

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 647 590**

51 Int. Cl.:

B66C 13/06 (2006.01)

B66C 13/08 (2006.01)

B66C 13/46 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.05.2015 E 15169336 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.08.2017 EP 2952466**

54 Título: **Método para controlar la orientación de una carga de grúa y una grúa de pescante**

30 Prioridad:

02.06.2014 DE 102014008094

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

22.12.2017

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**SCHNEIDER, KLAUS;
SAWODNY, OLIVER;
SCHAPER, DI ULF y
ARNOLD, ECKHARD**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 647 590 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

Método para controlar la orientación de una carga de grúa y una grúa de pescante.

La invención se relaciona con un método para controlar la orientación de una carga de grúa, en donde se conecta un manipulador para manipular una carga mediante una unidad rotadora a un gancho suspendido sobre cuerdas y el ángulo de inclinación de la carga se controla mediante una unidad de control de la grúa.

En puertos pequeños y de tamaño mediano, las grúas de pescante se utilizan para múltiples aplicaciones. Estas incluyen manejo de carga masivo y transbordo de contenedores. Un ejemplo de una grúa pescante utilizada en puertos pequeños y de tamaño mediano con tipos de carga mezclados se describe en la Figura 1. Habitualmente, el nivel de automatización del proceso es comparativamente bajo y el transbordo de contenedores se hace manualmente por los operadores de la grúa. Sin embargo, la tendencia general de la automatización logística en los puertos requiere mayores velocidades de manejo de contenedores, que se puede lograr al incrementar el nivel de automatización del proceso.

En las grúas de pescante, los contenedores están montados en el gancho de la grúa que utiliza esparcidores (manipuladores), ver la Figura 2. Los esparcidores solo se pueden asegurar a los contenedores después de que ellos han aterrizado de manera precisa sobre ellos. Esto significa que la posición y la orientación del esparcidor tiene que adaptarse al contenedor para agarrar de manera exitosa el contenedor con el esparcidor. La orientación del esparcidor, que también se define como un ángulo de inclinación, se controla utilizando un motor rotador montado en un gancho.

Ya que el viento, el impacto y la distribución de carga no homogénea puede originar vibraciones de inclinación, es deseable un control de inclinación activo para facilitar la operación de la grúa, mejorando la precisión de ubicación, e incrementando la rotación. Ubicar el esparcidor requiere sistemas. Adaptar la orientación del esparcidor requiere amortiguar las oscilaciones de torsión ("vibraciones de rotación" o "vibraciones de inclinación"). Utilizando un accionador rotacional, que se hace regularmente de manera manual.

Unas pocas soluciones técnicas para un control de inclinación son conocidas en el estado de la técnica y las cuales están principalmente diseñadas para una grúa pórtico. Debido a las propiedades específicas de tales grúas, estas ejecuciones de controles de inclinación en su mayoría no cumplen con los diferentes diseños de la grúa. En particular, las grúas de pescante comprenden una longitud de cuerda mayor y una distancia de cuerda más pequeña que produce una rigidez torsional inferior comparada con las grúas pórtico. Esto incrementa la relevancia de las restricciones y también da como resultado menores frecuencias naturales. Segundo, los ángulos de inclinación arbitrarios son posibles en las grúas de pescante, mientras que en las grúas pórtico solo pueden alcanzar ángulos de inclinación de unos pocos grados. Tercero, el mecanismo de seguimiento visual de la carga bien establecido de las grúas pórtico que utilizan cámaras y marcadores no se puede aplicar a las grúas de pescante.

Por ejemplo, una solución para un sistema de control de inclinación es el conocido del documento EP 1 334 945 A2 que efectúa mediciones de ubicación óptica (por ejemplo, basadas en cámara) para detectar el ángulo de inclinación. Sin embargo, tal sistema puede no estar disponible durante la noche o durante condiciones climáticas malas.

Otro método para controlar la orientación de la carga de la grúa es el conocido del documento DE 100 29 579 y DE 10 2006 033 277 A1. Allí, el gancho suspendido sobre las cuerdas tiene una unidad rotadora que contiene un impulsor hidráulico, de tal manera que el manipulador para agarrar los contenedores se puede rotar alrededor de un eje vertical. De esta manera, es posible variar la orientación de las cargas de la grúa. Si el operador de la grúa o el control automático le da una señal para rotar el manipulador y de esta manera la carga alrededor del eje vertical, los motores hidráulicos de la unidad rotadora se activan y una proporción de flujo resultante origina un torque. Ya que el gancho está suspendido sobre cuerdas, el torque daría como resultado una oscilación torsional del manipulador y la carga. Para ubicar la carga en un ángulo específico, esta oscilación torsional tiene que ser compensada. Sin embargo, las soluciones conocidas del documento DE 100 29 579 y DE 10 2006 033 277 A1 utilizan modelos lineales para describir el movimiento de inclinación. Tales modelos lineales son solamente válidos en un vecindario pequeño alrededor del estado estable, es decir, solo se pueden utilizar pequeños ángulos de deflexión. Además, los sistemas conocidos del documento DE 100 29 579 y DE 10 2006 033 277 A1 emplean un observador de estado que requiere la segunda derivada de una medida de posición. Tal diferenciación doble es desventajosa debido a la amplificación del ruido. Adicionalmente, ambos sistemas conocidos de los documentos DE 100 29 579 y DE 10 2006 033 277 A1 requieren el conocimiento de la inercia de la carga que varía fuertemente con la masa de la carga. Especialmente en el documento DE 10 2006 033 277 A1, el método de cálculo de consumo de tiempo se utiliza para estimar la inercia de la carga.

El documento DE 103 24 692 A1 divulga un método para controlar la orientación de una carga de grúa de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1. Es el objeto de la invención suministrar un método mejorado para controlar el ángulo de inclinación de una grúa en particular de una grúa de pescante.

El objeto anteriormente mencionado se resuelve mediante un método de acuerdo con la combinación característica de la reivindicación 1. Las realizaciones preferidas son la materia objeto de las reivindicaciones dependientes 2 a 12.

Adicionalmente, la reivindicación 13 está dirigida a un sistema de control de inclinación y la reivindicación 14 a una grúa de pescante. De acuerdo con las características de la reivindicación 1, el método se efectúa sobre una unidad de control de una grúa que comprende un manipulador para manipular la orientación de una carga conectada mediante una unidad rotadora a un gancho suspendido sobre cuerdas. Para mejorar la operación de la grúa el ángulo de inclinación de la carga es controlado mediante una unidad de control de la grúa.

En lo siguiente, una orientación del manipulador (esparcidor) y/o la carga de la grúa (por ejemplo, un contenedor) alrededor del eje vertical se describe como movimiento de inclinación. El rumbo o guiñada de una carga se denomina ángulo de inclinación y oscilaciones de rotación del ángulo y las oscilaciones de rotación del ángulo de inclinación son denominadas dinámicas de inclinación.

La expresión gancho define el dispositivo de manejo de carga completo excluyendo el esparcidor. Un control del ángulo de inclinación normalmente requiere una señal de retroalimentación que está usualmente basada en la medición del estado de corriente del sistema. Sin embargo, la implementación de un control de inclinación de acuerdo con la invención requiere los estados de la grúa de pescante que no se pueden medir o que están demasiado afectados para ser utilizados como señales de retroalimentación. Por lo tanto, la presente invención recomienda que uno o más de los estados requeridos se estimen sobre la base de un modelo que describe las dinámicas de inclinación durante la operación de la grúa. Adicionalmente, se utiliza un modelo no lineal para describir las dinámicas de inclinación de la grúa durante la operación en lugar de un modelo lineal como se aplica corrientemente por los controles de inclinación conocidos. La ejecución de modelos no lineales posibilita la consideración del comportamiento no lineal de las dinámicas de inclinación sobre un rango más amplio del rango completo del ángulo de inclinación posible de la carga. Ya que las grúas de pescante permiten un ángulo de inclinación significativamente mayor que las grúas pórtico, la presente invención esencialmente mejora el desempeño y la estabilidad del control de inclinación aplicado a las grúas de pescante.

De acuerdo con la presente invención, la no linealidad del modelo que describe las dinámicas de inclinación se refiere a la relación no lineal entre el ángulo de giro de la carga y el torque reactivo resultante. Además, la presente invención no requiere ningún sensor óptico para mejorar la disponibilidad del sistema y la confiabilidad del sistema. Ninguna medición de posición óptica tiene que ser efectuada para detectar el ángulo de inclinación como se conoce en el estado de la técnica.

En el método para controlar la orientación de la carga de la grúa de la presente invención, las oscilaciones torsionales se evitan mediante una unidad de oscilación antitorsional que utiliza los datos calculados mediante el modelo dinámico no lineal. Esta unidad de oscilación anti rotacional utiliza los datos calculados mediante el modelo dinámico no lineal para controlar la unidad rotadora de tal manera que se evitan las oscilaciones de la carga. La unidad de oscilación antitorsional puede generar señales de control que contrarresten posibles oscilaciones de la carga predicha por el modelo dinámico. La unidad rotadora incluye un impulsor eléctrico y/o hidráulico. La unidad de rotación antitorsional puede generar señales para activar el motor rotador, aplicando de esta manera el torque generado por una proporción del flujo hidráulico o de la corriente eléctrica.

En particular, la no linealidad incluida en el modelo que describe la dinámica de inclinación se refiere al comportamiento no lineal del torque reactivo resultante originado por la torsión de la carga, es decir, las cuerdas. Por ejemplo, el torque reactivo se incrementa hasta que se alcanza un cierto ángulo de inclinación de la carga, por ejemplo, de aproximadamente 90 grados. Al exceder dicho cierto ángulo de inclinación el torque reactivo disminuye debido al giro de las cuerdas. El modelo dinámico de inclinación preferiblemente incluye uno o más términos no lineales o expresiones que representan el comportamiento no lineal como se describió anteriormente.

Las arquitecturas controladoras anteriores como se describió anteriormente requieren la masa de la carga y más importantemente el momento de inercia de la carga como un parámetro de entrada. Sin embargo, la distribución de la masa dentro de la carga, por ejemplo, un contenedor, es desconocido y por lo tanto no se conoce el momento de inercia de la carga. Por lo tanto, las arquitecturas de control conocidas del estado de la técnica estiman el momento de inercia de la carga sobre la base de un proceso complejo y computacionalmente intensivo. De acuerdo con un aspecto preferible de la presente invención, el modelo no lineal implementado para la estimación del estado del sistema es independiente de la masa de la carga y/o el momento de inercia de la masa de carga. Consecuentemente, el desempeño del control de inclinación se incrementa significativamente mientras que se reduce la carga del procesador y el uso de la unidad de control.

En particular, el método de acuerdo con un aspecto preferible adicional no requiere un filtro Kalman para la estimación del estado del sistema.

En una realización preferida de la presente invención, el estado del sistema estimado incluye el ángulo estimado de inclinación estimado y/o la velocidad del ángulo de inclinación y/o una o más oscilaciones parásitas del sistema de inclinación. Una posible oscilación parásita que influencia las dinámicas de inclinación se puede originar por la permisividad del gancho, por ejemplo. Adicionalmente, el estado del sistema puede incluir además de los parámetros estimados varios parámetros que son directa o indirectamente medidos mediante los medios de medición de la grúa.

La unidad de control se basa preferiblemente en un control de dos grados de libertad (2-DOF) que comprende un observador de estado para la estimación del estado del sistema, un generador de trayectoria de referencia para la generación de una trayectoria de referencia en respuesta a la entrada del usuario y una ley de control de retroalimentación para la estabilización del modelo dinámico no lineal de inclinación

5

Esto significa que una señal de control para controlar la impulsión del rotador de la unidad rotadora y/o un engranaje de giro y/o cualquier otra unidad de la grúa comprende una señal de compensación del generador de trayectoria de referencia y una señal de retroalimentación para estabilizar el sistema y rechazar las afectaciones. La señal de control de compensación se genera mediante el generador de trayectoria de referencia y se diseñó de tal manera que este impulsa el sistema a lo largo de una trayectoria de referencia bajo condiciones nominales (trayectoria de entrada nominal). La desviación de un estado nominal (trayectoria de estado nominal) definida por el generador de trayectoria de referencia se determinan al utilizar el estado estimado determinado por el observador de estado sobre la base del modelo no lineal para las dinámicas de inclinación. Cualquier desviación se compensa mediante una señal de retroalimentación determinada del estado nominal y estimado utilizando un vector de ganancia de retroalimentación. La señal compensada resultante se utiliza como una señal de retroalimentación para la generación de la señal de control.

10

15

Para la estimación del estado del sistema que considera las dinámicas de inclinación, el observador de estado preferiblemente recibe los datos de medición que comprenden al menos la posición de impulsión de la unidad rotadora y/o la proporción de inclinación inercial y/o el ángulo de inclinación de la grúa. Estos parámetros se pueden medir mediante ciertos medios instalados en la estructura de la grúa. Por ejemplo, la posición de impulsión del rotador se puede medir mediante cualquier codificador incremental. Ya que el codificador de incremento da una señal de medición confiable, la velocidad de impulsión se puede calcular mediante la diferenciación discreta de la posición de impulsión. Adicionalmente, se puede instalar un giroscopio en el gancho, en particular la carcasa del gancho, para medir la velocidad de inclinación inercial del gancho. Dicha medición del giroscopio se puede afectar por un sesgo de la señal y un ruido del sensor. El ángulo de inclinación de la grúa se puede medir mediante otro sensor, por ejemplo, un codificador de incremento instalado en el mecanismo giratorio.

20

25

Adicionalmente, la longitud de la cuerda se puede medir precisamente y la longitud del esparcidor utilizado para agarrar un contenedor se puede derivar de una señal de accionamiento del esparcidor. Puede ser posible calcular el radio de giro de la longitud del esparcidor.

30

Una buena calidad para la estimación del estado del sistema se logra al utilizar un observador de estado de un tipo Luenberger. Sin embargo, cualquier otro tipo de observador de estado puede ser aplicable.

35

El observador de estado se puede ejecutar sin el uso de un filtro Kalman ya que el modelo para caracterizar las dinámicas de inclinación es independiente de la masa de la carga y/o el momento de inercia de la masa de la carga.

40

Como se describió anteriormente, los sistemas conocidos de los documentos DE 100 29 579 y DE 10 2006 033 277 A1 emplean un observador de estado que requiere la segunda derivada de una medición de posición. Tal doble diferenciación es desventajosa debido a la amplificación del ruido. De acuerdo con un aspecto preferido de la presente invención, el sistema de coordenadas utilizado para describir el estado del sistema tiene que ser cambiado en una proporción tal que la presente invención no requiera doble diferenciación.

45

Es ventajoso cuando el generador de trayectoria de referencia calcula una trayectoria de estado nominal y/o una trayectoria de entrada nominal que es consistentes con las dinámicas de la grúa, es decir, las dinámicas de inclinación y/o las dinámicas de impulsión del rotador y/o el movimiento medido de la torre de la grúa. La consistencia con los mecanismos de inclinación significa que la trayectoria de referencia cumple la ecuación diferencial de las dinámicas de inclinación y no viola las restricciones de deflexión de inclinación. La consistencia con las dinámicas de impulsión significa que la trayectoria de referencia cumple la ecuación diferencial de las dinámicas de impulsión y no viola ni las restricciones de la velocidad de impulsión ni las restricciones de torque de impulsión.

50

Una generación del estado nominal y la trayectoria de entrada se efectúan preferiblemente al utilizar el modelo no lineal para las dinámicas de inclinación. Es decir que una simulación del modelo dinámico de inclinación lineal y/o una simulación del modelo de unidad del rotador es o se implementa en el generador de trayectoria de referencia para el cálculo de la trayectoria de estado nominal y/o una trayectoria de entrada nominal consistente con las dinámicas de la grúa anteriormente mencionada.

55

Adicionalmente es preferible un bloque de desacoplamiento de afectación del generador de trayectoria de referencia que desacople las dinámicas de inclinación de las dinámicas de inclinación de la grúa. Es decir que los mecanismos de inclinación pueden aún ser manualmente controlados por el operador de la grúa durante el control de inclinación activo. Lo mismo puede aplicar a las dinámicas del mecanismo orzado. Consecuentemente, el control del ángulo de inclinación se puede desacoplar del mecanismo de inclinación y/o el mecanismo de orzado de la grúa.

60

En una realización particular preferida de la presente invención, el generador de trayectoria de referencia posibilita a un operador la rotación semiautomática disparada de la carga de un ángulo predefinido, en particular de aproximadamente 90° y/o 180°. Es decir que la unidad de control ofrece ciertas opciones de entrada al operador que procederá a una

65

rotación semiautomáticamente / inclinación de la carga unida en un cierto ángulo, idealmente 90° y/o 180° en el sentido de las manecillas del reloj y/o en la dirección contraria a las manecillas del reloj. El operador puede simplemente oprimir un botón predefinido sobre una barra de control para disparar una rotación / inclinación automática de la carga en donde el control de inclinación activo de la unidad de inclinación evita las oscilaciones torsionales durante los movimientos de inclinación.

La presente invención además está dirigida a un sistema de control de inclinación para controlar la orientación de una carga de grúa utilizando uno cualquiera de los métodos descritos anteriormente. Tal unidad de control de inclinación puede incluir un control 2-DOF para el ángulo de inclinación. El sistema de control de inclinación puede incluir un generador de trayectoria de referencia y/o un observador de estado y/o una unidad de control para controlar la señal de control de una unidad rotadora y/o el mecanismo de inclinación y/o el mecanismo de orzado.

La presente invención además comprende una grúa de pescante, especialmente una grúa de puerto móvil, que comprende una unidad de control de inclinación que controla la rotación de la carga de la grúa utilizando cualquiera de los métodos descritos anteriormente. Tal grúa comprende un gancho suspendido sobre cuerdas, una unidad rotadora y un manipulador.

De manera Ventajosa, la grúa también comprenderá un sistema de control anti vaivén que interactúa con el sistema para controlar la rotación de una grúa. La grúa también puede comprender un pescante que pueda ser pivotado hacia arriba y hacia abajo alrededor de un eje horizontal y rotado alrededor de un eje vertical por una torre. Adicionalmente, la longitud de la cuerda puede variar.

Ventajas y propiedades adicionales de la presente invención se describen sobre la base de las realizaciones mostradas en las figuras. Las figuras muestran:

La Fig. 1: muestra una vista lateral y una vista superior de una grúa de puerto móvil,

La Fig. 2: una vista frontal de las cuerdas de la grúa, un dispositivo rotador de carga, el esparcidor y el contenedor,

La Fig. 3: una revisión de los diferentes modos de operación para el control rotador durante el transbordo del contenedor,

La Fig. 4: una vista lateral de una palanca de mando con botones de palanca de mano para el control de inclinación,

La Fig. 5: una vista superior de la geometría y las variables del modelo de las dinámicas de inclinación,

La Fig. 6: una ilustración del modelo cuboide de la carga,

La Fig. 7: un esbozo de la punta del pescante, las cuerdas y el gancho en una situación deflectada,

La Fig. 8: una vista lateral de un gancho de grúa con los componentes instalados,

La Fig. 9: es un esquema para los dos grados de control de libertad del ángulo de inclinación,

La Fig. 10: un diagrama que divulga la región de estabilidad del bucle cerrado,

La Fig. 11: una gráfica de flujo de señal para determinar la velocidad objetivo,

LA Fig. 12: el resultado de la medición de la rotación del mecanismo de inclinación de 90° y

La Fig. 13: los resultados de la medición para demostrar el uso de la función semiautomático de giro del contenedor.

Las grúas de pescante son a menudo utilizadas para manejar procesos de transbordo de carga en puertos. Tales grúas móviles de puerto se muestran en la Fig. 1. La grúa tiene una capacidad de carga de hasta 124t y la longitud de la cuerda de hasta 80m. Sin embargo, la invención no está restringida a una estructura de grúa con las propiedades mencionadas. La grúa comprende un brazo 1 que se puede pivotar hacia arriba y hacia abajo alrededor de un eje horizontal formado por los ejes 2 de bisagra con los cuales este se une a una torre 3. La torre 3 se puede rotar alrededor de un eje vertical, de esta manera también rotando el brazo 1 con este. La torre 3 se monta sobre una base 6 sobre ruedas 7. La longitud de la cuerda 8 puede variar por los cabrestantes. La carga 10 se puede agarrar por un manipulador o esparcidor 20, que puede ser rotado por una unidad 15 rotadora montada en un gancho suspendido sobre la cuerda 8. La carga 10 es rotada al rotar la torre y de esta manera la grúa completa, o al utilizar la unidad 15 rotadora. En la práctica, ambas rotaciones tienen que ser utilizadas simultáneamente para orientar la carga en una posición deseada.

La figura 2 divulga una vista lateral detallada del contenedor 10 agarrado por el esparcidor 20. El esparcidor 20 se une al gancho 30 por medio de una bisagra 31 que es rotable con relación al gancho 30. El gancho 30 se une a las cuerdas 8 de la grúa. Una vista detallada del gancho 30 se describe en la Figura 8. La unidad rotadora que efectúa un movimiento rotacional del esparcidor unido con relación al gancho 30 comprende un impulsor que incluye el motor 32 rotador y la

unidad 33 de transmisión. Una línea 37 de energía conecta el motor 32 al suministro de energía de la grúa. El gancho 30 además comprende un sensor 34 con proporción de inclinación inercial (giroscopio) y un sensor 35 de posición de impulsión (codificadores de incremento). Un espaciador se puede conectar a los medios 38 de unión.

5 Por simplicidad, solo la rotación de una carga suspendida sobre una grúa de otra manera estacionaria será discutida aquí. Sin embargo, el concepto de control de la presente invención puede ser fácilmente integrado en un concepto de control de la grúa completa.

10 La presente invención presenta las dinámicas de inclinación sobre una grúa de pescante a lo largo de un modelo accionador y una configuración del sensor. Posteriormente, se deriva un concepto de control de dos grados de libertad que comprende un observador de estado para las dinámicas de inclinación, un generador de trayectoria de referencia y una ley de control de realimentación. El sistema de control se implementó en una grúa de puerto móvil Liebherr y su efectividad se validó con múltiples unidades de prueba.

15 Las novedades de esta publicación incluyen la aplicación del modelo dinámico de inclinación no lineal en un sistema de control 2-DOF sobre grúas de pescante, el método de cálculo de trayectoria de referencia en tiempo real que soporta los modos de operación tal como la transferencia perpendicular de los contenedores, y la validación experimental sobre unas grúas de puerto con una capacidad de carga de 124 t.

20 2. Modos de operación del rotador

En esta sección, se discuten los modos de operación típicos para la rotación de un contenedor durante el transbordo de contenedores.

25 En la mayoría de los puertos, los contenedores 10 son movidos desde un buque 40 de contenedores a la costa 50 sin rotación. Esto se denomina comúnmente transferencia paralela; ver la Figura 3 (a). Sobre los muelles 51 delgados ("muelles de dedo"), sin embargo, los contenedores 10 requieren ser rotados 90° para permitir el transporte adicional utilizando apiladores de alcance. Tal transferencia perpendicular se describe en la Figura 3 (b). Cuando los contenedores 10 son transferidos a camiones o los vehículos guiados automatizados (AGV) (numeración 41 de referencia), la grúa debe ajustarse precisamente al ángulo de inclinación del contenedor a la orientación del camión. Ya que las puertas 11 del contenedor deben estar en el extremo trasero del camión 41, los contenedores 10 son algunas veces girados 180°. Estos procesos se muestran en la Figura 3 (c).

35 La figura 4 muestra una de las palancas de mano del operador de grúa. Dos botones 60, 61 de palanca de mano se utilizan para adaptar la orientación del esparcidor en la dirección de las manecillas del reloj al oprimir el botón 60 o en la dirección contraria de las manecillas del reloj al oprimir el botón 61. El estado de la técnica es que oprimir uno de estos botones induce un movimiento relativo entre el gancho y el esparcidor en la dirección deseada. Cuando no se presiona ningún botón, la velocidad relativa entre el gancho y el esparcidor es forzada a cero, o el accionador se establece en un torque cero. En ambos casos, el movimiento de carga no se detendrá cuando el operador libere los botones de la palanca de mano, pero cualquier oscilación residual no amortiguada del esparcidor permanecerá, o el esparcidor permanecerá en rotación constante. En ambos casos, el propio operador tiene que compensar las afectaciones debido al viento, el movimiento giratorio de la grúa, las fuerzas de fricción, etc.

45 Cuando el control de inclinación automático se posibilita en una grúa, se debe utilizar la misma interfaz de usuario. Esto significa que el operador debe controlar el movimiento del esparcidor utilizando solamente dos de los botones de la palanca de mano. Cuando no existe entrada del operador, el ángulo de inclinación debe mantenerse constante para permitir la transferencia paralela de los contenedores. Esto significa que ambas afectaciones conocidas (por ejemplo, movimiento giratorio) y las afectaciones desconocidas (por ejemplo fuerza del viento) requieren ser compensadas. Presiones de botón de tiempo corto producirán pequeños cambios de orientación para permitir la ubicación precisa. Cuando un botón se mantiene presionado o empujado durante largos periodos, el contenedor se acelera a una velocidad objetivo constante, y es desacelerada de nuevo una vez que el botón se libera. La velocidad objetivo se selecciona de tal manera que la distancia de frenado es lo suficientemente pequeña para asegurar condiciones de trabajo seguras (la distancia de frenado) no debe exceder 45°). Para simplificar la transferencia perpendicular de los contenedores o 180° de rotación del contenedor, el movimiento de inclinación debe detenerse automáticamente a un ángulo dado (90° o 180°) aún si el operador mantiene el botón presionado.

3 Modelo rotador de grúa

60 De acuerdo con la invención, se deriva un modelo dinámico para el ángulo de inclinación. Como se muestra en la Figura 5, el ángulo de inclinación de la carga en coordenadas inerciales se denomina como η_L . La carga puede ser un esparcidor 20 vacío o un esparcidor 20 con el contenedor 10 enganchado en este. El ángulo de inclinación de la grúa se denota como φ_D , y el ángulo relativo entre el dispositivo rotador y la carga es φ_C . Las direcciones de los ángulos se definen como se muestra en la Figura 5. La subsección 3.1 introduce un modelo dinámico de dinámicas de inclinación, es decir, una ecuación diferencial para el ángulo de inclinación η_L . Un modelo de impulsión para el ángulo rotador φ_C es dado en la Subsección 3.2. Finalmente, las señales del sensor disponibles se presentan en la Subsección 3.3.

3.1 Dinámica de rotación de la carga

En esta sección, se deriva un modelo para las dinámicas de oscilación del ángulo de inclinación inercial η_L . Las figuras 2, 5 y 6 visualizan los ángulos y las longitudes que aparecen en la derivación.

El esparcidor (con o sin un contenedor) se asume que es un cuboide uniforme de dimensiones $k_1 \times k_2 \times k_3$ con la masa m_L (ver Figura 6). El tensor de inercia del cuboide es entonces

$$\mathbf{I} = \frac{1}{12} m_L \begin{bmatrix} k_2^2 + k_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & k_1^2 + k_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & k_1^2 + k_2^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Con la posición h_L , vertical, la posición x_L, y_L horizontal y las proporciones de rotación β, γ, δ , y la aceleración g gravitacional, la energía potencial v y la energía cinética τ del contenedor son:

$$V = m_L g h_L, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_L [\dot{h}_L^2 + \dot{x}_L^2 + \dot{y}_L^2] + \frac{1}{2} [\dot{\beta} \quad \dot{\gamma} \quad \dot{\delta}] \mathbf{I} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} m_L [\dot{h}_L^2 + \dot{x}_L^2 + \dot{y}_L^2] + \frac{1}{24} m_L [(k_2^2 + k_3^2) \dot{\beta}^2 \\ &\quad + (k_1^2 + k_3^2) \dot{\gamma}^2 + (k_1^2 + k_2^2) \dot{\delta}^2]. \end{aligned} \quad (3)$$

Tanto (2) como (3) se combinan al Lagrangian

$$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V}.$$

Con el fin de aplicar la ecuación de Euler – Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\eta}_L} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \eta_L}, \quad (4)$$

se debe identificar qué los términos en (2) y (3) dependen del ángulo de inclinación η_L o su derivada $\dot{\eta}_L$:

- La posición h_L de carga vertical depende de η_L : cuando el contenedor rota alrededor del eje vertical, este es ligeramente levantado hacia arriba debido a la suspensión del cable. La dependencia exacta se deriva en lo siguiente.
- Ya que una rotación de la carga no mueve el centro de gravedad de la carga horizontalmente, las coordenadas de posición de la carga horizontal x_L y y_L no dependen de η_L .
- En condiciones de operación de grúa típicas, los ángulos γ y δ de carga son muy pequeños. Esto significa que el ángulo β coincide con la orientación η_L del contenedor. Ya que γ y δ son ortogonales a β , ellos no dependen de η_L .

El lagrangian puede por lo tanto ser representado como:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m_L \dot{h}_L^2 + \frac{1}{24} m_L \underbrace{(k_2^2 + k_3^2)}_{k_L^2} \dot{\eta}_L^2 - m_L g h_L. \quad (5)$$

Con el fin de aplicar (4) a (5), la altura h_L de carga relativa requiere ser escrita como una función de la deflexión del rotador (es decir, un ángulo de giro $\hat{\phi} = \eta_L - \varphi_C - \varphi_D$). La Figura 7 muestra el rotador en un estado deflectado. La fórmula del coseno para el triángulo A es:

$$s_x^2 = \left(\frac{s_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{2}\right)^2 - 2\frac{s_a}{2}\frac{s_b}{2}\cos(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D). \quad (6)$$

5

Con s_x conocido, las consideraciones geométricas en el triángulo B revelan

$$-h_L = \sqrt{L^2 - s_x^2}, \quad (7)$$

10

Que producen:

$$h_L = -\sqrt{L^2 - \frac{s_a^2}{4} - \frac{s_b^2}{4} + \frac{s_a s_b}{2}\cos(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D)}. \quad (8)$$

15

Utilizando (5) y (8), el formalismo (4) de Euler-Lagrange produce la ecuación (9) diferencial que describe las dinámicas de inclinación

$$\kappa_L^2 m_L \ddot{\eta}_L + \frac{m_L s_a^2 s_b^2 \xi_2^2}{4\xi_1} (\ddot{\eta}_L - \ddot{\varphi}_C - \ddot{\varphi}_D) = \underbrace{-\frac{m_L s_a^2 s_b^2 \xi_2 \xi_4^2}{4\xi_1} \left(\frac{s_a s_b \xi_2^2}{\xi_1} + \xi_3\right)}_* - \underbrace{\frac{m_L g s_a s_b \xi_2}{2\sqrt{\xi_1}}}_{\blacksquare} \quad (9a)$$

20

Con

$$\xi_1 = 4L^2 - s_a^2 - s_b^2 + 2s_a s_b \xi_3 \quad (9b)$$

$$\xi_2 = \sin(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D) \quad (9c)$$

$$\xi_3 = \cos(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D) \quad (9d)$$

$$\xi_4 = \dot{\varphi}_C + \dot{\varphi}_D - \dot{\eta}_L \quad (9e)$$

25

Las siguientes presunciones se utilizan para simplificar la ecuación (9):

- Las distancias de la cuerda son significativamente más pequeñas que la longitud de la cuerda: $s_a \ll L$, $s_b \ll L$.
- El término marcado como * se puede despreciar cuando se compara con el término marcado como ■: aun para longitudes de cuerda corta ($L_{\min} \approx 5\text{m}$) y las proporciones rotacionales altas tasas de rotación ($|\xi_4|_{\max} \approx 0.8^{\text{rad}} / \text{s}$)

30

$$\frac{s_a s_b}{L} \xi_4^2 \leq \frac{s_a s_b}{L_{\min}} |\xi_4|_{\max}^2 \approx 0.5 \text{m/s}^2 \ll g, \text{ se mantiene}$$

- Debido a la inercia rotacional que está representada por el radio de giro k_L que se definió en (5), la inercia traslacional es despreciable:

$$\frac{1}{16} m_L \frac{s_a^2 s_b^2}{L^2} \ll m_L k_L^2 .$$

5 Con estas presunciones, las dinámicas (9) de inclinación se pueden denotar como

$$m_L k_L^2 \ddot{\eta}_L = - \underbrace{m_L \frac{g s_a s_b}{L 4} \sin(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D)}_T . \quad (10)$$

10 El lado a mano derecha de (10) es el torque T ejercido sobre la carga. El producto de las distancias de la mitad de la cuerda se abrevia como

$$A = \frac{s_a s_b}{4} \quad (11)$$

15 que es un parámetro que es conocido de la geometría de la grúa. Combinar (10) y (11) produce el modelo de las dinámicas de inclinación

$$\ddot{\eta}_L = - \frac{g A}{L k_L^2} \sin(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D) . \quad (12)$$

20 La ecuación (12) ilustra que la frecuencia natural de estas dinámicas es independiente de la masa de la carga, es decir, solo depende de la geometría y de la aceleración gravitacional. También, (12) ilustra que no es razonable dejar el rango de deflexión.

$$-\frac{\pi}{2} \leq \eta_L - \varphi_C - \varphi_D \leq \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

25 ya que deflexiones mayores no producen torques mayores.

3.2 Modelo de accionador

30 El dispositivo de inclinación rota el esparcidor con respecto al gancho (ver Figura 8). El ángulo relativo se denota como φ_C . Si el rotador es hidráulicamente accionado la señal u de control puede ser una posición de válvula que es proporcional a la velocidad del rotador. Si el rotador es eléctricamente accionado la señal u de control puede ser un punto establecido de la proporción de rotación. Asumiendo las dinámicas de desfase de primer orden con una constante de tiempo T_s , las dinámicas del accionado se pueden denotar como:

$$T_s \ddot{\varphi}_C + \dot{\varphi}_C = u . \quad (14)$$

35

El sistema de accionador está sometido a dos restricciones. Primero, la señal de control u no puede exceder los límites dados:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} . \quad (15)$$

40

Segundo, el sistema de impulsión está limitado en torque y/o presión y/o corriente, por lo tanto, solamente un cierto torque de inclinación T_{\max} se puede aplicar a los accionadores. Considerando (10), la restricción del torque de inclinación es:

$$\left| m_L \frac{g}{L} A \sin(\eta_L - \varphi_C - \varphi_D) \right| \leq T_{\text{máx}} \quad (16)$$

5 La restricción es importante para la generación de trayectoria ya que el sistema se desviará inevitablemente de la trayectoria de referencia si se viola la restricción.

3.3 Modelos del sensor

10 Existen dos sensores instalados en la carcasa del gancho (ver Figura 8). Un codificador de incremento se utiliza para medir la posición de impulsión

$$y_1 = \varphi_C \quad (17)$$

15 Ya que el codificador de incremento da una señal de medición confiable, la velocidad $\dot{\varphi}_C$ de impulsión se encuentra mediante diferenciación discreta de la posición de impulsión. Para medir las dinámicas de inclinación, se instala un giroscopio en la carcasa del gancho, que mide la proporción de inclinación inercial. La medición del giroscopio se afecta por un sesgo de la señal y el ruido del sensor:

$$y_2 = \dot{\eta}_L - \dot{\varphi}_C + \nu_{\text{desfase}} + \nu_{\text{ruido}} \quad (18)$$

20

El ángulo de giro de la grúa también se mide mediante un codificador de incremento (ver figura 5):

$$y_3 = \varphi_D \quad (19)$$

25 Adicionalmente, la longitud L de la cuerda de la grúa se mide precisamente, y la longitud L_{spr} del esparcidor es conocida de la señal de accionamiento del esparcidor (ver Figura 2). Desde la longitud del esparcidor, se puede calcular el radio de giro k_L . Para el cálculo del radio de giro, las siguientes partes tienen que ser tenidas en cuenta:

- el gancho de la grúa, que sin embargo da muy poca inercia rotacional,
- el esparcidor vacío, que tiene una distribución de masa dependiente de la longitud que es conocida del fabricante del esparcidor,
- si se une, el recipiente de acero, cuya distribución de masa (dependiente de la longitud) es conocida de los experimentos de identificación,
- si está presente, la carga dentro del contenedor, que se asume simplemente como igualmente distribuida sobre el espacio de piso del contenedor (dependiente de la longitud)

35

La medición de la carga de la grúa solo se utiliza para decidir si el contenedor tiene que ser tenido en cuenta para el cálculo del radio de giro k_L .

40 4 Concepto de control

Para el control de la inclinación, se utiliza control de dos grados de libertad como se muestra en la Figura 9. Esto significa que la señal u del control comprende una señal \tilde{u} de compensación de un generador de trayectoria de referencia y una señal Δu de retroalimentación para estabilizar el sistema y rechazar las afectaciones:

45

$$u = \tilde{u} + \Delta u \quad (20)$$

La señal \tilde{u} de control de compensación se designa de tal manera que este impulsa el sistema a lo largo de la trayectoria de referencia \tilde{x} bajo condiciones nominales. Cualquier desviación del estado del sistema estimado \hat{X} al estado \tilde{x} de referencia compensada por la señal Δu de retroalimentación que utiliza el vector k^T de ganancia de retroalimentación:

50

$$\Delta u = k^T (\bar{x} - \hat{x}). \quad (21)$$

El estado x del sistema comprende un ángulo φ_C rotador, la proporción φ_C angular rotadora, el ángulo de inclinación η_L y la proporción angular de inclinación $\dot{\eta}_L$:

$$x = \begin{bmatrix} \varphi_C \\ \dot{\varphi}_C \\ \eta_L \\ \dot{\eta}_L \end{bmatrix}. \quad (22)$$

En la Sección 4.1, se presenta un observador de estado que encuentra el estimado de \hat{X} de estado para el estado x del sistema real utilizando las señales de medición. El diseño de la ganancia k^T de retroalimentación se discute en la Sección 4.2. Finalmente, el generador de trayectoria de referencia que calcula \tilde{u} y \tilde{x} se muestra en la Sección 4.3.

4.1 Observador de estado

El objetivo del observador de estado es estimar aquellos estados del vector (22) de estado que no se pueden medir o cuyas medidas están demasiado afectadas para ser utilizadas como señales de retroalimentación. Ambos estados de las dinámicas del accionador se miden utilizando un codificador de incremento. Esto significa que φ_C y $\dot{\varphi}_C$ son conocidos y no requieren ser estimados. Los dos estados de las dinámicas de inclinación, el ángulo η_L de inclinación y su velocidad $\dot{\eta}_L$, angular no son directamente medibles. Ellos se estiman utilizando un observador de estado tipo Luenberger. La medición (18) del giroscopio se utiliza como señal de retroalimentación para el observador. Ya que la medición del giroscopio lleva un desfase v_{desfase} de señal, un modelo de observador aumentado se introduce para el diseño del observador, es decir, el vector z_s de estado del observador comprende el ángulo η_L de inclinación, la proporción $\dot{\eta}_L$ de inclinación y el desfase v_{desfase} de señal y la proporción v_{holgura} de inclinación causada por la permisividad del gancho y la derivada \dot{v}_{holgura} de tiempo del mismo:

$$z_s = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_L \\ \dot{\eta}_L \\ v_{\text{desfase}} \\ v_{\text{holgura}} \\ \dot{v}_{\text{holgura}} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Las dinámicas nominales de z_s se encuentra al combinar (12) con un modelo de desfase de caminata aleatoria:

$$\dot{z}_s = \begin{bmatrix} z_2 \\ -\frac{g}{L} \frac{A}{k_c^2} \sin(z_1 - \varphi_C - \varphi_D) \\ 0 \\ z_5 \\ -\left(\frac{2\pi}{1s}\right)^2 z_4 \end{bmatrix}, \quad (24a)$$

$$y_2 = z_2 - \dot{\varphi}_C + z_3 + z_4. \quad (24b)$$

El observador se encuentra al agregar un término Luenberger a (24). El vector de estado estimado se denota como \hat{z}_s . Las señales φ_C , φ_D y $\dot{\varphi}_C$ son tomadas de las mediciones (17) y (19):

$$\dot{\hat{z}}_S = \begin{bmatrix} -\frac{g}{Lk_L^2} \sin(\hat{z}_1 - y_1 - y_3) \\ 0 \\ \hat{z}_5 \\ -\left(\frac{2\pi}{1s}\right)^2 \hat{z}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \end{bmatrix} (y_2 - \hat{y}_2), \quad (25a)$$

$$\hat{y}_2 = \hat{z}_2 - \hat{y}_1 + \hat{z}_3 + \hat{z}_4. \quad (25b)$$

5 Las ganancias l_1, l_2, l_3, l_4 y l_5 de retroalimentación se encuentran al ubicar el mástil para asegurar los tiempos de convergencia requeridos después de situaciones con el desajuste del modelo. Un ejemplo típico para desajuste de modelo es una colisión con un obstáculo estacionario (por ejemplo, otro contenedor). Para el procedimiento de ubicación de mástil, se utiliza una linealización del punto establecido del modelo del observador.

10 Del vector \hat{z}_S de estado estimado, el ángulo de inclinación estimado y la proporción de inclinación son enviadas al control 2-DOF, junto con las mediciones de estado del accionador. El desfase del giroscopio estimado no se considera adicional:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

4.2 Estabilización

15 Ya que tanto las dinámicas de inclinación (12) como las dinámicas (14) del accionador tienen mástiles de bucle abierto en el eje imaginario, cualquier afectación (por ejemplo, viento) o error en el estimado de estado inicial originará unas desviaciones que no se desvanecen entre la trayectoria \bar{x} y la trayectoria x del sistema. El control de retroalimentación se agrega para asegurar que el sistema converge a la trayectoria de referencia (ver Figura 9). El control de retroalimentación se logra al calcular el error de control

$$e = \bar{x} - x \quad (27)$$

25 Y diseñar la ganancia k^T de retroalimentación con

$$k^T = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4] \quad (28)$$

30 para la ecuación (21) de tal manera que el error de control es asintóticamente estable. Para el diseño de retroalimentación, se considera la linealización del punto establecido. Posteriormente se verifica que la ley de retroalimentación estabiliza el modelo de sistema no lineal.

Asumiendo que tanto la trayectoria de referencia como las dinámicas de planta cumplen con las ecuaciones (12) y (14) del modelo, las dinámicas de error se pueden encontrar al diferenciar (27) e ingresar las ecuaciones modelo:

$$\dot{e} = \dot{\bar{x}} - \dot{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_2 \\ -\frac{1}{T_S} (\bar{x}_2 - \bar{u}) \\ \bar{x}_4 \\ -\frac{gA}{Lk_L^2} \sin(\bar{x}_3 - \bar{x}_1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{T_S} (x_2 - u) \\ x_4 \\ -\frac{gA}{Lk_L^2} \sin(x_3 - x_1) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

35 Junto con las ecuaciones (20), (21) y (28), de control, y asumiendo los trabajos de estimación de estado suficientemente bien ($\hat{x} = x$), la linealización del punto establecido de (29) es

40

$$\dot{e} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{T_S} & -\frac{1+k_2}{T_S} & -\frac{k_3}{T_S} & -\frac{k_4}{T_S} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{g}{L} \frac{A}{k_L^2} & 0 & -\frac{g}{L} \frac{A}{k_L^2} & 0 \end{bmatrix}}_{\Phi} e. \quad (30)$$

Con la abreviatura,

$$\theta = \frac{g}{L} \frac{A}{k_L^2},$$

el polinomio característico de la matriz Φ dinámica es:

5

$$\det(\lambda I - \Phi) = \frac{(k_1 + k_3)\theta + (k_2 + k_4 + 1)\theta\lambda + (k_1 + T_S\theta)\lambda^2 + (k_2 + 1)\lambda^3 + T_S\lambda^4}{T_S} \quad (31)$$

10

Para cualquiera de los parámetros θ y T_S , las ganancias k_1, \dots, k_4 de retroalimentación se pueden seleccionar de tal manera que (31) es un polinomio Hurwitz. Las ganancias de retroalimentación finales se pueden seleccionar mediante varios métodos. Una herramienta gráfica son las gráficas de estabilidad. Por ejemplo, la región de estabilidad para $k_2 = k_3 = 0$ se describen en la Figura 10, que muestran las restricciones sobre la selección de los coeficientes k_1 y k_4 restantes para este caso.

15

4.3 Generación de Trayectoria de Referencia

Como se muestra en la Figura 9, el generador de trayectoria de referencia requiere calcular una trayectoria \bar{x} de estado nominal, así como la trayectoria \bar{u} de entrada nominal que se considera con las dinámicas de la planta. Ya que el sistema de inclinación es controlado por el operador, la trayectoria de referencia requiere ser planeada en línea en tiempo real.

20

La estructura general es conocida la cual utiliza una simulación de planta para generar una trayectoria de estado de referencia y cualquier ley de control arbitraria para generar una entrada de control para la simulación de la planta. La entrada de control para la planta simulada se utiliza entonces como una señal de control nominal para el sistema real. Con el fin de adaptar esta aproximación al problema del control de inclinación, las simulaciones del modelo de accionador y el modelo de inclinación se ejecutan para generar una trayectoria de estado de referencia de una señal de entrada de referencia. En este diseño, el ángulo combinado

25

$$\tilde{\varphi}_{CD} = \tilde{\varphi}_C + \varphi_D \quad (36)$$

30

Se utiliza en lugar del ángulo φ_C del accionador y el ángulo φ_D del engranaje giratorio primeramente. Las dos variables son posteriormente desacopladas como se discute en la Sección 4.3.3. El resto de esta sección discute la ley de control que se utiliza para estabilizar la simulación de la planta. Ya que la frecuencia de corte de las dinámicas del accionador es significativamente más rápida que la frecuencia natural de las dinámicas de inclinación, se aplica el control de cascada dentro del planeador de trayectorias de referencia. Esto significa que un controlador de referencia de inclinación se configura para estabilizar las dinámicas de inclinación simuladas, y se utiliza un controlador de referencia de accionador subyacente para estabilizar las dinámicas del accionador simulado. El valor objetivo de los bucles de control de inclinación es la velocidad objetivo $\dot{\theta}_L$, objetivo del operador, y el valor objetivo del bucle de control accionador subyacente viene del bucle de control de inclinación. Un bloque de desacoplamiento de afectación se agrega para desacoplar las dinámicas de inclinación de las dinámicas de giro de la grúa, es decir, reversión (36). Finalmente, la desaceleración automática en las restricciones de posición después de 90° o 180° de movimiento se hacen efectivas mediante la modificación de la velocidad objetivo para el bucle de control de referencia completo.

35

40

El bucle de control de referencia de inclinación se explica en la Subsección 4.3.1, seguido por el bucle de control de referencia del accionador en la subsección 4.3.2. Posteriormente, el desacoplamiento del movimiento del mecanismo de giro se muestra en la Subsección 4.3.3. Finalmente, la determinación de la velocidad objetivo se discute en la Subsección 4.3.4.

45

4.3.1 Controlador de referencia de inclinación

El objetivo del controlador de referencia de inclinación es estabilizar la simulación de las dinámicas de inclinación

50

$$\ddot{\eta}_L = -\frac{gA}{Lk_L^2} \sin(\tilde{\eta}_L - \tilde{\varphi}_{CD}) \quad (37)$$

y para asegurar que esta sigue la velocidad objetivo $\dot{\tilde{\eta}}_{L, \text{objetivo}}$. Para este propósito, la ley de control

$$\tilde{\varphi}_{CD, \text{objetivo}} = \tilde{\eta}_L + \text{sat}_{\eta} \left(K_{\eta} \cdot (\dot{\tilde{\eta}}_{L, \text{objetivo}} - \dot{\tilde{\eta}}_L) \right) \quad (38)$$

se introduce con la función de saturación

$$\text{sat}_{\eta}(x) = \text{signo}(x) \cdot \min \left(\Delta\eta_{\text{máx}}, \arcsin \left(\frac{LT_{\text{máx}}}{gAm_L} \right), |x| \right). \quad (39)$$

La función de saturación asegura que la deflexión de la cuerda objetivo no excede la deflexión que corresponde al torque accionador máximo como en (16), ni el ángulo $\Delta\eta_{\text{máx}}$ de deflexión. La deflexión

, $\Delta\eta_{\text{máx}} < \frac{\pi}{2}$ Máxima asegura que la trayectoria de referencia no defleccione el gancho más allá del ángulo de torque máximo como en (13), y que existe un margen de seguridad razonable en el caso de desviación de control. Asumiendo $\tilde{\varphi}_{CD} \approx \tilde{\varphi}_{CD, \text{objetivo}}$, las dinámicas (37) de inclinación con la ley (38) de control se descomponen a

$$\ddot{\eta}_L = \frac{gA}{Lk_L^2} \sin \left(\text{sat}_{\eta} \left(K_{\eta} \cdot (\dot{\tilde{\eta}}_{L, \text{objetivo}} - \dot{\tilde{\eta}}_L) \right) \right) \quad (40)$$

Un análisis de estabilidad de (40) revela que para cualquier K_{η} positivo la proporción $\dot{\tilde{\eta}}_L$ de inclinación de la carga converge asintóticamente a cualquier velocidad $\dot{\tilde{\eta}}_{L, \text{objetivo}}$ constante. La ganancia K_{η} de retroalimentación se selecciona al ganar programación en dependencia a la frecuencia natural de la inclinación. Esta asegura una rápida convergencia con rebasamiento mínimo.

4.3.2 Controlador de referencia de accionador

El bucle de control subyacente consiste de la planta

$$\ddot{\tilde{\varphi}}_{CD} = \frac{\tilde{u}_{CD} - \tilde{\varphi}_{CD}}{T_S} \quad (41)$$

y el controlador de referencia del accionador que se diseña utilizando la siguiente aproximación de control predictivo del modelo. El controlador de referencia del accionador se diseña de tal manera que la función de coste

$$\min_{\tilde{u}_{CD}(t)} \int_0^{T_{\text{predicho}}} q_{\varphi} (\tilde{\varphi}_{CD} - \tilde{\varphi}_{CD, \text{objetivo}})^2 + q_{\tilde{u}} \tilde{u}_{CD}^2 + q_s s^2 dt \quad (42)$$

se minimiza. Aquí, $s \geq 0$ es una variable de flojedad que se introduce para asegurar el siguiente conjunto de entrada y las restricciones de estado son siempre factibles:

$$\tilde{u}_{CD}(t) \leq u_{\text{máx}}, \quad (43)$$

$$-\tilde{u}_{CD}(t) \leq -u_{\text{mín}}, \quad (44)$$

$$\tilde{\varphi}_{CD}(t) - s(t) \leq \tilde{\eta}_L + \text{sat}_{\eta}(\infty), \quad (45)$$

$$-\tilde{\varphi}_{CD}(t) - s(t) \leq -\tilde{\eta}_L + \text{sat}_{\eta}(\infty). \quad (46)$$

Las restricciones (43) - (44) de entrada aseguran que las limitaciones (15) de la válvula no se violan. Las restricciones de estado (45) - (46) se utilizan para evitar el rebasamiento restante con respecto a la restricción (39) de deflexión del gancho.

5

El problema (42) - (46) de control óptimo se hace discreto y se resuelve utilizando un método de punto interior.

4.3.3 Desacoplamiento de afectación

10

Hasta ahora, se calcularon los valores de referencia para el ángulo $\tilde{\varphi}_{CD}$ combinado. Como se define en (36), $\tilde{\varphi}_{CD}$ comprende el ángulo rotador y el ángulo del mecanismo de rotación. Sin embargo, el planeador de trayectoria de referencia requiere calcular una trayectoria nominal para el ángulo $\tilde{\varphi}_C$ del rotor solamente. Ya que el movimiento del mecanismo giratorio de la grúa, es conocido para el sistema de control de la grúa este puede ser fácilmente desacoplado utilizando las siguientes fórmulas:

15

$$\tilde{\varphi}_C = \tilde{\varphi}_{CD} - \varphi_D, \quad (47a)$$

$$\dot{\tilde{\varphi}}_C = \dot{\tilde{\varphi}}_{CD} - \dot{\varphi}_D, \quad (47b)$$

$$\tilde{u} = \tilde{u}_{CD} - (\dot{\varphi}_D + T_S \ddot{\varphi}_D). \quad (47c)$$

20

La ecuación (47a) revierte directamente (36). La ecuación (47b) se encuentra al hacer la diferencia (47a), y (47c) se encuentra mediante una diferenciación adicional, al aplicar el modelo (14) accionador así como también (41).

4.3.4 Determinación de la velocidad objetivo

25

El operador solo puede empujar los botones del joystick de una manera prendido / apagado para operar el sistema de inclinación, es decir, la señal de palanca de mano es

$$\omega \in \{-1, 0, +1\}. \quad (48)$$

30

La velocidad objetivo $\tilde{\eta}_{L,\text{objetivo}}$ para el controlador de referencia de inclinación se encuentra al multiplicar la señal del botón del joystick con una velocidad máxima razonable:

$$\dot{\tilde{\eta}}_{L,\text{objetivo}} = \dot{\tilde{\eta}}_{L,\text{máx}} \cdot \omega. \quad (49)$$

35

Cuando el operador mantiene un botón de joystick presionado permanentemente, la velocidad $\dot{\tilde{\eta}}_{L,\text{objetivo}}$ es sobre escrita con 0 en algún punto para detener el movimiento de inclinación. El instante de tiempo del inicio para sobrescribir el botón del joystick con 0 se selecciona de tal manera que los sistemas vienen a descansar exactamente en el ángulo $\tilde{\eta}_{\text{parada}}$ de parada deseado. El ángulo $\tilde{\eta}_{\text{parada}}$ de parada es la aplicación seleccionada dependientemente. Para cambiar el lado frontal de un contenedor hacia atrás $\tilde{\eta}_{\text{parada}}$ se selecciona 180° después del punto de inicio. Para identificar el punto correcto en el tiempo para sobrescribir la señal de palanca de mano con 0, una simulación delantera de las dinámicas del generador de trayectoria se conduce en cada intervalo de muestreo con una velocidad objetivo de 0, produciendo una predicción del

40

ángulo de parada $\tilde{\eta}_{pred}$. Cuando esta proyección alcanza el ángulo $\tilde{\eta}_{parada}$ de parada deseado, se inhibe el movimiento adicional en esta dirección, es decir, (49) es reemplazado por:

$$\dot{\tilde{\eta}}_{L,objetivo} = \begin{cases} 0 & \text{si } \omega > 0 \wedge \tilde{\eta}_{predicho} \geq \tilde{\eta}_{parada} \\ 0 & \text{si } \omega < 0 \wedge \tilde{\eta}_{predicho} \leq \tilde{\eta}_{parada} \\ \dot{\tilde{\eta}}_{L,m\acute{a}x} \cdot \omega & \text{m\acute{a}s .} \end{cases} \quad (50)$$

5

Por motivos de claridad, el flujo de la señal de determinación de la velocidad objetivo completo se muestra en la Figura 11.

5 Validación experimental

10

Para validar la implementación práctica del sistema de control de inclinación presentado, se presentan dos experimentos en esta sección. Estos experimentos se seleccionaron para reflejar las condiciones operativas como se discutió en la Sección 2. Los experimentos fueron conducidos en una grúa de pescante Liebherr LHM 420.

15

5.1 Compensación del movimiento giratorio de la grúa

20

Cuando los contenedores se pueden mover desde el barco a la costa con un ángulo de inclinación constante, la característica más importante del sistema de control presentado es el desacoplamiento de las dinámicas de inclinación desde el mecanismo giratorio. La figura 12 muestra una medición de una rotación del mecanismo giratorio de 90°. Se puede ver que el dispositivo φ_C rotador se mueve inversamente al mecanismo φ_D , rotatorio, produciendo una orientación η_L de contenedor constante. La desviación del control es pequeña todo el tiempo. La gráfica de desviación de control muestra especialmente que el vaivén converge a amplitudes $\ll 1^\circ$ cuando el sistema queda en descanso.

25

5.2 Rotación angular Grande

30

Para demostrar el uso de la función de giro semiautomático del contenedor, se muestra otro ensayo en la Figura 13. La orientación del contenedor se muestra en la Figura 13a, la proporción angular se muestra en la Figura 13b y la desviación de control se grafica en la Figura 13c. Cuando el operador presiona el botón de rotación en la situación marcada como (α), el rotador inicia el movimiento y gira las cuerdas. Durante el movimiento, la velocidad del rotador iguala a la velocidad de carga. En la situación marcada como (β), el rotador se mueve en dirección inversa y desacelera la carga. El sistema entra en descanso después de 180° de rotación, lo que corresponde a la selección del ángulo $\tilde{\eta}_{parada}$ de parada durante este ensayo. La desaceleración en (β) se inicializa automáticamente, aunque el operador no libere el botón de rotación. En (γ) y (δ), el mismo movimiento ocurre en dirección opuesta.

35

6. Conclusión

40

Se ha presentado un modelo no lineal para las dinámicas de inclinación de un rotador de contenedor de una grúa de pescante y un sistema de control adecuado para las dinámicas de inclinación. El sistema de control se ejecuta en una estructura de dos grados de libertad que asegura la estabilización del ángulo de inclinación, desacoplando los movimientos del mecanismo giratorio y simplifica el control del operador. Una ley de control lineal se muestra para estabilizar el sistema mediante el uso del criterio del círculo. El estado del sistema se reconstruye desde la medición de proporción de inclinación utilizando un observador de estado de tipo Luenberger. La trayectoria de referencia para el sistema de control se calcula desde la entrada del operador en tiempo real utilizando una simulación del modelo de la planta. La simulación comprende las leyes de control apropiadas que aseguran que la trayectoria de referencia sigue la señal del operador y mantiene las restricciones del sistema. El desempeño del sistema de control se valida con los ensayos sobre una grúa de pescante móvil de tamaño completo de puerto.

45

REIVINDICACIONES

- 5 1. Método para controlar la orientación de una carga de grúa, en donde un manipulador para manipular la carga (10) se conecta a una unidad (15) de rotador a un gancho (30) suspendido sobre cuerdas (8) y un ángulo η_L de inclinación de la carga (10) se controla mediante una unidad de control de la grúa,
- Por medio de la cual,
- 10 la unidad de control es una unidad de control adaptativa en donde un estado del sistema estimado del sistema de grúa se determina mediante el uso de un modelo no lineal que describe las dinámicas de inclinación durante la operación caracterizada porque la no linealidad del modelo que describe las dinámicas de inclinación se refiere a la relación no lineal entre el ángulo de giro $\diamond = \eta_L - \varphi_C - \varphi_D$ y el torque T reactivo resultante, por medio del cual φ_C y φ_D respectivamente se refieren al ángulo entre la unidad (15) de rotador y la carga (10) y un ángulo de rotación de la grúa.
- 15 2. El método de acuerdo con la reivindicación precedente, caracterizada porque el modelo no lineal es independiente de la masa de la carga (10) o el momento de inercia de la masa de la carga (10).
- 20 3. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque el estado del sistema estimado incluye el ángulo de inclinación estimado y/o la velocidad del ángulo de inclinación y/o una o más oscilaciones parásitas del sistema de inclinación, por ejemplo, originado por la permisividad del gancho (30).
- 25 4. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizada porque la unidad de control se basa en un control de 2 grados de libertad que comprende el observador de estado para la estimación del estado del sistema, un generador de trayectoria de referencia para la generación de una trayectoria de referencia en respuesta a una entrada de usuario y una ley de control de retroalimentación para la estabilización del Modelo dinámico de inclinación no lineal.
- 30 5. El método de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el observador de estado recibe los datos de medición que comprenden al menos la posición de impulsión de la unidad (15) de rotador y/o la proporción de inclinación inercial y/o el ángulo de rotación de la grúa.
- 35 6. El método de acuerdo con la reivindicación 4 y 5 caracterizado porque el observador de estado es un observador de estado de tipo Luenberger.
- 40 7. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el observador de estado se ejecuta sin el uso de un filtro Kalman
8. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el generador de trayectoria de referencia calcula una trayectoria de estado nominal y/o una trayectoria de entrada nominal que es consistente con las dinámicas de inclinación y/o las dinámicas de impulsión rotadora y/o el movimiento medido de la torre de la grúa
- 45 9. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8 que caracterizada porque una simulación del modelo dinámico de inclinación no lineal y/o una simulación del modelo de la unidad (15) de rotador es/son ejecutados en el generador de trayectoria de referencia para el cálculo de la trayectoria de estado nominal y/o una trayectoria de entrada nominal consistente con las dinámicas de la grúa.
- 50 10. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4 a 9, caracterizado porque un bloque de desacoplamiento de afectación del generador de trayectoria de referencia desacopla las dinámicas de inclinación de las dinámicas giratorias de la grúa.
- 55 11. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes 4 a 10, caracterizado porque el generador de trayectoria de referencia le posibilita a un operador la rotación semiautomática disparada de la carga (10) de un ángulo predefinido, en particular de aproximadamente 90° y/o 180°.
12. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque el control del ángulo de inclinación es desacoplado del mecanismo giratorio y/o el mecanismo de orzado de la grúa.
- 60 13. Un sistema de control de inclinación para una grúa de pescante que comprende medios para efectuar el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
14. Grúa de pescante, especialmente una grúa de puerto móvil, que comprende un sistema de control de inclinación de acuerdo con la reivindicación 13.

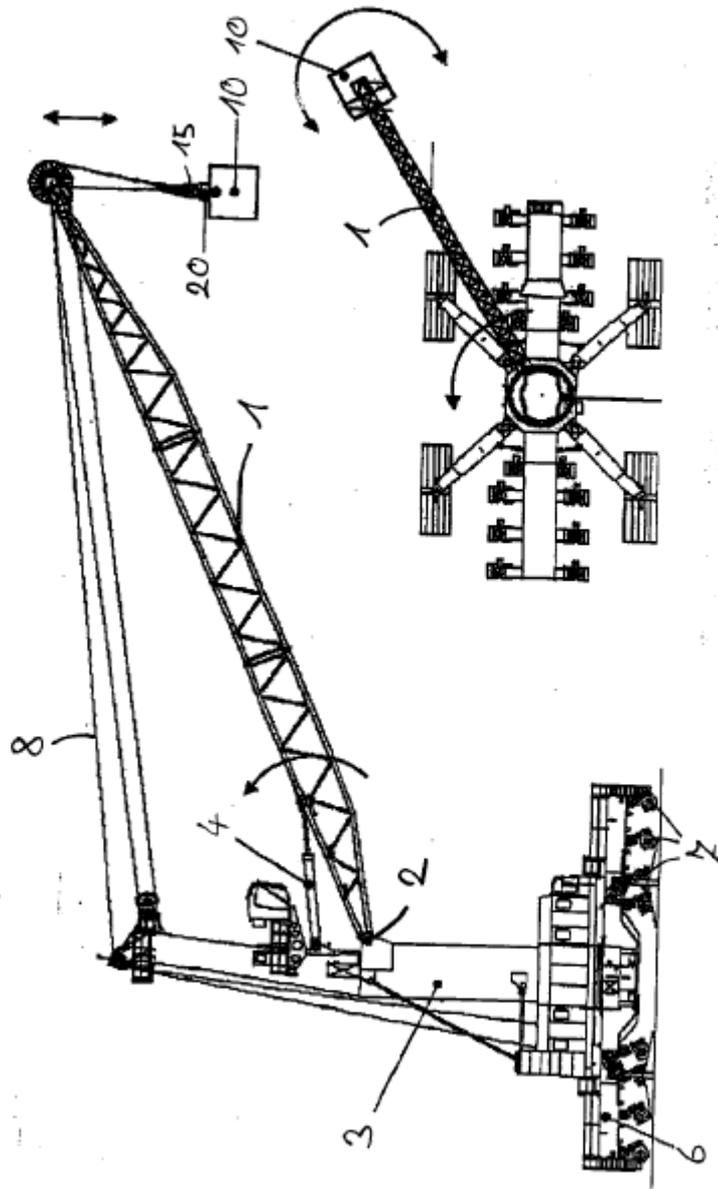


Fig. 1

Fig. 2

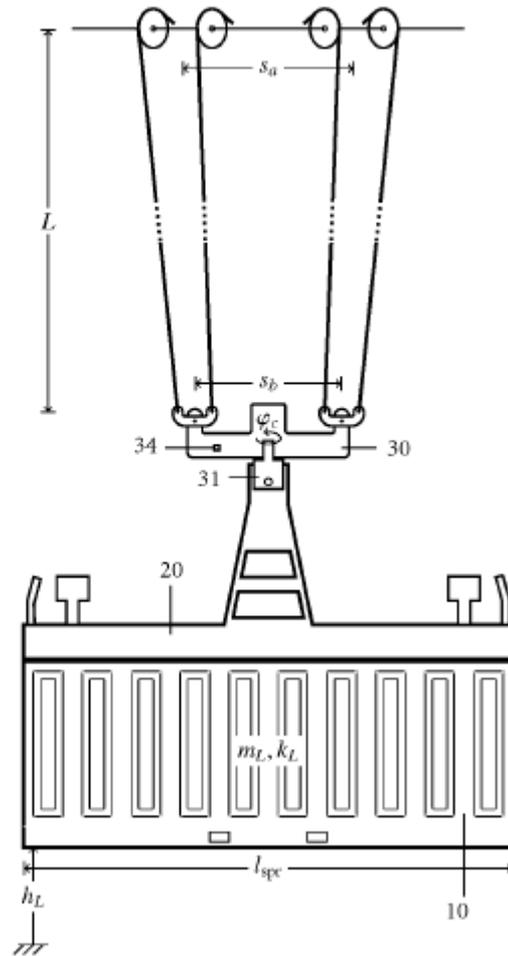


Fig. 3a

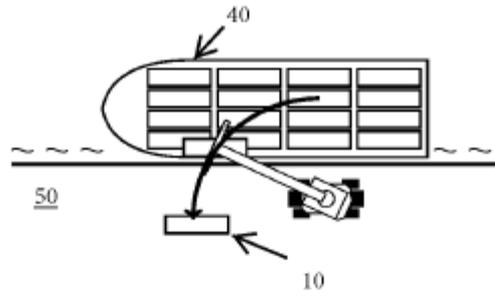


Fig. 3b

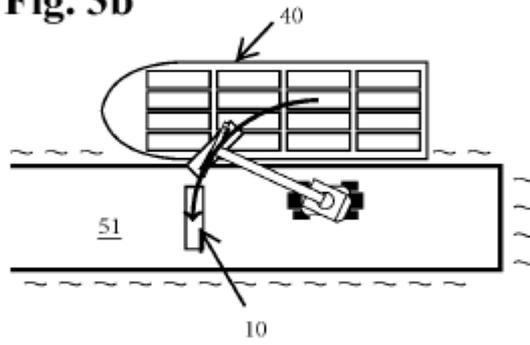


Fig. 3c

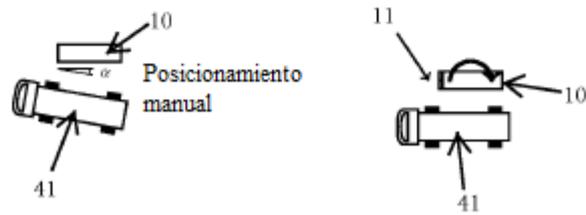


Fig. 4

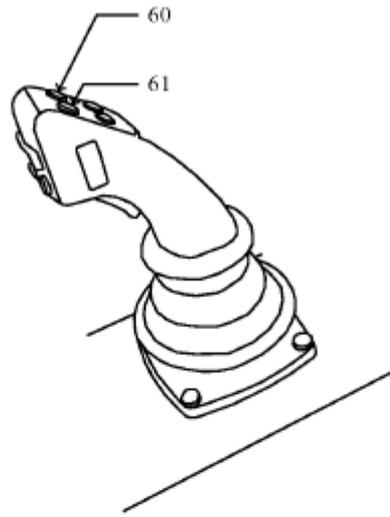


Fig. 5

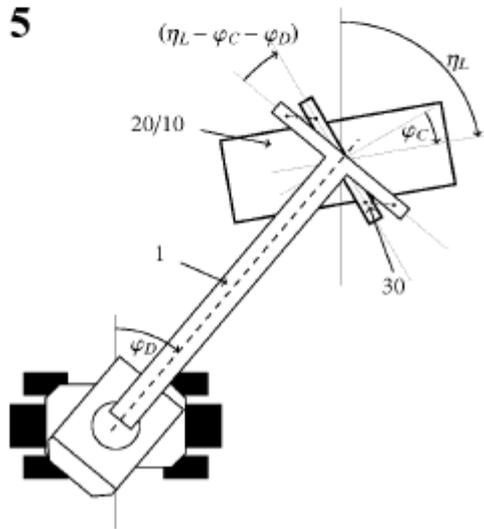


Fig. 6

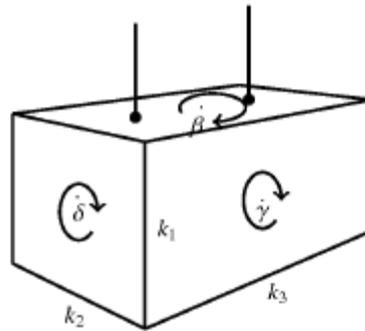


Fig. 7

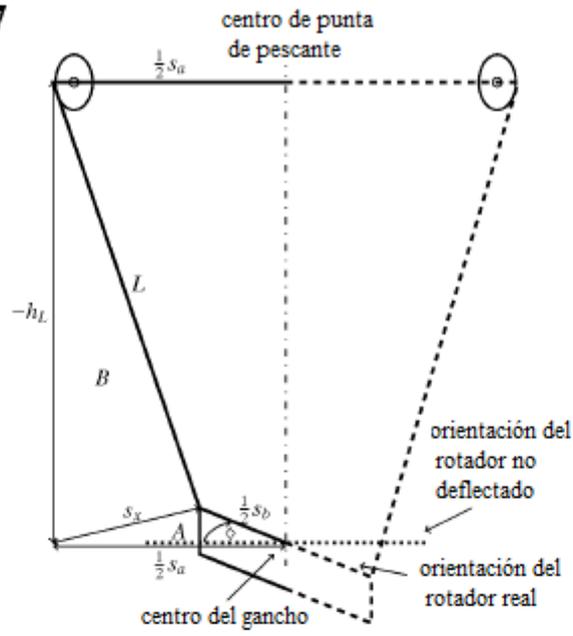


Fig. 8

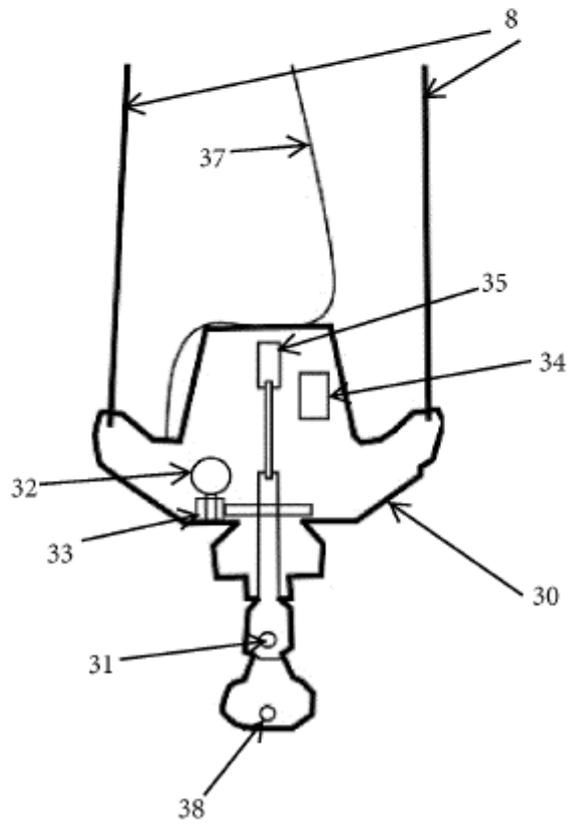


Fig. 9

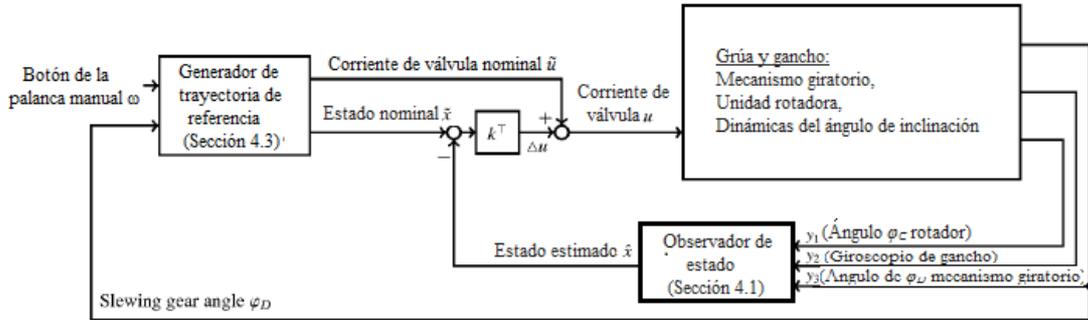


Fig. 10

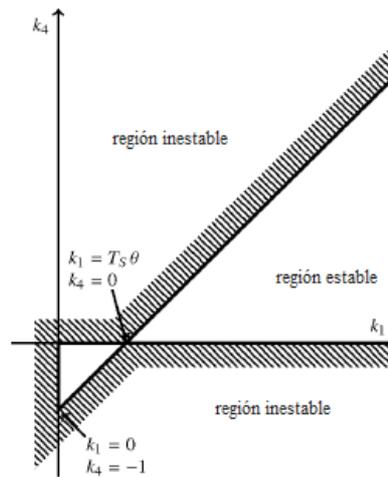


Fig. 11

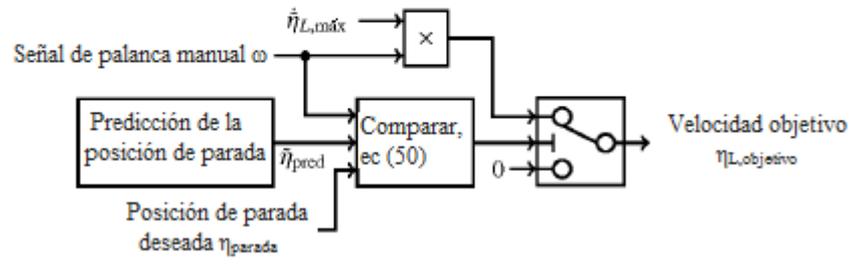


Fig. 12

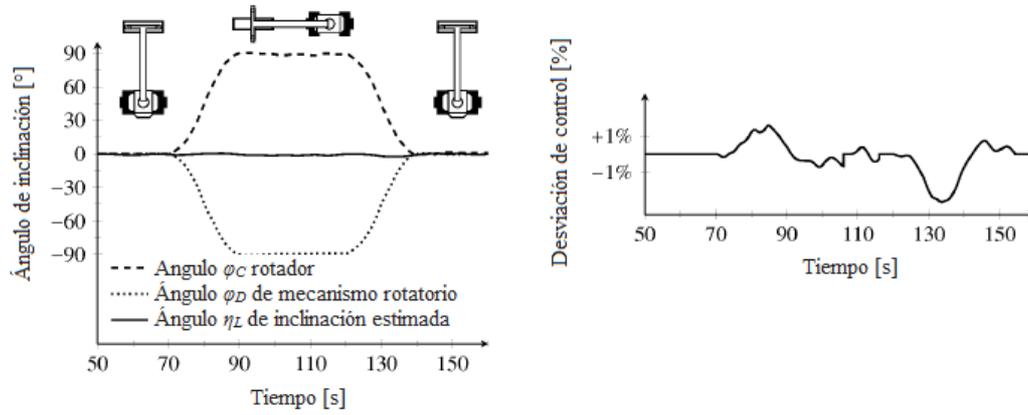


Fig. 13

