $\underline{P}_0$  se usa para ajustar el algoritmo de determinación (véase sección 4).

## Resultados

### Simulación

- 5 Para encontrar buenos elementos de la matriz de covarianza para la estimación de errores  $\underline{P}_0$ , se implementa el algoritmo de determinación en un entorno simulado. Como se muestra en la figura 5, el modelo de simulación se termina por la señal de medida  $\hat{\varphi}_{c\_medido}$  del sistema real. Además, una secuencia ruido blanco se añade a la señal de salida del modelo de simulación.

Los parámetros y las condiciones de salida de la simulación son como a continuación:

$$\begin{aligned} \hat{J}_{I_0} &= 0,8 \cdot J_{I_{\text{modelo}}}; J_{I_{\text{modelo}}} = 36000 \text{kgm}^2 \\ \underline{x}_0 &= [0 \quad 0]^T; \underline{Q} = 10^{-10}; \underline{R} = 10^{-6} \\ T &= 0,025 \text{s}; c_l = 3750; J_H = 940 \text{kgm}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

10

Los resultados de simulación mostrados en la figura 6 se obtienen usando esta configuración. Las tres curvas representan los resultados obtenidos usando tres valores iniciales distintos para la matriz de covarianza de error de estimación. Cuanto más altos son los valores de esta matriz, más rápido llega el momento de inercia estimado del contenedor al valor de referencia  $J_{L_{\text{modelo}}}$ .

- 15 Los resultados muestran, que también en la simulación existe un valor límite superior para el valor inicial de la matriz de covarianza del error de estimación, cuando el modelo de simulación se termina por la señal de medida  $\varphi_{c\_medido}$ . Esto significa que el algoritmo de determinación reacciona fuertemente a perturbaciones no consideradas de la entrada del sistema, cuando la matriz de covarianza de salida es  $P_{0ij} = 2 \cdot 10^{10} \delta_{ij}$ ;  $i, j = 1, 2, 3$  ( $\delta_{ij}$  es el Delta Kronecker) o mayor.

### Ensayos experimentales

- 20 Para valorar el rendimiento del filtro de Kalman ampliado se implementa el algoritmo en el concepto de control y de automatización de la grúa de pluma, particularmente en el componente de control de oscilación anti-torsional adaptivo, como se expone en la figura 3. Los resultados experimentales obtenidos se calculan en línea mediante el algoritmo para el filtro de Kalman ampliado durante el funcionamiento de la grúa. Los experimentos muestran que el mejor valor inicial de la matriz de covarianza es  $P_{0ij} = 7 \cdot 10^2 \delta_{ij}$ ;  $i, j = 1, 2, 3$ . Este es debido a inseguridades de modelo y perturbaciones no tenidas en cuenta de las señales de entrada/salida mucho más pequeñas que en la simulación. Sin embargo, la figura 7 muestra que la estimación del momento de inercia de la carga se aproxima al valor de referencia de  $36.000 \text{kgm}^2$ .

- 30 El valor inicial para el momento de inercia  $\hat{J}_{L0}$  se ha elegido con  $47.000 \text{kgm}^2$ , y los parámetros remanentes y las condiciones iniciales eran iguales a las de la configuración de simulación. Ya que el estímulo del movimiento torsional se para en 150 segundos, existe entre el estimado  $J_L$  y el valor de referencia una variación residual. Teniendo en cuenta el comportamiento dinámico lento del sistema flexible el momento de inercia se acerca de manera rápida a los valores en la zona de tolerancia al rededor del valor de referencia. Una variación  $\pm 5\%$  entre  $\hat{J}_l$  y el valor de referencia del momento de inercia tiene un considerable efecto sobre el rendimiento del control de oscilación anti-torsional. La figura 8 muestra el momento de inercia de carga estimado, cuando el valor inicial  $\hat{J}_{L0}$  es igual al valor de referencia. En este caso la masa del contenedor está distribuida uniforme (véase ecuación (24)).

- 35 El resultado de determinación del parámetro obtenido  $J_L$  muestra la robustez del algoritmo del filtro de Kalman ampliado, ya que fuera de la zona de tolerancia de  $\pm 5\%$  se calcula una estimación. La pequeña variación entre el parámetro estimado y el valor de referencia están caudadas por inseguridades de modelo.

### Conclusión

- 40 La presente invención divulga una ampliación de un concepto de control y de automatización para la orientación de una carga de grúa. Ya que este concepto es un algoritmo adaptivo basado en el modelo, los parámetros del modelo

5 dinámico deben conocerse de la manera precisa posible. La mayoría de los parámetros pueden medirse directamente, pero el momento de inercia de la carga de grúa (contenedor) debe determinarse durante el funcionamiento de la grúa debido a la distribución desconocida de la masa. El procedimiento de determinación usado, el algoritmo de filtro de Kalman ampliado, se deriva por medio del modelo dinámico del manipulador suspendido de la cuerda. Este procedimiento de determinación de parámetro se integra en el control de oscilación anti-torsional y se sometió a prueba en una grúa móvil de puerto LIEBHERR LHM 402. Los resultados de medición obtenidos muestran la rápida aproximación y la robustez de la estimación del momento de inercia desconocido de la carga de grúa.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa, en el que un manipulador para manipular la carga está unido mediante un dispositivo rotador con un gancho suspendido de cuerdas y el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga se controla mediante un dispositivo de control con ayuda del momento de inercia  $J_L$  de la carga como parámetro más importante, siendo el dispositivo de control un dispositivo de control adaptativo, determinándose el momento de inercia  $J_L$  de la carga durante el funcionamiento de la grúa basándose en al menos uno de los siguientes parámetros mediante medición del estado del sistema: ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho, ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga, variación  $\dot{\varphi}_H$  del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o la variación  $\dot{\varphi}_L$  del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga, **caracterizado por que** se usa un giroscopio para obtener datos, mediante los que se puede determinar el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga, determinándose el momento de inercia  $J_L$  con ayuda de un observador.
2. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga se controla con ayuda de un control de seguimiento de trayectoria adaptivo.
3. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** se usa un modelo dinámico del sistema para calcular datos que se describen por el estado del sistema.
4. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 3, **caracterizado por que** se evitan las oscilaciones torsionales mediante un dispositivo de oscilación anti-torsional con ayuda de los datos calculados mediante el modelo dinámico.
5. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la diferencia  $\varphi_c$  entre el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho se pueden cambiar mediante el dispositivo rotador.
6. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la diferencia  $\varphi_c$  entre el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho se pueden medir mediante un sensor de valores medidos conectado con el dispositivo rotador.
7. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** se miden los movimientos de un elemento cardán conducido por la cuerda para obtener datos, mediante los que se pueden determinar el ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga.
8. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la variación  $\dot{\varphi}_H$  del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o la variación  $\dot{\varphi}_L$  del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga se miden mediante un giroscopio.
9. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 3, **caracterizado por que** el modelo dinámico del sistema se basa en las ecuaciones de movimiento de un modelo físico al menos de las cuerdas, del gancho y de la carga.
10. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1 o 3, **caracterizado por que** el momento de inercia  $J_H$  del gancho y  $J_{Sp}$  del manipulador se usan como parámetros.
11. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** durante el funcionamiento de la grúa se aplica un par de fuerzas en la carga y/o en el gancho.
12. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 11, **caracterizado por que** los datos obtenidos mediante medición del estado del sistema comprenden al menos la variación  $\dot{\varphi}_H$  del ángulo de giro  $\varphi_H$  del gancho y/o la variación  $\dot{\varphi}_L$  del ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga como reacción al par de fuerzas aplicado en la carga y/o en el gancho.
13. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** se usa un valor estimado del momento de inercia  $J_{L0}$  solo basándose en la masa y de las dimensiones de la carga como valor inicial para  $J_L$  y se determinan valores corregidos  $J_{Lk}$  en un proceso iterativo, para determinar el momento de inercia  $J_L$ .
14. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 3, **caracterizado por que** durante el funcionamiento de la grúa se calculan datos que describen el estado del sistema por el modelo dinámico basándose en un valor  $J_{L,k-1}$  del momento de inercia  $J_L$  y se determina un valor corregido  $J_{Lk}$  del momento de inercia  $J_L$ .

por medio de los datos calculados y de los datos obtenidos mediante medición del estado del sistema, para determinar el momento de inercia  $J_L$ .

15. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el momento de inercia  $J_L$  se determina con ayuda de un observador no lineal.

5 16. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el momento de inercia  $J_L$  se determina con ayuda de un filtro de Kalman ampliado.

17. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** se asume una distribución homogénea de la masa en la carga para una estimación de un valor inicial  $J_{L0}$  del momento de inercia  $J_L$  de la carga.

10 18. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 1, **caracterizado por que** se tiene en cuenta el ruido en los datos obtenidos mediante mediciones en la determinación del momento de inercia  $J_L$ .

19. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 18, **caracterizado por que** el ruido en los datos obtenidos mediante mediciones se modela mediante matrices de covarianza.

15 20. Procedimiento para controlar la orientación de una carga de grúa según la reivindicación 19, **caracterizado por que** las matrices de covarianza se determinan de manera experimental.

20 21. Sistema para controlar la orientación de una carga de grúa según el procedimiento de una de las reivindicaciones anteriores, que comprende un dispositivo de control para controlar el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga y un giroscopio para obtener datos, mediante los que se determinan el ángulo de giro del gancho  $\varphi_H$  y/o el ángulo de giro  $\varphi_L$  de la carga, conteniendo el dispositivo de control un dispositivo de planificación de trayectoria y un dispositivo de control de trayectoria, así como un observador para estimar el momento de inercia  $J_L$ .

22. Grúa, particularmente una grúa de pluma, que comprende el sistema para controlar el giro de una carga de grúa según con la reivindicación 21.

Fig. 1a

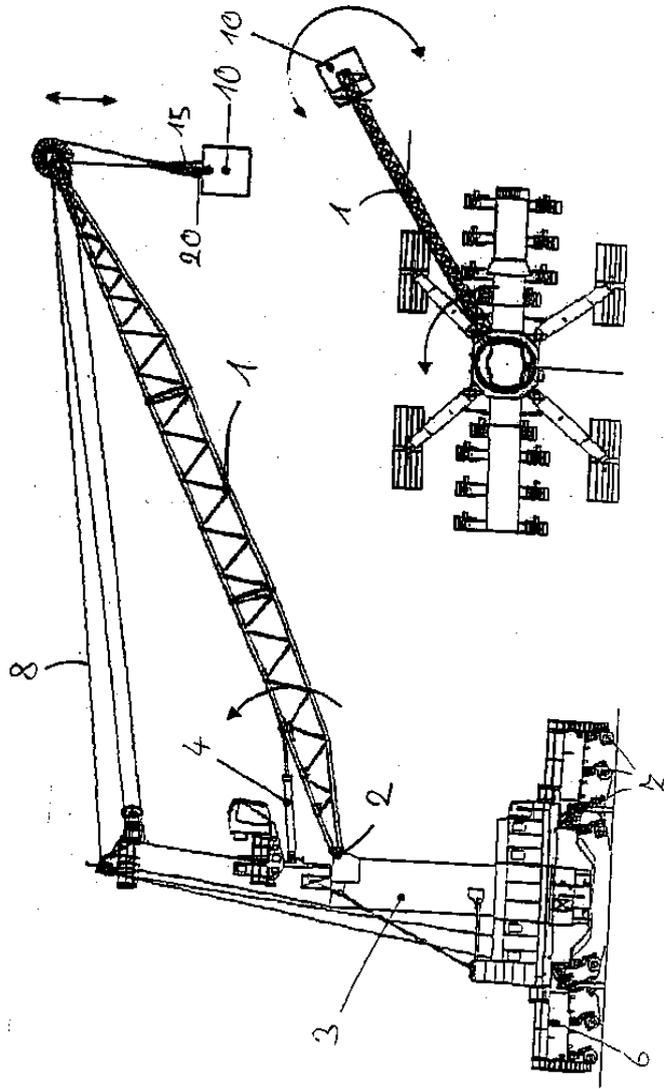
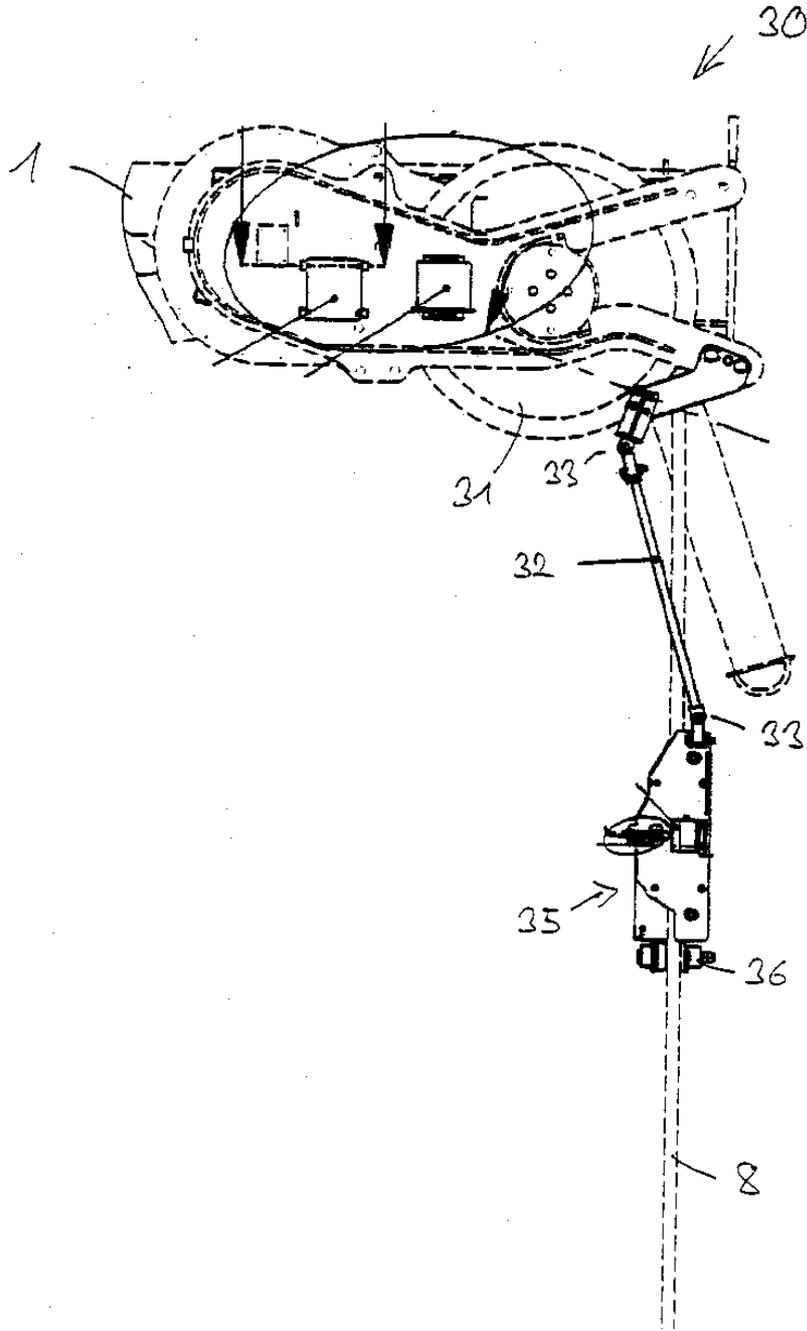


Fig. 1b



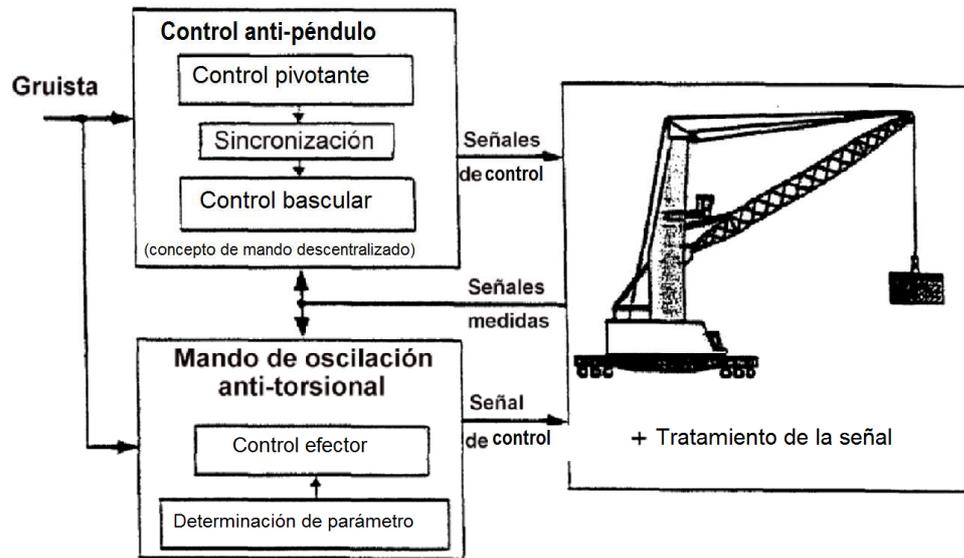


Figura 2: Estructura de manejo de la grúa móvil de puerto

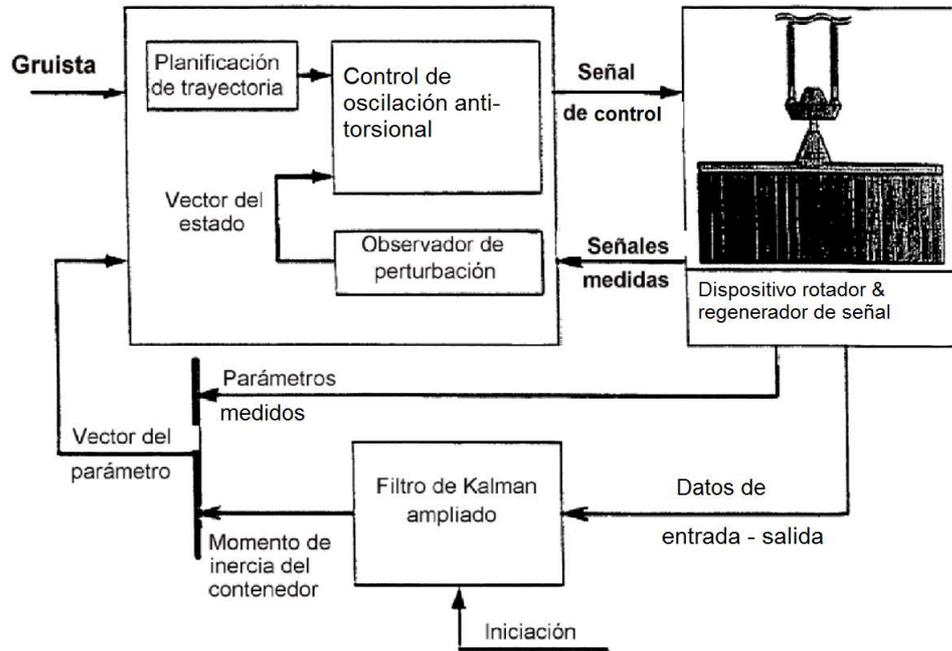


Figura 3: Estructura del control de oscilación anti-torsional

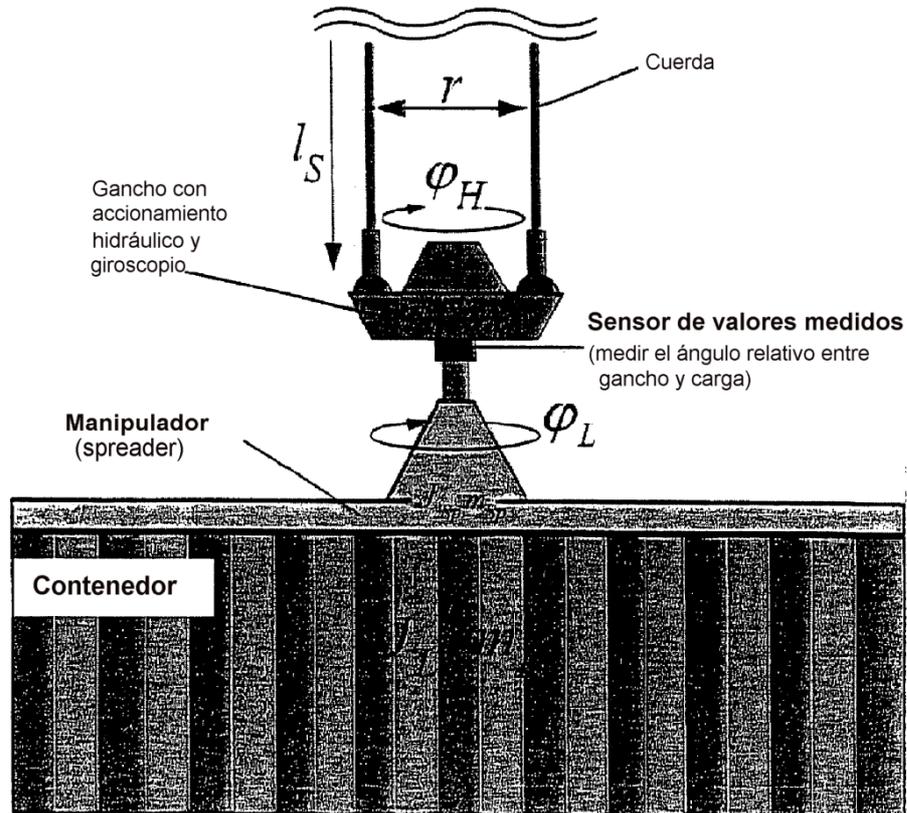


Figura 4: Equipo rotador que cuelga de la cuerda con spreader y carga útil

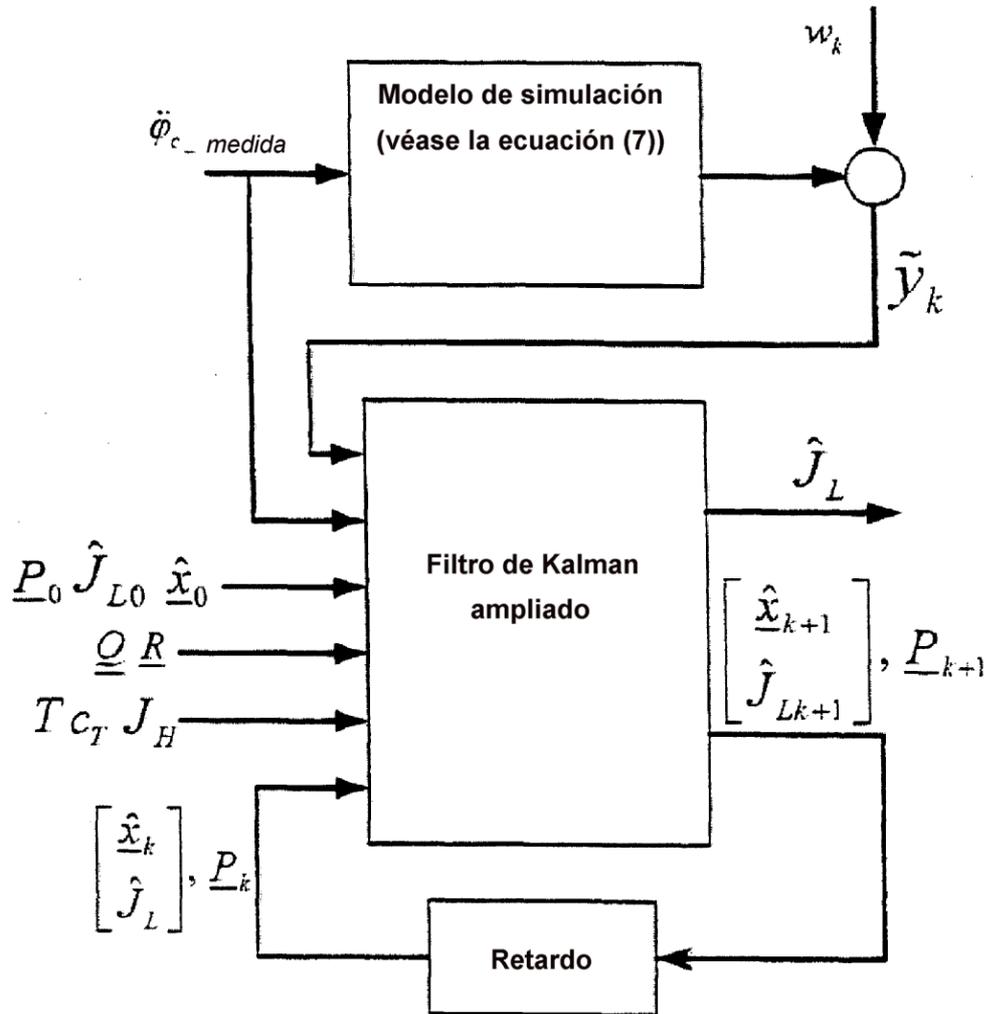


Figura 5: Estructura del entorno de simulación

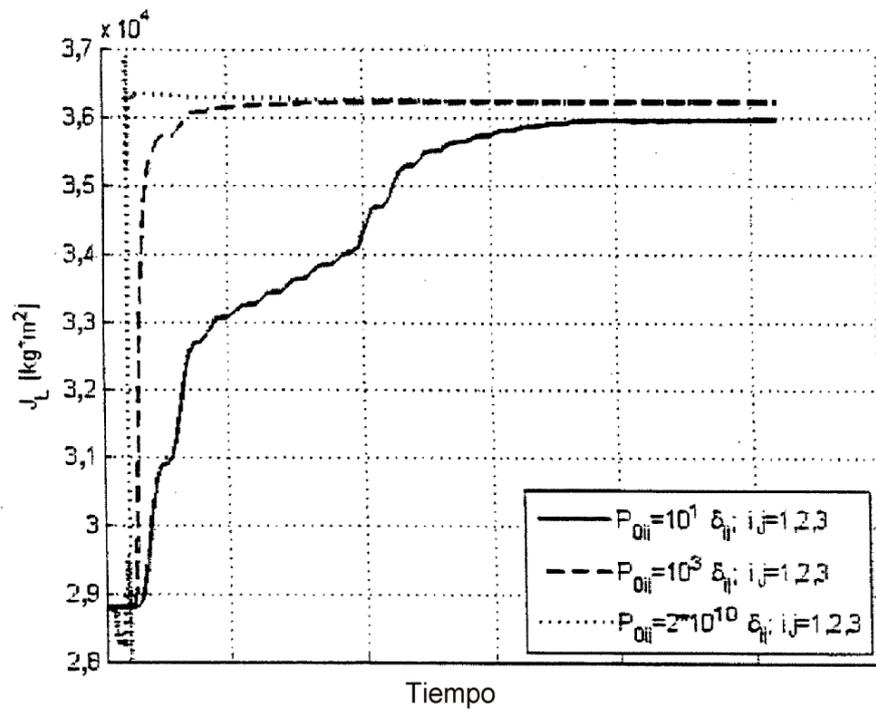


Figura 6: Rendimiento de determinación dependiente de la matriz  $P_0$

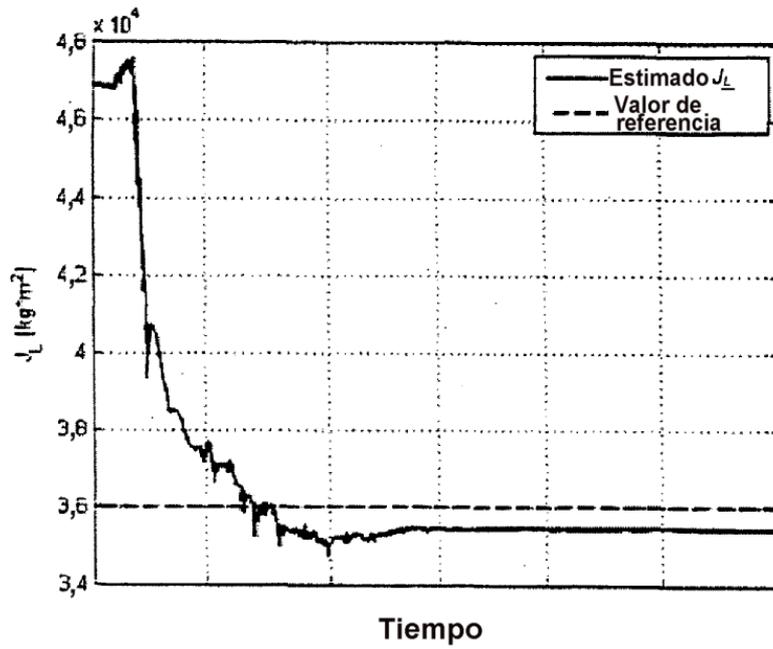


Figura 7: Determinación de  $J_L$  con valor inicial erróneo  $J_{L0}$

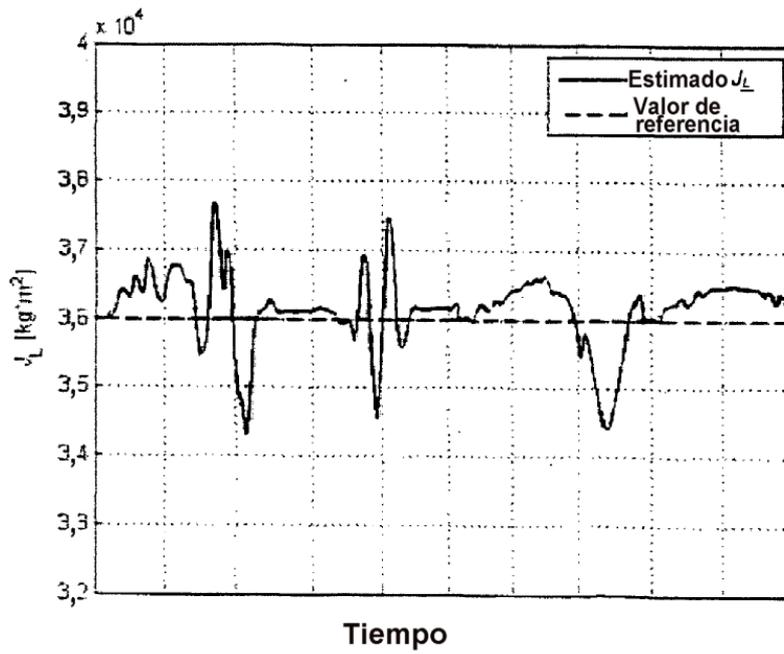


Figura 8: Determinación de  $J_L$  con valor inicial correcto  $J_{L0}$