

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 676 452**

51 Int. Cl.:

**B66C 13/18** (2006.01)

**B66C 13/40** (2006.01)

**B66C 13/06** (2006.01)

**B66C 23/82** (2006.01)

**B66C 23/84** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.07.2013** **E 13003410 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.04.2018** **EP 2821359**

54 Título: **Controlador de grúa**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.07.2018**

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, ULF y**  
**ARNOLD, ECKHARD**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 676 452 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

Controlador de grúa

La presente invención se refiere a un controlador de grúa para el control semiautomático de una grúa giratoria.

5 En el control semiautomático de una grúa, el operador proporcionará una velocidad de giro deseada y/o una velocidad de amantillado deseada como una entrada del operador, y un módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo del controlador de la grúa calculará una trayectoria de referencia que obedece la dinámica del sistema y sigue la entrada del operador. Esta trayectoria de referencia será utilizada por un controlador de prealimentación para controlar el accionador de giro y/o el accionador de amantillado de la grúa.

10 El módulo de planificación de trayectoria utilizará un modelo físico de la grúa y/o de la carga que cuelga de la grúa, a fin de generar una trayectoria de referencia que obedezca a la dinámica del sistema. Además, el módulo de planificación de trayectoria de referencia utilizará una unidad de optimización para calcular una trayectoria de referencia que sigue la entrada del operador lo más rápido posible.

15 En los controladores de grúa de la técnica anterior de este tipo, la unidad de optimización también tiene en cuenta las limitaciones del sistema de la grúa, para calcular una trayectoria de referencia que los accionadores de la grúa pueden crear. Además, es conocido el uso de controladores de prealimentación que tienen propiedades anti-control de balanceo, y que tienen en cuenta la dinámica de péndulo de la carga que cuelga de la grúa con el fin de limitar el balanceo de la carga durante el movimiento de la grúa. Además, algunos enfoques intentan minimizar la aceleración de la carga durante la optimización. Un controlador de grúa de acuerdo con la técnica anterior se divulga en el documento DE102006048988. La presente invención se dirige ahora a mejorar un controlador de grúa para el control semiautomático de una grúa giratoria y se define en la reivindicación 1. Para este fin, la presente invención proporciona un controlador de grúa para el control semiautomático de una grúa rotatoria, comprendiendo la grúa al menos un accionador de giro para crear un movimiento de giro de la grúa y un accionador de amantillado para crear un movimiento de amantillado de la grúa. El controlador de grúa de la presente invención comprende una unidad de entrada que puede ser operada por un operador para proporcionar una velocidad de giro deseada y/o una velocidad de amantillado deseada como entrada de operador, un módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo que comprende una unidad de optimización para calcular una trayectoria de referencia que obedece a la dinámica del sistema y sigue las entradas del operador, y un controlador de prealimentación que usa la trayectoria de referencia para controlar el accionador de giro y/o el accionador de amantillado. Además, de acuerdo con la presente invención, la unidad de optimización tiene en cuenta la deflexión del cable en la dirección tangencial y/o radial cuando se resuelve el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia.

20 La presente invención proporciona un mejor control anti-balanceo que el de los controladores de grúa de la técnica anterior, ya que la deflexión del cable y, por lo tanto, el balanceo de la carga ya se tiene en cuenta durante el proceso de optimización que proporciona la trayectoria de referencia. De ese modo, el módulo de planificación de la trayectoria de referencia de la presente invención proporcionará una trayectoria de referencia que, cuando se use como base para un controlador de prealimentación, proporcionará un movimiento de la carga con balanceo limitado de la carga.

25 En una realización, la unidad de optimización de la presente invención usa la deflexión máxima permisible del cable como una restricción cuando se calcula la trayectoria de referencia. De este modo, la unidad de optimización se asegurará de que la deflexión del cable se mantenga dentro de unos límites permisibles. Debido a que una deflexión del cable creará una tensión adicional en la estructura de la grúa, esto permitirá limitar dicha tensión a los valores permisibles. Además, esto mantendrá el balanceo del cable dentro de ciertos límites.

30 En una realización, la unidad de optimización de la presente invención usa una función de penalización para penalizar las deflexiones del cable y/o cambios en la deflexión del cable cuando se calcula la trayectoria de referencia. De este modo, el proceso de optimización preferirá trayectorias de referencia que minimicen la deflexión del cable y/o cambios en la deflexión del cable. De este modo, el módulo de planificación de la trayectoria de referencia proporcionará trayectorias de referencia que minimicen el balanceo de la carga.

35 Como se indicó anteriormente, el módulo de planificación de trayectoria de referencia de la presente invención es predictivo del modelo, es decir, utiliza un modelo físico de la dinámica de la grúa y/o de la carga que cuelga de la grúa. En particular, este modelo físico puede describir la dinámica del péndulo de una carga que cuelga de un cable desde la punta de la pluma, y/o la dinámica de la grúa en respuesta al control del accionador de giro y/o amantillado. En particular, el modelo puede describir el ángulo de giro de la pluma de la grúa en función de la señal de control del accionador de giro, y/o el ángulo de amantillado de la pluma de la grúa en función de la señal de control del accionador de amantillado, y/o el ángulo de giro y/o la posición radial de la carga dependiendo del ángulo de giro y/o el ángulo de amantillado de la grúa y/o la señal de control del accionador.

40 El módulo de planificación de trayectoria de referencia utiliza este modelo físico como una restricción adicional durante el proceso de optimización, de modo que la trayectoria de referencia obedece a la dinámica del sistema.

45 Además del controlador de prealimentación que usa la trayectoria de referencia, el controlador de grúa puede comprender, además, en combinación con el controlador de prealimentación, un controlador de prealimentación que

5 usa una o más señales de sensor para el control de prealimentación de la grúa. El uso de tal circuito de retroalimentación estabilizará el control de la grúa. Sin embargo, debido a que la trayectoria de referencia creada por la presente invención ya tiene en cuenta la dinámica del sistema, la señal de control final normalmente estará dominada por la señal de control de prealimentación. Además, debido a que la deflexión del cable ya se tuvo en cuenta durante el proceso de optimización que proporciona la trayectoria de referencia, no es necesario incluir un control anti-balanceo en el controlador de prealimentación. Sin embargo, en una realización preferida, también el controlador de prealimentación incluye control anti-balanceo para rechazar perturbaciones.

10 El controlador de prealimentación puede comprender un observador de estado para estimar el estado del sistema de grúa a partir de las señales de uno o más sensores y las señales de control usadas para controlar el accionador de giro y/o el accionador de amantillado. Este estado estimado de la grúa se comparará con la trayectoria de referencia para implementar el control de prealimentación.

Tal combinación de un controlador de alimentación directa y un controlador de prealimentación es preferida para implementar la presente invención. Sin embargo, el controlador de prealimentación de la presente invención también se podría usar sin un controlador de prealimentación.

15 Características preferidas adicionales del controlador de grúa de la presente invención, y en particular de la unidad de optimización utilizada para crear las trayectorias de referencia, se describirán a continuación en lo siguiente:

20 En una realización, la unidad de optimización puede usar la amplitud máxima permisible y/o la tasa máxima de cambio permitida de la señal de control para el accionador giratorio y/o el accionador de amantillado como una restricción cuando se resuelve el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia. Esto asegurará que se tengan en cuenta las limitaciones del sistema, y en particular las limitaciones del accionador y las limitaciones de la estructura de la grúa.

25 Preferiblemente, si la amplitud máxima de la señal de control se usa como una restricción, la unidad de optimización tiene en cuenta una posible entrada de control desde el controlador de prealimentación. De lo contrario, si se permite que la trayectoria de referencia utilice la amplitud máxima permitida de la señal de control, una entrada adicional del controlador de prealimentación durante el control puede conducir al accionador a la saturación. Preferiblemente, se supone que la entrada de control del controlador de prealimentación es constante en el horizonte de predicción. En particular, la unidad de optimización usará por lo tanto una amplitud máxima de la señal de control como una restricción que es menor que la amplitud máxima permisible de la señal de control.

30 En una posible realización adicional, en la operación normal, la unidad de optimización puede usar una tasa de cambio de la señal de control que está por debajo de la tasa máxima de cambio permitida de la señal de control como una restricción. Por lo tanto, en operación normal, la aceleración del accionador permanecerá por debajo de la aceleración máxima permitida, manteniendo así baja la tensión en la estructura de la grúa.

35 Además, el controlador de grúa comprende preferiblemente una unidad de detección de situación de emergencia, y la unidad de optimización usa la tasa máxima de cambio permitida de la señal de control como una restricción durante la operación de emergencia. Esto asegurará que la trayectoria de referencia que se usa para controlar la grúa durante situaciones de emergencia utilizará la máxima aceleración disponible.

En particular, la unidad de detección de situaciones de emergencia puede detectar si el dispositivo de entrada se revisa durante una vuelta, lo que también se denomina "comprobación posterior". Esta es la reacción habitual de un operador de grúa si anticipa una situación crítica y, por lo tanto, una señal para una situación de emergencia.

40 El rango de operación de una grúa a veces es limitado, por ejemplo para evitar colisiones. Además, una grúa se puede usar para mover una carga desde una primera posición predefinida a una segunda posición predefinida.

45 Algunos enfoques de la técnica anterior han intentado implementar tales limitaciones de posición como restricciones de posición en el problema de control óptimo. Sin embargo, los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que las trayectorias óptimas creadas de esta manera no proporcionarán la trayectoria deseada, es decir, una trayectoria que alcanzaría la posición deseada lo más rápido posible y solo rompería el movimiento de la grúa lo más tarde posible.

50 Con el fin de evitar estos problemas, en una posible realización de la presente invención, la entrada del operador se modificará automáticamente cuando la grúa se aproxime a un límite de posición. De este modo, los límites de posición no tienen que introducirse como restricciones en el problema de control óptimo, pero estos límites entrarán en el problema de control modificando la entrada del operador.

55 En particular, la entrada del operador puede modificarse mediante una función de corte cuando la grúa se encuentra a cierta distancia desde el límite de posición. Por lo tanto, siempre que la grúa esté fuera de cierta región alrededor del límite de posición, la entrada normal del operador se usará para el problema de optimización. Por el contrario, cuando la grúa entra en la región predefinida alrededor del límite de posición, la entrada del operador se modificará y, en particular, se establecerá en cero. De ese modo, el controlador de grúa de la presente invención se asegurará de que la trayectoria que se genere detendrá el movimiento de la grúa antes o en el límite de posición.

Preferiblemente, el controlador de grúa comprende una unidad de predicción de detención que predice una posición de grúa donde la entrada del operador debe modificarse para detener la grúa en o antes del límite de posición. De este modo, uno no tiene que usar una distancia fija desde el límite de posición, pero puede usar una posición que se predice dependiendo de las circunstancias de la operación de la grúa.

5 En una realización, la unidad de predicción de detención usa una tabla de búsqueda que proporciona predicciones de detención predefinidas dependiendo del estado de la grúa. Preferiblemente, la tabla de búsqueda proporcionará la predicción de detención dependiendo al menos de la velocidad de giro y/o amantillado y/o del ángulo de deflexión del cable y/o la velocidad del ángulo de deflexión del cable y/o la longitud del cable y/o señal de control de corriente. En particular, la tabla de búsqueda proporcionará la predicción de detención dependiendo de la velocidad de giro y/o  
10 amantillado y del ángulo de deflexión del cable. En una realización, la unidad de optimización resolverá el problema de control óptimo durante un horizonte de predicción determinado. Esta predicción se repite en intervalos cortos, porque la entrada del operador que entra en el problema de control puede cambiar en cualquier momento. Esto se conoce como control óptimo repetitivo.

15 Preferiblemente, la optimización se repite al menos cada 300 ms, más preferiblemente al menos cada 200 ms. Además, el horizonte de predicción puede ser de al menos 3 s, preferiblemente de al menos 5 s. En una posible realización, el horizonte de predicción puede estar entre 3 s y 30 s, preferiblemente entre 5 s y 20 s.

Para resolver el problema de optimización, el horizonte de predicción está discretizado. El número de pasos de discretización está directamente relacionado con el tiempo de cálculo que es necesario. Por lo tanto, preferiblemente, el número de pasos de discretización está por debajo de 30 para mantener bajos los requisitos de cálculo.  
20 Preferiblemente, se usan al menos 3 etapas de discretización, más preferiblemente al menos 5, más preferiblemente al menos 10.

En una realización, el problema de control óptimo se resuelve en menos de 150 ms, preferiblemente en menos de 100 ms. Esto asegurará que la grúa reaccione rápidamente a la entrada del operador, de modo que el proceso de optimización subyacente no sea percibido por el operador. Sin embargo, si uno quiere asegurarse de que siempre se resuelva el problema de control óptimo dentro de este marco de tiempo, se deben proporcionar márgenes de seguridad muy grandes. De ese modo, la calidad del control se deteriora.  
25

Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, la presente invención proporciona un controlador de grúa para el control semiautomático de una grúa giratoria que comprende al menos un accionador giratorio para crear un movimiento de giro de la grúa y/o un accionador de amantillado para crear un movimiento de amantillado de la grúa.  
30 El controlador de grúa comprende una unidad de entrada que puede ser operada por un operador para proporcionar la velocidad de giro deseada y/o la velocidad de amantillado deseada como una entrada de operador y un módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo que comprende una unidad de optimización para calcular una trayectoria de referencia que obedece a la dinámica del sistema y sigue la entrada del operador, y un controlador de prealimentación que usa la trayectoria de referencia para controlar el accionador de giro y/o el  
35 accionador de amantillado. De acuerdo con el segundo aspecto de la presente invención, el controlador de grúa comprende además un módulo de planificación de trayectorias de emergencia, en el que la salida del módulo de planificación de trayectorias de emergencia es utilizado por el controlador de prealimentación si la unidad de optimización del módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo no proporciona una trayectoria de referencia dentro de un marco de tiempo predefinido. De este modo, la presente invención se asegura de que si no se encuentra una solución del problema de control óptimo, o si hay otros problemas en el módulo de  
40 planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo, la grúa todavía está bajo control.

Además, el controlador de grúa puede comprender un módulo de verificación de verosimilitud para verificar si la trayectoria proporcionada por el módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo cumple uno o más criterios de verosimilitud. En particular, la salida del módulo de planificación de trayectoria de emergencia es  
45 utilizada por el controlador de prealimentación si la trayectoria proporcionada por el módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo no cumple los criterios de verosimilitud verificados en el módulo de verificación de verosimilitud. Esto asegurará que solo se utilicen trayectorias plausibles para controlar la grúa, y si hay fallas en el módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo, el módulo de planificación de trayectoria de emergencia se utiliza para el control de la grúa.

50 Preferiblemente, el módulo de planificación de trayectoria de emergencia crea una trayectoria que lleva a la grúa a un estado estable. Esto aumentará la seguridad de la operación de la grúa.

Además, el módulo de planificación de la trayectoria de emergencia puede comprender una parte de desaceleración diseñada de modo que ponga la grúa en reposo. Preferiblemente, la parte de desaceleración multiplica el estado de la trayectoria de referencia actual con una matriz de ganancia que tiene un valor propio en cero y todos los demás  
55 valores propios son estables.

Preferiblemente, el módulo de planificación de la trayectoria de emergencia crea una trayectoria que continúa constantemente la trayectoria desde el módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo. Preferiblemente, para este fin, el módulo de planificación de trayectoria de emergencia puede comprender una parte de continuación que asegure que la grúa no cambie bruscamente su comportamiento, o que se cree una tensión

innecesaria en la estructura de la grúa. Preferiblemente, la parte de continuación tiene en cuenta la desaceleración máxima permitida.

5 Preferiblemente, el controlador de grúa de acuerdo con el segundo aspecto de la presente invención tiene las características preferidas ya descritas con respecto al primer aspecto descrito anteriormente. En particular, el controlador de acuerdo con el segundo aspecto puede comprender estas características preferidas incluso si no utiliza el primer aspecto, es decir, no tiene en cuenta la deflexión del cable durante la etapa de optimización.

Sin embargo, en la realización más preferida, el primer y el segundo aspecto de la presente invención se combinan en un único controlador.

10 Aparte de los controladores de grúa descritos anteriormente, la presente invención comprende además una grúa giratoria que comprende dicho controlador de grúa. La grúa de acuerdo con la presente invención comprende preferiblemente una torre giratoria que puede ser girada por el accionador giratorio y una pluma montada sobre pivote en la torre giratoria que puede elevarse y bajarse mediante el accionador de amantillado. Preferiblemente, la grúa comprende además un engranaje de izamiento para subir y bajar una carga que cuelga de un cable. Preferiblemente, el cable se guía sobre una polea en la punta de la pluma, de manera que la carga que cuelga del cable seguirá el movimiento de la punta de la pluma con una dinámica de péndulo.

La grúa de acuerdo con la presente invención puede ser una grúa móvil. En particular, la torre giratoria puede montarse en un tren de rodaje, siendo el tren de rodaje accionable por uno o más ejes motrices y/o pistas de orugas.

El controlador de grúa de la grúa giratoria de la inventiva tiene preferiblemente las características del controlador de grúa descrito anteriormente.

20 Además, la presente invención comprende un programa informático para implementar un controlador de grúa como se describió anteriormente. En particular, el programa informático puede comprender un código para implementar un controlador de grúa en un ordenador de grúa de una grúa giratoria. El programa informático de la presente invención preferiblemente se almacena en una memoria legible por ordenador.

25 La presente invención comprende además un método para el control semiautomático de una grúa giratoria, comprendiendo la grúa al menos un accionador giratorio para crear un movimiento de giro de la grúa y/o un accionador de amantillado para crear un movimiento de amantillado de la grúa. De acuerdo con la presente invención, un operador proporciona una velocidad de giro deseada y/o una velocidad de amantillado deseada como una entrada del operador, y se planifica una trayectoria de referencia predictivo del modelo resolviendo un problema de optimización que proporciona una trayectoria de referencia que obedece a la dinámica del sistema y sigue la entrada del operador. Además, la trayectoria de referencia se usa para el control de alimentación directa del accionador de giro y/o el accionador de amantillado. De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, la deflexión del cable en la dirección tangencial y/o radial se tiene en cuenta cuando se resuelve el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia. De acuerdo con un segundo aspecto, se usa una trayectoria de emergencia para el control de prealimentación si el problema de optimización no puede resolverse dentro de un marco de tiempo predeterminado.

35 Preferiblemente, el método de la presente invención se realiza como se describió anteriormente con respecto al controlador de grúa de la invención. Preferiblemente, el método usa un controlador de grúa como se describió anteriormente.

La presente invención se describirá ahora adicionalmente sobre la base de una realización específica, que ejemplifica las características descritas anteriormente con respecto al control del movimiento de giro de la grúa.

40 Para ejemplificar la invención, se usan las siguientes figuras que muestran:

Fig. 1: una realización de una grúa giratoria de acuerdo con la presente invención,

Fig. 2: un diagrama esquemático de un controlador de grúa de dos grados de libertad de acuerdo con la presente invención,

45 Fig. 3: una vista superior y una vista en perspectiva de una grúa giratoria que muestra la posición de giro de la carga y de la pluma de la grúa,

Fig. 4: una trayectoria de ejemplo creada de acuerdo con la presente invención,

Fig. 5: un diagrama que muestra una trayectoria óptima utilizando restricciones de posición y una trayectoria deseada,

Fig. 6: un diagrama de bloques de software de un planificador de trayectoria que incluye un planificador de emergencia de acuerdo con el segundo aspecto de la presente invención,

50 Fig. 7: tres diagramas que muestran la tasa de giro, la deflexión del péndulo del cable y el contador de iteración para un amantillado de engranaje de giro de ejemplo en el que se invierte la velocidad objetivo (comprobación posterior), de modo que varias restricciones se activan durante la desaceleración.

Fig. 8: un diagrama que muestra una simulación de una vuelta de engranaje de giro con múltiples transiciones entre la solución de control óptima y el planificador de emergencia, y

Fig. 9: dos diagramas que muestran la tasa de giro y la posición de carga donde los límites de posición se implementan modificando la velocidad objetivo de acuerdo con la presente invención.

5 Control (2DOF) de dos grados de libertad, por ejemplo, una combinación de avance y control de prealimentación puede proporcionar un buen rendimiento de control de seguimiento en muchos sistemas robóticos a gran escala, como grúas. Cada sistema de control 2DOF necesita una trayectoria de referencia. La generación de esta trayectoria de referencia es crucial: las trayectorias de referencia demasiado lentas disminuyen el rendimiento del sistema, mientras que las trayectorias demasiado agresivas pueden violar fácilmente las restricciones de estado o de entrada. Esto degrada el  
10 rendimiento de seguimiento e incluso puede causar accidentes. En el caso de las grúas rotatorias controladas por el operador, la generación de la trayectoria debe hacerse en tiempo real, lo que limita el número de algoritmos disponibles.

Para este propósito, como una realización de la presente invención, se presenta un planificador de trayectoria de control óptimo repetitivo en tiempo real para grúas giratorias. Se toma en cuenta las restricciones de entrada y estado.  
15 Se proporciona una estrategia de emergencia en caso de que no se encuentre una solución de control óptima. La realización de la presente invención se usa para el control de dos grados de libertad de una grúa móvil portuaria.

## I. Introducción

Una realización de una grúa que comprende un sistema de control de acuerdo con la presente invención se muestra en la figura 1. La grúa comprende una torre 11 que se puede girar alrededor de un eje de giro vertical mediante un engranaje giratorio. Una pluma 5 está unida de manera pivotante a la torre 11, de manera que se puede elevar y bajar  
20 alrededor de un eje de amantillado horizontal. Como un accionador para el movimiento de amantillado, se usa en la realización un cilindro 7 hidráulico. Una carga 3 se suspende en un cable que se guía sobre una polea en la punta de la pluma 5. La grúa comprende un cabrestante de izamiento para elevar y bajar la carga 3 suspendida del cable.

El control de grúa de acuerdo con la presente invención es semiautomático, de modo que el operador usa una palanca de mando para establecer una velocidad  $\omega$  objetivo para la carga. Un sistema de control necesita acelerar (o desacelerar) la grúa a esta velocidad objetivo mientras compensa el balanceo del péndulo. En la realización de la presente invención, se usa un control (2DOF) de dos grados de libertad como se muestra en la figura 2. El principal beneficio del control de 2DOF es que el rendimiento de alimentación directa se puede sintonizar por separado del  
25 circuito de retroalimentación. Para implementar el control 2DOF, una señal  $\tilde{u}$  de control nominal y una trayectoria  $\tilde{x}$  de estado nominal deben calcularse mediante el denominado "planificador de trayectoria". La señal  $u$  de control se construye a partir de la señal de control nominal y una prealimentación estabilizadora.

$$u = \tilde{u} + k^T (\tilde{x} - x). \quad (1)$$

En condiciones nominales, el estado  $x$  de la planta rastrea perfectamente la trayectoria  $\tilde{x}$  planificada, lo que significa que la prealimentación estabilizadora es cero y la señal  $u$  de control está dominada por la señal  $\tilde{u}$  de control nominal.  
35 La generación de trayectoria es, por lo tanto, una tarea importante en el control de 2DOF.

La presente realización se centra en cómo se planifican tales trayectorias nominales para el engranaje giratorio de la grúa giratoria como se muestra en la figura 1. Sin embargo, el mismo enfoque podría usarse igualmente para el accionador de amantillado.

La descripción de la realización está organizada de la siguiente manera: en la Sección II, se presenta un modelo de engranaje giratorio y se especifican los requisitos para las trayectorias nominales. Además, se discuten los recursos computacionales disponibles. En la Sección III, se deduce un problema de control óptimo. Esta sección incluye notas sobre el método de solución implementado como una estrategia de emergencia en caso de que no se encuentre una solución de control óptima. Finalmente, los ejemplos operacionales para el sistema de control de la presente invención se presentan en la Sección IV.  
40

## 45 II. Configuración del problema

### A. Modelo de grúa giratoria

En esta sección, se proporciona un modelo dinámico lineal para la dinámica de giro de la grúa y el péndulo. La posición de rotación de la torre y la carga se denota como  $\varphi_D$  y  $\varphi_L$  (ver la Figura 3). Sus velocidades angulares son por lo tanto  $\dot{\varphi}_D$  y  $\dot{\varphi}_L$ .

50 La longitud del cable se denota como  $L$  y la aceleración gravitacional es  $g$ .

La velocidad  $\dot{\varphi}_D$  del engranaje de giro sigue la entrada  $u$  de control con dinámica de retardo de primer orden.

Suponiendo una constante de tiempo  $T_D$ , es decir:

$$T_D \cdot \ddot{\varphi}_D + \dot{\varphi}_D = u. \quad (2)$$

La carga siempre oscila alrededor del punto de suspensión con una frecuencia propia de  $\sqrt{g/L}$ . Es decir:

$$L/g \cdot \ddot{\varphi}_L + \varphi_L = \varphi_D. \quad (3)$$

- 5 La combinación (2) y (3) en una única representación de espacio-estado con la definición del vector de estado  $x = [\varphi_D, \dot{\varphi}_D, \varphi_L, \dot{\varphi}_L]$  produce:

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{g}{L} & 0 & -\frac{g}{L} & 0 \end{pmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_D} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_B u. \quad (4)$$

En el resto de este documento, los  $u-x$  -dinámicos presentados también se usan para planificar las trayectorias nominales  $\tilde{u}$  y  $\tilde{x}$ .

10 B. Requisitos para trayectorias de grúa giratoria

En esta sección, se presentan los requisitos para las trayectorias de la grúa giratoria. Por razones de trazabilidad, los requisitos están numerados.

- 15 R1 El objetivo general de cualquier algoritmo de planificación de trayectoria para grúas semiautomáticas es calcular una trayectoria de carga cuya velocidad de carga converge suavemente a la velocidad objetivo como se muestra en la Figura 4. La velocidad objetivo proviene de la palanca de mando del operador.

R2 Dado que la posición de la palanca de mando puede cambiar en cualquier momento, la trayectoria debe ser replanificada repetidamente a partir de condiciones iniciales arbitrarias.

- 20 R3 La trayectoria nominal planificada debe obedecer a la dinámica (4) del sistema. Como la posición de carga en (4) tiene un grado relativo de  $r = 4$ , cualquier trayectoria de carga será 4 veces diferenciable continuamente. Esto hace que la trayectoria sea suave en una forma matemática.

También existen limitaciones físicas para cargar trayectorias. A partir de la construcción mecánica de la grúa y los límites hidráulicos, estos son:

- R4 La amplitud de la señal de control  $|u|$  debe estar limitada a la velocidad máxima del tren de transmisión.
- 25 R5 Los cambios de la entrada de control producen tensión mecánica en los componentes del accionador, por lo tanto, la tasa de entrada  $|\dot{u}|$  puede estar restringido

R6 La deflexión del péndulo causa estrés en la torre y la pluma, por lo que  $\left| \frac{\varphi_L - \varphi_D}{L} \right|$  debe estar limitada.

Además, hay requisitos no técnicos:

- R7 Para un funcionamiento seguro de la grúa, es esencial que el comportamiento del sistema sea predecible para el operador. La experiencia práctica muestra que la operación casi estable es, por lo tanto, ventajosa, por ejemplo, la
- 30 deflexión  $\left| \frac{\varphi_L - \varphi_D}{L} \right|$  del péndulo siempre debe minimizarse.

R8 La experiencia muestra que la segunda derivada de la señal de control se correlaciona con las vibraciones estructurales de la grúa. Por lo tanto  $|\ddot{u}|$  debe mantenerse pequeño para aumentar la comodidad del operador y la aceptación del sistema de control.

Finalmente, hay requisitos funcionales:

R9 Una restricción de posición permite que el sistema de control garantice que no se golpeen los obstáculos estáticos en el área de trabajo. Alternativamente, tal restricción puede asegurar que la grúa se aproxime a una posición objetivo dado. Por lo tanto, la posición de carga  $\varphi_L$  también necesita estar limitada.

5 R10 Cuando un operador de grúa anticipa una situación crítica, por ejemplo, una colisión, una reacción natural es invertir la palanca de mando durante un viaje, por ejemplo, "comprobación posterior". En tal situación, la trayectoria planificada debe desacelerarse lo más rápido posible.

C. Recursos computacionales disponibles

10 Para el algoritmo de planificación de trayectoria, la memoria dinámica disponible es menos restrictiva que la potencia de cálculo: Dado que la grúa solo puede reaccionar a la entrada de usuario modificada después de que el algoritmo de planificación de trayectoria finalizó los cálculos, el retardo de reacción aceptable da un límite superior en el tiempo de cálculo aceptable. La experiencia muestra que se pueden realizar unas 100.000 operaciones de punto flotante en una tarea en segundo plano en el hardware de destino sin un retraso notable para el operador. Para permitir márgenes de seguridad suficientes, el algoritmo de planificación de trayectoria debe mantenerse muy por debajo de este número de operaciones de punto flotante.

15 III. Planificación de trayectoria utilizando control óptimo repetitivo

La generación de trayectoria ofrece varios grados de libertad que se pueden elegir libremente dentro de ciertas restricciones. En un control óptimo, se genera una trayectoria que es óptima con respecto a una función de coste mientras se cumplen las restricciones. Muchos algoritmos de control óptimos necesitan un tiempo de cálculo significativo debido a los solucionadores de BVP subyacentes o los solucionadores de SQP. Investigaciones previas indican que es posible resolver un solo programa (QP) cuadrático usando algoritmos (IP) de punto interior con los recursos computacionales dados de la unidad de control de la grúa. Por lo tanto, la tarea de planificación de trayectoria se formula como un problema (LQDOCP) de control óptimo de tiempo discreto, lineal - cuadrático de horizonte finito. El modelo de grúa incluido garantiza que la trayectoria planificada satisfaga la dinámica del sistema dada, lo que hace que este sea un enfoque de planificación de trayectoria predictivo del modelo. La optimización se repite cada 150 ms con las condiciones iniciales actualizadas y una posición actualizada de la palanca de mando. Esto se conoce como control óptimo repetitivo. Un enfoque similar es tomado por.

A. Función objetivo y restricciones

La función objetivo elegida resume los pesos de rendimiento  $J_{W,k}$  y los pesos variables de holgura  $J_{S,k}$  para cada paso de tiempo k:

30 
$$\min_{\bar{x}_k, \bar{u}_k, s_k} \sum_{k=0}^K J_{W,k} + J_{S,k}. \quad (5)$$

Los pesos de rendimiento  $J_{W,k}$  penalizan cuadráticamente las desviaciones de la velocidad  $\dot{\varphi}_L$  de carga planificada a la velocidad  $\omega$  objetivo (R1). Como la posición de la palanca de mando no puede predecirse,  $\omega$  se supone constante en todo el horizonte de predicción.

Las ponderaciones de rendimiento también penalizan las desviaciones  $\frac{\bar{\varphi}_L - \bar{\varphi}_D}{L}$  de los péndulos y los cambios de la deflexión  $\frac{\bar{\varphi}_L - \bar{\varphi}_D}{L}$  del péndulo (R7) así como la curvatura (segunda derivada) de la señal  $\ddot{u}$  de control nominal (R8):

$$J_{W,k} = \left\| \dot{\varphi}_{L,k} - \omega \right\|_{Q_\omega}^2 + \left\| \frac{\bar{\varphi}_{L,k} - \bar{\varphi}_{D,k}}{L} \right\|_{Q_{\Delta\varphi}}^2 + \left\| \frac{\dot{\varphi}_{L,k} - \dot{\varphi}_{D,k}}{L} \right\|_{Q_{\Delta\dot{\varphi}}}^2 + \left\| \ddot{u}_k \right\|_{Q_{\ddot{u}}}^2 \quad (6)$$



Como la curvatura  $\ddot{\tilde{u}}_k$  de entrada de control en (6) no está directamente disponible como una variable de estado, se aproxima con un cociente  $\ddot{\tilde{u}}_k = \ddot{\tilde{u}}(\tilde{u}_{k-2}, \tilde{u}_{k-1}, \tilde{u}_k)$ , de diferencia hacia atrás de segundo orden

Las variables de estado  $\tilde{x}_k = [\tilde{\varphi}_D, \dot{\tilde{\varphi}}_D, \tilde{\varphi}_L, \dot{\tilde{\varphi}}_L]$  deben cumplir la dinámica del sistema. Por lo tanto,

5 una discretización (4) de retención de orden cero se incluye en el problema de optimización:

$$\tilde{x}_{k+1} = A_k \tilde{x}_k + B_k \tilde{u}_k, \quad k = 0 \dots (K - 1) \quad (7)$$

con una condición inicial dada  $\tilde{x}_0$  (R2).

A continuación, se presentan las restricciones de desigualdad. Estos se complementan con variables de holgura  $s_k = (s_{1,k}, \dots, s_{6,k}) \geq 0$  para evitar problemas de imposibilidad. Las restricciones de estado para la deflexión del péndulo (R6) se pueden formular de una manera directa:

$$\frac{\tilde{\varphi}_L - \tilde{\varphi}_D}{L} - s_{1,k} \leq \Delta\varphi_{\max}, \quad (8)$$

$$-\frac{\tilde{\varphi}_L - \tilde{\varphi}_D}{L} - s_{2,k} \leq \Delta\varphi_{\max}, \quad k = 1 \dots K. \quad (9)$$

La entrada de control nominal  $\tilde{u}_k$  está limitada por restricciones de entrada (R4) y restricciones de la tasa de entrada (R5). Las restricciones de la tasa de entrada se escriben como:

$$15 \quad \tilde{u}_{k+1} - \tilde{u}_k - s_{3,k} \leq a_{\max} \cdot (t_{k+1} - t_k), \quad (10)$$

$$-\tilde{u}_{k+1} + \tilde{u}_k - s_{4,k} \leq a_{\max} \cdot (t_{k+1} - t_k), \quad (11)$$

con  $k = 0 \dots (K - 1)$

El límite  $a_{\max}$  se elige con cierto conservadurismo para suavizar el funcionamiento de la grúa. Solo en situaciones de emergencia, por ejemplo, cuando se detecta una comprobación posterior,  $a_{\max}$  se establece en su máximo (R10) físico. Para las restricciones de entrada de control, un primer enfoque podría ser enlazar  $\tilde{u}$  en lugar de  $u$ , por ejemplo,  $u_{\min} \leq \tilde{u} \leq u_{\max}$ . Sin embargo, esto resulta insuficiente: cuando  $\tilde{u}$  está en su punto máximo, la prealimentación estabilizadora adicional de (1) podría llevarlo a la saturación del accionador. En consecuencia, las restricciones de entrada de control se escriben como

$$\tilde{u}_k - s_{5,k} \leq u_{\max} - k^T (\tilde{x}_0 - x(0)), \quad (12)$$

$$25 \quad -\tilde{u}_k - s_{6,k} \leq -u_{\min} + k^T (\tilde{x}_0 - x(0)), \quad (13)$$

para  $k = 0 \dots (K - 1)$ . Aquí, la entrada de control de estabilización  $k^T (\tilde{x}_0 - x(0))$  se supone constante en el horizonte de predicción.

Para mantener las variables de holgura  $s_{1,k} \dots s_{6,k}$  tan pequeñas como sea posible, se penalizan en la función de coste:

$$J_{S,k} = \sum_{j=1}^6 Q_{s,j} s_{j,k}^2. \quad (14)$$

30 Ponderar las variables de holgura solo cuadráticamente produce pequeñas violaciones de restricciones cuando las restricciones se activan. Esto todavía se acepta, ya que los pesos variables de holgura lineal fuerte empíricamente conducen a aumentos indeseables en el número de iteraciones de IP.

B. Discretización del horizonte de planificación

El problema de control óptimo se resuelve con un algoritmo de punto (IP) interior que se presenta en la siguiente Sección III-D. Cada iteración de IP requiere un pequeño múltiplo de operaciones de punto flotante  $K(n_{\bar{x}}^3 + n_{\bar{u}}^3)$  donde  $n_{\bar{x}}$  es el número de estados y  $n_{\bar{u}}$  el número de variables de entrada. Se puede ver que el esfuerzo computacional crece linealmente con el número de pasos  $K$  de discretización. La elección de  $K$  requiere una compensación dependiente de la plataforma entre el tiempo de cálculo y la precisión de la predicción.

C. Incorporación de restricciones de posición

Cuando hay una posición límite en la dirección del movimiento, el comportamiento esperado es que la grúa conduzca normalmente el mayor tiempo posible. Entonces se espera que desacelere como si la velocidad objetivo fuera cero, lo que da como resultado un punto muerto justo en el límite de la posición. El problema de control óptimo establecido en la Sección III-A no permite obedecer a tal límite (R9) de posición hasta el momento

No es razonable incluir una restricción de posición como  $\varphi_L \leq \varphi_{\max}$  en el problema de control óptimo. Aunque la restricción estaría satisfecha, la trayectoria resultante aún sería indeseable debido a una inconsistencia entre la función de coste y la restricción de posición. Un pequeño ejemplo ayuda a comprender el problema subyacente:

Considere que una planta tiene una dinámica de integrador simple, es decir,  $x$  es una posición y  $\dot{x}$  una velocidad. Un problema de control óptimo lineal-cuadrático con una velocidad objetivo de  $\dot{x} \rightarrow 1$ , un horizonte de predicción de 10s y una restricción de posición de  $x \leq 3$  se vería así:

$$\begin{aligned} \min_{x(t)} \int_0^{10 \text{ s}} (\dot{x}(\tau) - 1)^2 d\tau \\ \text{s.t. } x(0) = 0 \\ x(t) \leq 3. \end{aligned} \tag{15}$$

Ambos problemas de control óptimo (6) y (15) tienen pesos cuadráticos de desviaciones de velocidad. La Figura 5 muestra tanto la trayectoria deseada como la solución óptima del problema de control óptimo (15). No es factible mantener la velocidad objetivo en todo el horizonte debido a la restricción de posición.

La trayectoria deseada mantiene la velocidad objetivo de 1 por 3 s y luego descansa en la posición objetivo. La solución óptima también cubre una distancia total de 3, pero con una velocidad promedio de 0.3 en el horizonte de predicción de 10 s, solo alcanza la posición limitada al final del horizonte. La razón subyacente de este comportamiento es que las funciones de costes cuadráticos penalizan desviaciones más grandes de la velocidad planificada que las más pequeñas. Una solución podría ser contraer el horizonte de predicción cuando se aproxima a una posición objetivo. Sin embargo, tal algoritmo requeriría resolver varios QPs y, por lo tanto, mucho más tiempo de cálculo.

En lugar de usar restricciones de posición en el problema (R9) de control óptimo, se cumple modificando la velocidad objetivo de la palanca de mando  $\omega$  en la función (6) objetivo con una función de corte  $f(\omega, \tilde{x}_0, L)$ :

$$J_{W,k} = \left\| \tilde{\varphi}_{L,k} - \underbrace{f(\omega, \tilde{x}_0, L)}_{\text{formalmente } \omega \text{ sola}} \right\|_{Q_\varphi}^2 + \dots \tag{16}$$

La función de corte se define como:

$$f(\omega, \tilde{x}_0, L) = \begin{cases} 0 & \text{si la predicción de detención } \geq \varphi_{\max} \wedge \omega > 0 \\ 0 & \text{si la predicción de detención } \leq \varphi_{\min} \wedge \omega < 0 \\ \text{de lo contrario } \omega, & \end{cases} \tag{17}$$

donde la "predicción de detención" es una predicción precisa de la posición donde la grúa se detiene después de una desaceleración transitoria con  $\omega = 0$ . La predicción depende tanto del estado inicial  $\tilde{x}_0$  como del parámetro  $L$  del

modelo, así como de la dinámica del planificador de trayectoria. No se encontró ninguna solución analítica para predecir la predicción de detención. Por lo tanto, las predicciones de detención para diversas combinaciones de estados iniciales y longitudes de cable se calcularon fuera de línea y se almacenaron en una tabla de búsqueda. En el sistema de control, la predicción de detención real se determina a partir de esta tabla de búsqueda utilizando interpolación lineal.

#### D. Resolviendo el problema de control óptimo

El problema de control óptimo de tiempo discreto lineal-cuadrático presentado de horizonte finito consiste en la función (5) con (6), (14), (16) y (17) de coste, las restricciones (7) de igualdad y las restricciones (8)-(13) de desigualdad. Se soluciona con un método predictor-corrector tipo Mehrotra estándar. El paso que consume más tiempo de este algoritmo es la solución de un sistema lineal estructurado de ecuaciones. Para explotar la estructura, se utiliza una recursividad de Riccati en tiempo discreto.

#### E. Estrategia de emergencia

Es posible que el problema de control óptimo no se pueda resolver. Esto puede ocurrir debido a problemas numéricos, fallas algorítmicas no detectadas o si se excede el límite de tiempo de cálculo (posiblemente debido a tareas de mayor prioridad en la misma unidad de control).

Por lo tanto, un número de algoritmos de verificación monitorean la convergencia y verosimilitud de la solución del problema de control óptimo. En caso de falla, la continuación constante de la trayectoria de estado planificada  $\tilde{x}$  y la señal  $\tilde{u}$  de control nominal aún se requiere para evitar la interrupción repentina de la operación de la grúa. La Figura 6 muestra cómo se logra esto: el estado  $\tilde{x}$ .planificado se integra utilizando el modelo (4) dinámico. La entrada  $\tilde{u}$  nominal se toma normalmente de la solución del problema de control óptimo.

Si no está disponible o no cumple con las verificaciones de verosimilitud, se aplica una solución  $\tilde{u}_{FB}$  de emergencia. Esta solución de emergencia se calcula mediante una combinación de una parte de desaceleración y una función  $\tilde{u}_{cont}(t)$  de continuación:

$$\tilde{u}_{FB} = \underbrace{K_{FB}}_{\tilde{u}_{dec}} \tilde{x} + \tilde{u}_{cont}(t). \quad (18)$$

La matriz  $K_{FB}$  de ganancia está diseñada de manera que  $(A + B K_{FB})$  tiene tres valores propios asintóticamente estables y un valor propio en  $\lambda = 0$ . Esto significa que el estado  $\tilde{x}$  planificado converge a alguna posición de detención (distinta de cero) mientras que el planificador de emergencia está activo. Por lo tanto, la parte de desaceleración de la señal de control de emergencia asegura que la trayectoria de referencia se detenga. La función  $\tilde{u}_{cont}(t)$  de continuación se agrega para garantizar que la señal de control del planificador  $\tilde{u}_{FB}$  de emergencia continúe constantemente la señal  $\tilde{u}$  de control desde el problema de control óptimo antes de la transición. La función  $\tilde{u}_{cont}(t)$  se reduce linealmente desde su valor inicial a cero:

$$\tilde{u}_{cont}(t) = \begin{cases} \tilde{u}_{cont}(0) - a_{max} \cdot t & \text{si } \tilde{u}_{cont}(0) > 0 \wedge t < \frac{\tilde{u}_{cont}(0)}{a_{max}} \\ \tilde{u}_{cont}(0) + a_{max} \cdot t & \text{si } \tilde{u}_{cont}(0) < 0 \wedge t < \frac{\tilde{u}_{cont}(0)}{-a_{max}} \\ \text{de lo contrario} & 0. \end{cases} \quad (19)$$

El valor inicial se elige como

$$\tilde{u}_{cont}(0) = \tilde{u} - K_{FB} \tilde{x}, \quad (20)$$

con  $t = 0$  definido como el instante de tiempo de la transición al planificador de emergencia. Esta elección de la condición (20) inicial asegura que la señal de control de emergencia sea idéntica a la señal de control óptima cuando se produce la transición al planificador de emergencia.

#### IV. Resultados

En esta sección, se presentan tres escenarios que demuestran diferentes funciones del planificador de trayectoria. En primer lugar, se muestra una simulación de una maniobra de retroceso durante la cual las restricciones de ángulo del cable así como las restricciones de la tasa de entrada se activan. En segundo lugar, se presenta un viaje con diversas transiciones entre la solución de problema de control óptimo y la solución de emergencia. El tercer escenario se midió

durante una prueba en una grúa como se muestra en la Fig. 1. Muestra cómo la grúa se detiene en una restricción de posición aunque la velocidad objetivo no sea cero.

A. Escenario 1: control de retroceso

5 La figura 8 muestra los resultados de la simulación de una vuelta del engranaje de giro a una longitud  $L$  de cable = 65 m. En  $t = 10s$ , la velocidad objetivo se establece en  $\omega = +100\%$ , ver la Figura 7(a). Tanto la señal  $\tilde{u}$  de entrada como la velocidad  $\dot{\varphi}_L$  de carga convergen a la velocidad objetivo dentro de aproximadamente 15 segundos. En  $t = 70s$ , la velocidad objetivo se invierte ( $\omega = -100\%$ ). Una vez que se detectó la verificación, la restricción de  $a_{max}$  se amplía, lo que permite una desaceleración más rápida. Esto produce deflexiones de péndulo más altas, ver Figura 7(b). En  $t = 10$  75.3s, se alcanza la deflexión máxima permitida del péndulo. Luego, la señal de entrada disminuye aún más, convergiendo a la nueva velocidad objetivo. La Figura 7(c) muestra el contador de iteración de IP durante esta simulación. Se puede ver que el algoritmo necesita la mayoría de las iteraciones cuando muchas restricciones están activas, por ejemplo, cuando se lleva a cabo una verificación de respaldo.

B. Escenario 2: transición a planificador de emergencia

15 La figura 8 presenta la señal  $\tilde{u}$  de control y la tasa de giro  $\dot{\varphi}_L$  resultante en un escenario donde ocurren transiciones artificiales desde la solución de control óptima hasta el planificador de emergencia. En cada transición, la señal de control se continúa sin contratiempos. Además, si no tiene lugar una transición de regreso a la solución de control óptima (en la Figura 8 para  $t \geq 55s$ ), se puede ver que la solución de emergencia estabiliza la trayectoria de referencia, llevando la grúa a un estado seguro y estable.

C. Escenario 3: detenerse en restricciones de posición

20 Los datos presentados en el tercer escenario (véase la Figura 9) no se simulan, pero se capturaron durante una prueba de manejo en una grúa LHM 420 con una longitud de cable de aproximadamente  $L = 35$  m.

25 Se han habilitado las restricciones  $\varphi_{min} \leq \varphi_L \leq \varphi_{max}$  de posición artificial. Después, la velocidad objetivo se establece en  $w = +100\%$ , por lo que la grúa se aproxima a la restricción de posición  $\varphi_L = \varphi_{max}$  y llega a un punto muerto. Más tarde, la velocidad objetivo se establece en  $\omega = -100\%$ , por lo que la grúa se aproxima a  $\varphi_L = \varphi_{min}$ . La Figura 9(b) muestra la buena correspondencia de la posición de carga planificada con la posición real de la planta, y posteriormente la Figura 9(a) muestra que el control estabilizador tiene solo una pequeña amplitud, por ejemplo, está cerca de  $\tilde{u}$ .

V. Conclusión

30 Como una realización de la presente invención, se presentó un algoritmo de planificación de trayectorias de referencia predictivo del modelo restringido en tiempo real para grúas giratorias. El algoritmo genera una trayectoria suave que converge a una determinada velocidad objetivo. La trayectoria es consistente con numerosas limitaciones físicas de una grúa giratoria. Además, se realizan funciones de confort tales como la desaceleración automática antes de los límites de las posiciones y una desaceleración más fuerte en situaciones de emergencia. La trayectoria se encontró resolviendo repetidamente un problema de control óptimo en tiempo real en una unidad de control industrial. En caso 35 de que el algoritmo de optimización no dé ningún resultado válido, una estrategia de emergencia garantiza la continuación del funcionamiento de la grúa.

**REIVINDICACIONES**

1. Un controlador de grúa para el control semiautomático de una grúa giratoria, comprendiendo la grúa al menos un accionador giratorio para crear un movimiento de giro de la grúa y/o un accionador de amantillado para crear un movimiento de amantillado de la grúa, comprendiendo el controlador de grúa
- 5 una unidad de entrada que puede ser operada por un operador para proporcionar una velocidad de giro deseada y/o una velocidad de amantillado deseada como una entrada del operador y
- un módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo que comprende una unidad de optimización para calcular una trayectoria de referencia que obedece a la dinámica del sistema y sigue la entrada del operador, y
- 10 un controlador de prealimentación que utiliza la trayectoria de referencia para controlar el accionador de giro y/o el accionador de amantillado, por lo que la unidad de optimización toma en cuenta la deflexión del cable en la dirección tangencial y/o radial cuando se resuelve el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia, caracterizado en
- 15 un módulo de planificación de trayectorias de emergencia, en donde la salida del módulo de planificación de trayectorias de emergencia es utilizado por el controlador de prealimentación si la unidad de optimización del módulo de planificación de trayectorias de referencia predictivo del modelo no proporciona una trayectoria de referencia dentro de un marco de tiempo predefinido.
2. El controlador de grúa de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la unidad de optimización usa la deflexión máxima permitida del cable como una restricción cuando se calcula la trayectoria de referencia.
- 20 3. El controlador de grúa de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, en el que la unidad de optimización utiliza una función de penalización para penalizar las deflexiones del cable y/o cambios en la deflexión del cable cuando se calcula la trayectoria de referencia.
4. El controlador de grúa de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el controlador de grúa comprende además, en combinación con el controlador de prealimentación, un controlador de prealimentación que utiliza una o más señales de sensor para el control de prealimentación de la grúa, comprendiendo preferiblemente el controlador de prealimentación un observador de estado para estimar el estado del sistema de grúa a partir de las señales de uno o más sensores y las señales de control utilizadas para controlar el accionador de giro y/o el accionador de amantillado.
- 25 5. El controlador de grúa de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la unidad de optimización usa la amplitud máxima permisible y/o la tasa máxima de cambio permitida de la señal de control para el accionador de giro y/o el accionador de amantillado como una restricción al resolver el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia.
- 30 6. El controlador de grúa de la reivindicación 5, en donde la unidad de optimización tiene en cuenta, cuando utiliza la amplitud máxima de la señal de control como restricción, una posible entrada de control desde el controlador de prealimentación, en donde se supone preferiblemente que la entrada de control desde controlador de realimentación es constante durante el horizonte de predicción.
- 35 7. El controlador de grúa de la reivindicación 5 o 6, en donde, en funcionamiento normal, la unidad de optimización utiliza una tasa de cambio de la señal de control que está por debajo de la tasa de cambio máxima permitida de la señal de control como restricción, en la que el controlador de grúa comprende preferiblemente una unidad de detección de situación de emergencia, y en el que la unidad de optimización usa la tasa de cambio máxima permisible de la señal de control como una restricción durante la operación de emergencia.
- 40 8. El controlador de grúa de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, donde la entrada del operador se modifica automáticamente cuando la grúa se aproxima a un límite de posición, donde preferiblemente la entrada del operador se modifica mediante una función de corte cuando la grúa está a cierta distancia del límite de posición, y/o en donde el controlador de grúa comprende preferiblemente una unidad de predicción de detención que predice una posición de grúa donde la entrada del operador debe ser modificada para detener la grúa en o antes del límite de posición, donde la unidad de predicción de detención utiliza preferiblemente una tabla de búsqueda que proporciona predicciones de detención predefinidas, preferiblemente dependiendo al menos de la velocidad de giro y/o de amantillado y/o ángulo de deflexión del cable y/o velocidad del ángulo de deflexión del cable y/o longitud del cable y/o señal de control actual, en particular dependiendo de la velocidad de giro y/o de amantillado y ángulo de deflexión del cable.
- 45 9. El controlador de grúa de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde un problema de control óptimo se resuelve durante un horizonte de predicción de entre 3 s y 30 s, preferiblemente entre 5 s y 20 s, y/o en el que el horizonte de predicción se discretiza usando entre 3 y 30 etapas de discretización, y/o en el que el problema de control óptimo se resuelve en menos de 150 ms, preferiblemente en menos de 100 ms.
- 50

- 5 10. El controlador de grúa de la reivindicación 1, que comprende además un módulo de verificación de verosimilitud para verificar si la trayectoria proporcionada por el módulo de planificación de la trayectoria de referencia predictivo del modelo cumple uno o más criterios de verosimilitud, donde el módulo de planificación de trayectoria de emergencia es utilizado por el controlador de prealimentación si la trayectoria proporcionada por el módulo de planificación de la trayectoria de referencia predictivo del modelo no cumple con los criterios de verosimilitud verificados en el módulo de verificación de verosimilitud.
- 10 11. El controlador de grúa de la reivindicación 1 o 10, en donde el módulo de planificación de trayectoria de emergencia crea una trayectoria que lleva la grúa a un estado estable, donde el módulo de planificación de trayectoria de emergencia comprende preferiblemente una parte de desaceleración, y/o en el que el módulo de planificación de trayectoria de emergencia crea preferiblemente una trayectoria que constantemente continúa la trayectoria desde el módulo de planificación de trayectoria de referencia predictivo del modelo.
- 15 12. Una grúa giratoria que comprende un controlador de grúa de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo la grúa preferiblemente una torre giratoria que puede ser rotada por el accionador de giro y una pluma montada pivotalmente en la torre giratoria que puede elevarse y bajarse mediante el accionador de amantillado y que comprende además un engranaje de izamiento para elevar y bajar una carga que cuelga de un cable.
- 20 13. Un programa de ordenador, preferiblemente un programa de ordenador almacenado en una memoria legible por ordenador, para implementar un controlador de grúa de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
- 20 14. Un método para el control semiautomático de una grúa giratoria, que utiliza un controlador de grúa de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo la grúa al menos un accionador giratorio para crear un movimiento de giro de la grúa y/o un accionador de amantillado para crear un movimiento de amantillado de la grúa,
- 25 en donde un operador proporciona una velocidad de giro deseada y/o una velocidad de amantillado deseada como una entrada del operador y se planifica una trayectoria de referencia predictivo del modelo resolviendo un problema de optimización que proporciona una trayectoria de referencia que obedece a la dinámica del sistema y sigue la entrada del operador, y
- la trayectoria de referencia se usa para el control de prealimentación del accionador de giro y/o del accionador de amantillado,
- caracterizado porque
- 30 la deflexión del cable en la dirección tangencial y/o radial se tiene en cuenta al resolver el problema de optimización que proporciona la trayectoria de referencia y una trayectoria de emergencia se usa para el control de retroalimentación si el problema de optimización no se puede resolver dentro de un marco de tiempo predefinido.

Fig. 1

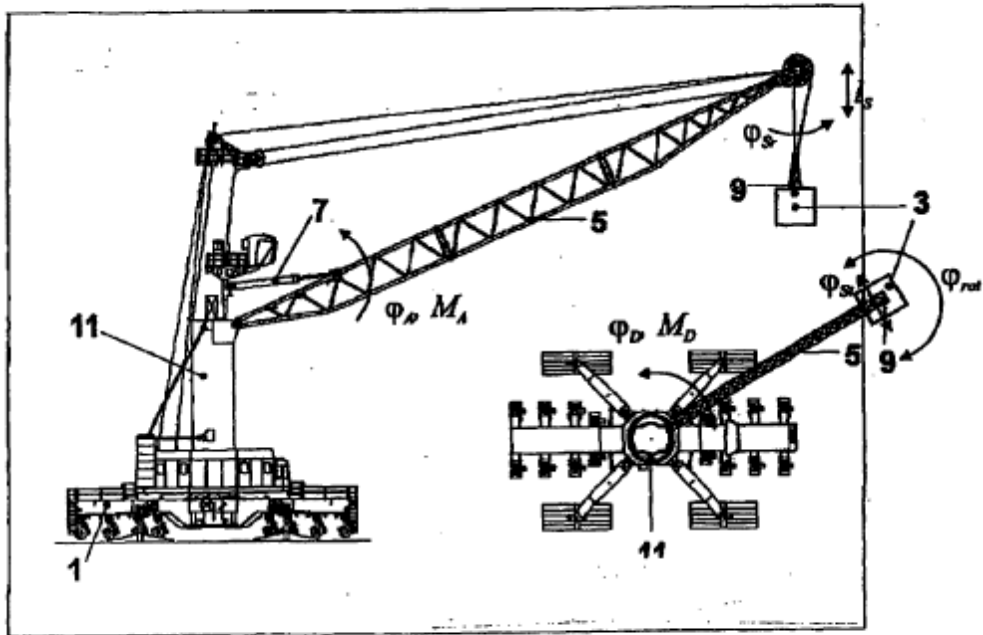


Fig. 2

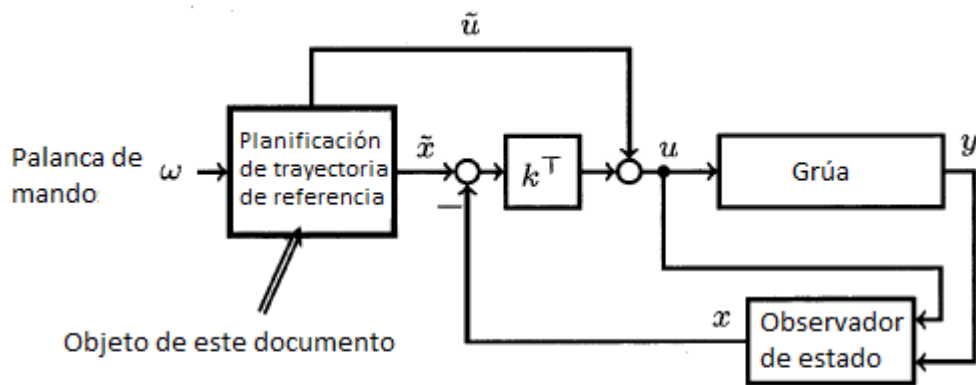
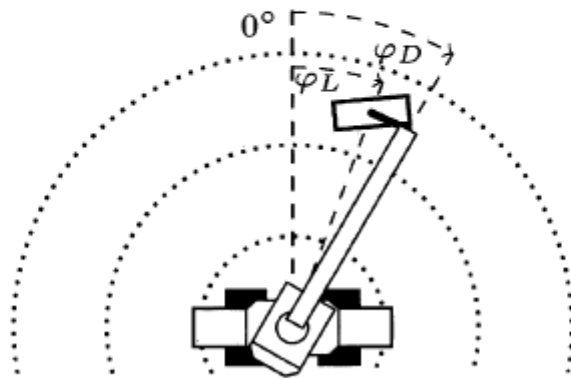




Fig. 3

Vista superior:



Vista 3D:

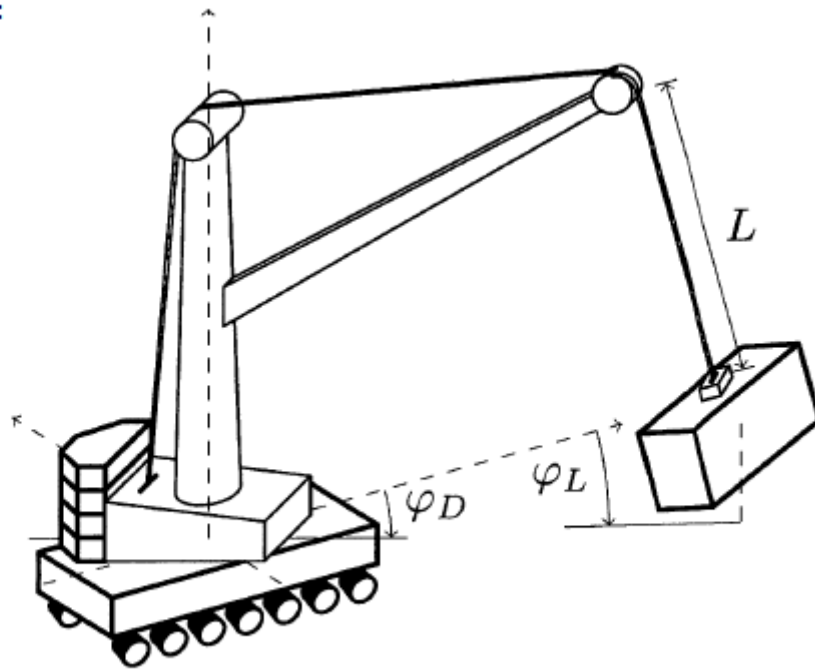


Fig. 4

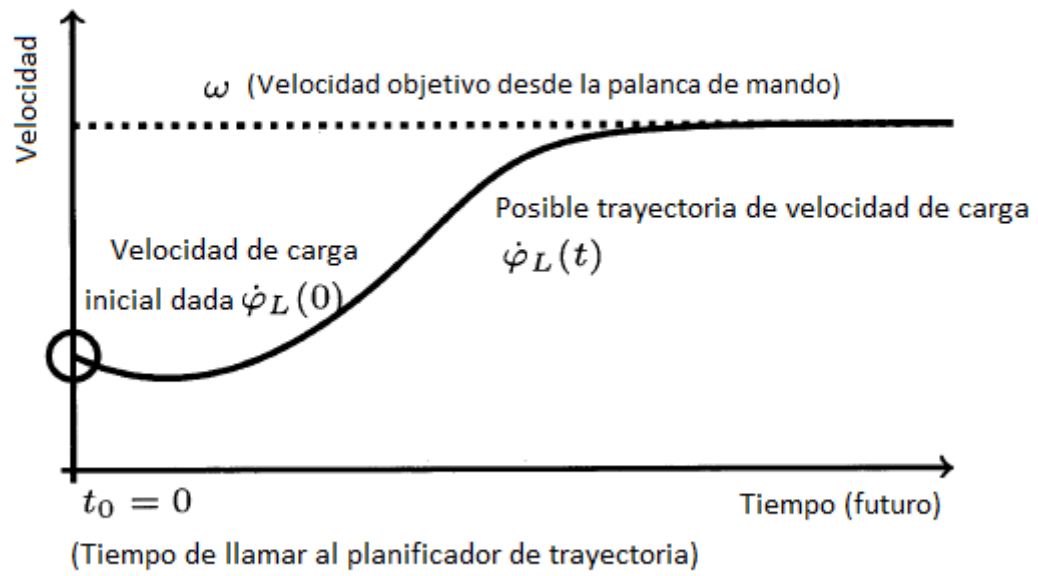


Fig. 5

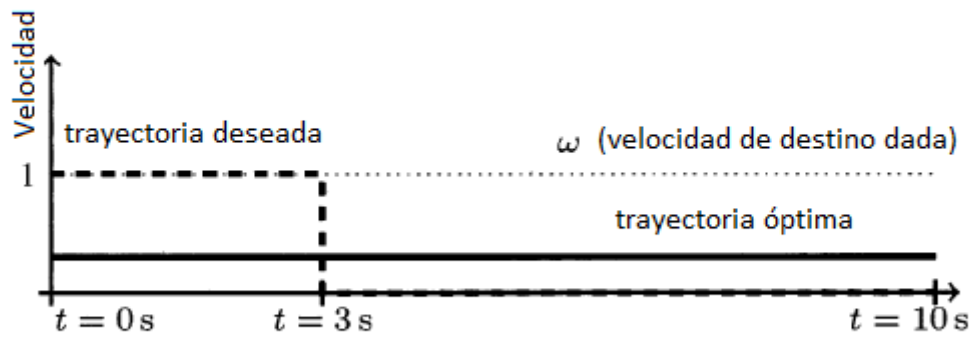


Fig. 6

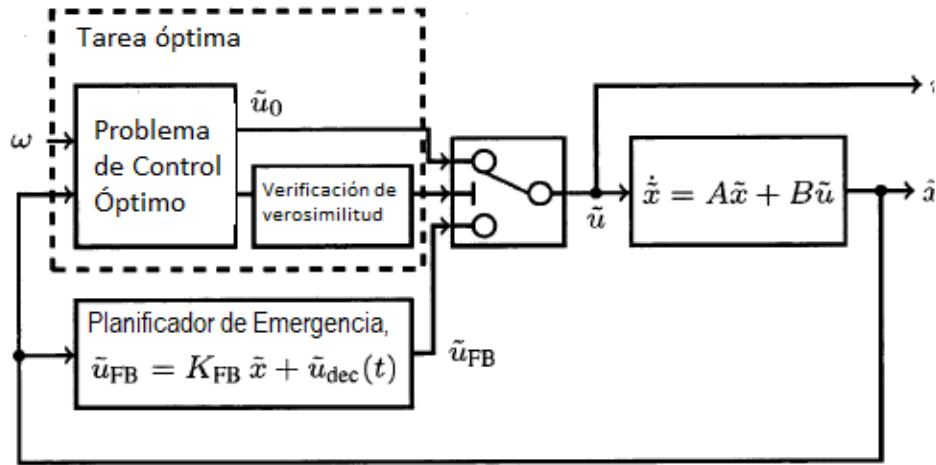


Fig. 7a



Fig. 7b

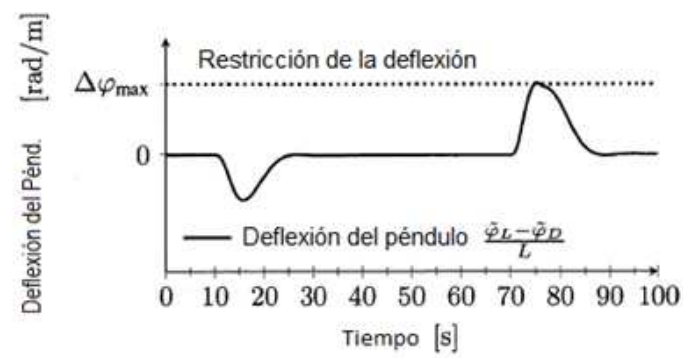


Fig. 7c

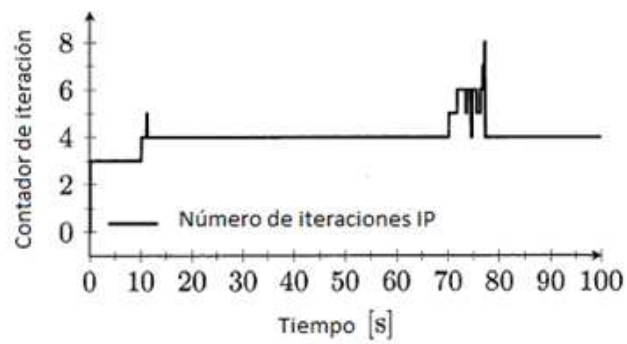


Fig. 8

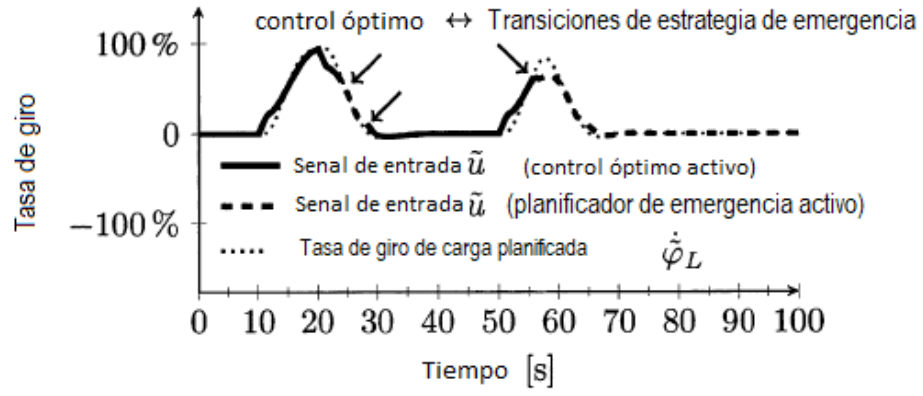


Fig. 9a

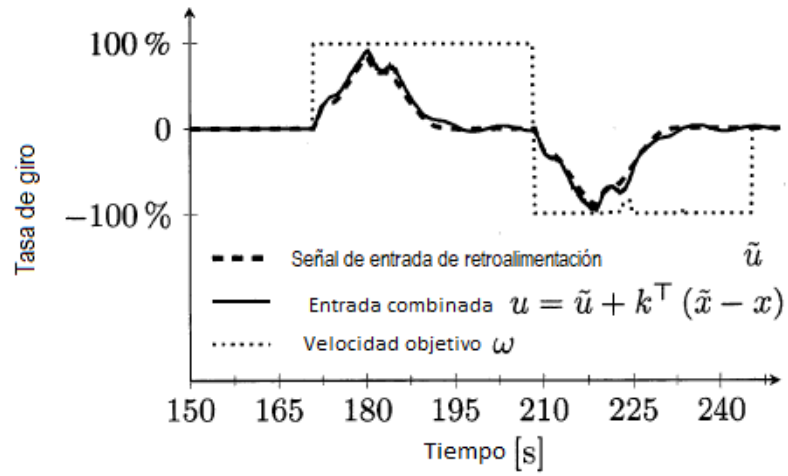


Fig. 9b

