

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 994 368**

51 Int. Cl.:

B66C 13/06 (2006.01)
B66C 13/08 (2006.01)
B66C 13/46 (2006.01)
B66C 13/48 (2006.01)
B66F 9/075 (2006.01)
B66F 9/24 (2006.01)
B66C 19/00 (2006.01)
B66F 9/065 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.06.2022** **E 22180718 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.10.2024** **EP 4144681**

54 Título: **Compensación de flexión dinámica, control de elevación coordinado y control anti-balanceo para máquinas de manipulación de cargas**

30 Prioridad:

24.06.2021 FI 20215750

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.01.2025

73 Titular/es:

KALMAR FINLAND OY (100.00%)
P.O. Box 387
33101 Tampere, FI

72 Inventor/es:

VIHONEN, JUHO;
AREF, MOHAMMAD M.;
PETRIK, VLADIMÍR;
ARNDT, KAROL;
DAVID, BLANCO MULERO;
KYRKI, VILLE;
NASKALI, JUUSO y
RASINEN, MARKO

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 994 368 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

Compensación de flexión dinámica, control de elevación coordinado y control anti-balanceo para máquinas de manipulación de cargas

Campo técnico

Diversos ejemplos de realización se relacionan en general con el campo de la manipulación de cargas. En particular, algunos ejemplos de realización se relacionan con la compensación de flexión dinámica, el control de elevación coordinado o el control anti-balanceo para máquinas de manipulación de cargas, como por ejemplo grúas de patio, manipuladores telescópicos, carretillas pórtico o similares.

Antecedentes

En diversos campos de la industria puede resultar deseable una manipulación eficiente de cargas pesadas. Por ejemplo, la elevación y manipulación de contenedores de carga puede resultar complicada debido a los fuertes vientos y otras perturbaciones externas que se producen en un entorno de patio. Por diversas razones, puede resultar deseable además reducir la masa de los diferentes componentes de las máquinas de manipulación de cargas, lo que puede provocar dificultades adicionales para controlar el movimiento de la carga. El documento de patente US 6.496.765 B1 describe un aparato y un procedimiento de acuerdo con el preámbulo de las reivindicaciones 1 y 12 respectivamente, que proporcionan una forma de generar comandos de grúa en respuesta a un movimiento de carga útil deseado para lograr un movimiento de carga útil real sustancialmente libre de oscilaciones. El sistema de control y el procedimiento aplican un compensador de movimiento para mantener una carga útil en una configuración de carga útil definida en relación con un sistema de coordenadas inercial. El sistema de control y el procedimiento pueden comprender además un controlador de amortiguador de oscilaciones para reducir una cantidad de oscilaciones entre una configuración de carga útil detectada y la configuración de carga útil definida.

Sumario

Este sumario se proporciona a fin de presentar una selección de conceptos de manera simplificada que se describen con mayor detalle a continuación en la descripción detallada. Este sumario no pretende identificar características clave o características esenciales del objeto reivindicado, ni tampoco se pretende que se utilice para limitar el alcance del objeto reivindicado.

Las realizaciones ejemplares permiten mejorar el control del movimiento de un objetivo o de varios objetivos, por ejemplo, una carga suspendida, como un contenedor. Este y otros beneficios pueden lograrse mediante las características de las reivindicaciones independientes. Se proporcionan formas de implementación ventajosas adicionales en las reivindicaciones dependientes, la descripción y los dibujos.

De acuerdo con un primer aspecto, un aparato puede comprender: una base flotante que comprende un sistema de observación exteroceptivo configurado para medir una posición o velocidad de al menos un objetivo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia que se mueve con la base flotante, en el que la base flotante además comprende una unidad de medición inercial configurada para medir al menos un estado inercial de la base flotante con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial; y medios para realizar una compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo basándose en una inferencia estadística sobre la posición o velocidad medida del al menos un objetivo y el al menos un estado inercial de la base flotante.

De acuerdo con una realización ejemplar del primer aspecto, la base flotante puede comprender un brazo configurado para elevar o manipular el al menos un objetivo, o la base flotante puede comprender una viga de una grúa.

De acuerdo con una realización del primer aspecto, la base flotante puede comprender un carro que se puede mover a lo largo de una viga de una grúa. El al menos un estado inercial de la base flotante puede comprender la aceleración del carro. El aparato puede comprender además: medios para determinar una posición del carro con respecto a la viga; y medios para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo basándose además en la posición del carro con respecto a la viga.

De acuerdo con una realización del primer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para fusionar la posición del carro y la aceleración del carro con un filtro Kalman; medios para determinar una señal de error para un filtro adaptativo basándose en una resta de la posición del carro y una salida del filtro Kalman; y medios para filtrar la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo con el filtro adaptativo para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo.

De acuerdo con una realización del primer aspecto, el filtro adaptativo puede comprender un filtro de mínimos cuadrados recursivo.

5 De acuerdo con una realización del primer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para fusionar la posición del carro y la aceleración del carro con una primera red neuronal; y medios para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo mediante una segunda red neuronal en función de la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y una salida de la primera red neuronal.

10 De acuerdo con una realización del primer aspecto, la posición de velocidad del al menos un objetivo puede ser indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo de un primer eje del sistema de coordenadas de referencia inercial sustancialmente paralelo a la viga. La aceleración del carro puede ser indicativa de la aceleración del carro a lo largo del primer eje.

15 De acuerdo con una realización ejemplar del primer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para medir una velocidad del carro con respecto a la viga; y medios para determinar la posición del carro con respecto a la viga basándose en una integración de la velocidad del carro con respecto a la viga con respecto al tiempo.

20 De acuerdo con una realización del primer aspecto, la grúa puede ser móvil a lo largo de un segundo eje del sistema de coordenadas de referencia inercial sustancialmente perpendicular a la viga. La posición o velocidad del al menos un objetivo puede ser además indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo del segundo eje y la aceleración del carro puede ser además indicativa de la aceleración del carro a lo largo del segundo eje.

25 De acuerdo con una realización ejemplar del primer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para medir una velocidad de la grúa con respecto al segundo eje; y medios para determinar la posición del carro basándose además en una integración de la velocidad de la grúa con respecto al segundo eje con respecto al tiempo.

30 De acuerdo con una realización del primer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para realizar el control de movimiento del al menos un objetivo en función de la posición o velocidad del al menos un objetivo.

De acuerdo con una realización ejemplar del primer aspecto, el al menos un objetivo puede comprender una carga suspendida.

35 De acuerdo con un segundo aspecto no cubierto por la invención, un aparato puede comprender: una pluralidad de polipastos para operar una carga suspendida; medios para determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida; medios para mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos con base en una función de mapeo multivariable; medios para ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión con al menos un elemento neutro de la función de mapeo multivariable de tal manera que cada una de la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión sea superior o igual a un umbral, en el que el ajuste del al menos un elemento neutro no cambia el mapeo de la fuerza o velocidad espacial cartesiana a la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión.

45 De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, la fuerza o velocidad espacial cartesiana puede estar configurada para controlar el movimiento plano y/o la rotación plana de la carga suspendida.

50 De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, la fuerza o velocidad espacial cartesiana puede estar configurada para controlar el movimiento plano de la carga suspendida a lo largo de un primer eje y un segundo eje de un sistema de coordenadas de referencia inercial y la rotación plana alrededor de un tercer eje del sistema de coordenadas de referencia inercial.

55 De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el primer eje y el segundo eje pueden ser perpendiculares entre sí y paralelos al suelo. El tercer eje puede ser perpendicular al primer eje y al segundo eje.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, la función de mapeo multivariable puede comprender un subconjunto de una matriz jacobiana y el al menos un elemento neutro puede estar dentro de un espacio nulo del subconjunto de la matriz jacobiana.

60 De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el subconjunto de la matriz jacobiana puede comprender columnas de la matriz jacobiana correspondientes a componentes de fuerza lineal de la fuerza espacial cartesiana para el primer eje y el segundo eje y un componente de par de torsión de la fuerza espacial cartesiana para el tercer eje.

65 De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, la pluralidad de polipastos puede estar acoplada

de manera fija a un carro de una grúa en un primer conjunto de puntos de conexión y a un bloque de cabeza de la grúa en un segundo conjunto de puntos de conexión. El bloque de cabeza puede estar configurado para estar unido a la carga suspendida. El aparato puede comprender además: medios para determinar, en función de las ubicaciones del primer conjunto de puntos de conexión y del segundo conjunto de puntos de conexión, una pluralidad de vectores unitarios cartesianos, $\hat{s}_i$, correspondientes a direcciones de la pluralidad de polipastos; medios para determinar una pluralidad de vectores de brazo de par de torsión cartesiano, $\vec{E}_i$, desde un centro del bloque de cabeza hasta el segundo conjunto de puntos de conexión, en el que una transpuesta $\mathcal{J}^T$ de la matriz jacobiana tiene un tamaño de $6 \times N$, y en el que

$$\mathcal{J}^T = \begin{bmatrix} \vec{S}_1 & \dots & \vec{S}_N \\ \vec{E}_1 \times \vec{S}_1 & \dots & \vec{E}_N \times \vec{S}_N \end{bmatrix},$$

en la que $N \geq 4$ es un número de la pluralidad de polipastos y $\times$ denota un producto vectorial, y en la que la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión, τ , satisface $\mathbf{F}_c = \mathcal{J}^T \tau$, en la que $\mathbf{F}_c$ comprende la fuerza espacial cartesiana.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el carro puede ser móvil a lo largo de una viga de la grúa, y el aparato puede comprender además: medios para determinar una ubicación del carro con respecto a la viga; y medios para determinar las ubicaciones del primer conjunto de puntos de conexión en función de la ubicación del carro con respecto a la viga.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato puede comprender además: medios para determinar una ubicación del bloque de cabeza; y medios para determinar ubicaciones del segundo conjunto de puntos de conexión en función de la ubicación del bloque de cabeza.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato puede comprender además: medios para determinar la fuerza o velocidad espacial cartesiana basándose en un controlador lineal configurado para controlar el movimiento de la carga suspendida basándose en un conjunto de valores de entrada deseados y datos de retroalimentación indicativos de al menos el movimiento de la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato puede comprender además: medios para aplicar al menos un término de corrección de fuerza o velocidad espacial cartesiana a la fuerza o velocidad espacial cartesiana.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato puede comprender además: medios para aplicar al menos un término de corrección de fuerza de tensión o par de torsión del espacio de elevación a la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato puede comprender además: medios para determinar datos de retroalimentación del polipasto basándose en la aplicación de una inversa de la función de mapeo multivariable a los datos de medición del espacio de elevación asociados con la pluralidad de polipastos, en el que el controlador lineal está configurado además para controlar el movimiento de la carga suspendida basándose en los datos de retroalimentación del polipasto.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, los datos de medición del espacio de elevación pueden comprender al menos uno de: una pluralidad de velocidades de cabrestante, una pluralidad de posiciones de cabrestante, una pluralidad de pares de torsión de cabrestante o errores para la pluralidad de cabrestantes.

De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato de acuerdo con cualquier realización ejemplar del segundo aspecto puede comprender el aparato de acuerdo con cualquier realización ejemplar del primer aspecto.

De acuerdo con un tercer aspecto no cubierto por la invención, un aparato puede comprender: una pluralidad de polipastos para operar una carga suspendida; medios para determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida; medios para mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos; medios para determinar al menos un primer término de control anti-balanceo basado en una primera red neuronal configurada para tomar como entrada una altura de la carga suspendida desde el suelo y una masa de la carga suspendida; medios para ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión basándose en el al menos un primer término de control anti-balanceo y al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida; y medios para aplicar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión a la pluralidad de polipastos para controlar el movimiento de la carga suspendida.

- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para determinar al menos un segundo término de control anti-balanceo basado en una segunda red neuronal configurada para tomar como entrada la altura de la carga útil desde el suelo, la masa de la carga útil y la velocidad del viento y/o la dirección del viento; medios para ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión basándose además en el al menos un segundo término de control anti-balanceo.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el al menos un primer término de control anti-balanceo puede comprender una matriz de control anti-balanceo, y el ajuste de la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión puede comprender una multiplicación o una suma de la matriz de control anti-balanceo y un vector de velocidad que comprende las al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el al menos un segundo término de control anti-balanceo puede comprender un vector de control anti-balanceo, y el ajuste de la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión puede comprender además la adición del vector de control anti-balanceo a un resultado de la multiplicación o la suma de la matriz de control anti-balanceo y el vector de velocidad.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y/o del al menos un segundo término de control anti-balanceo. La primera red neuronal puede estar configurada para determinar el término de control anti-balanceo para el control del espacio de elevación.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, las al menos dos velocidades pueden comprender velocidades de al menos dos puntos de referencia estacionarios con respecto a la carga suspendida.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, las velocidades de los al menos dos puntos de referencia pueden comprender velocidades con respecto a un primer eje y un segundo eje, en el que el primer eje y el segundo eje son perpendiculares entre sí y paralelos al suelo.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, los al menos dos puntos de referencia pueden comprender al menos dos esquinas de un propagador acoplado a la pluralidad de polipastos o al menos dos esquinas de la carga suspendida. El propagador puede estar configurado para estar fijado a la carga suspendida.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el aparato puede comprender además: medios para ajustar la fuerza o velocidad del espacio cartesiano en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y/o del al menos un segundo término de control anti-balanceo. La primera red neuronal puede estar configurada para determinar el primer término de control anti-balanceo para el control del espacio cartesiano.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, las al menos dos velocidades pueden comprender una velocidad lineal de la carga suspendida con respecto a un primer eje, una velocidad lineal de la carga suspendida con respecto a un segundo eje y una velocidad angular de la carga suspendida con respecto a un tercer eje. El primer eje y el segundo eje pueden ser perpendiculares entre sí y paralelos al suelo y el tercer eje puede ser perpendicular al primer eje y al segundo eje.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, el aparato puede comprender además: un controlador lineal configurado para determinar la fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida basándose en un conjunto de valores de entrada deseados y datos de retroalimentación indicativos del movimiento de la carga suspendida.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, la primera red neuronal puede comprender una red neuronal entrenada con base en aprendizaje de refuerzo con una primera función de recompensa que comprende una velocidad lineal y una velocidad angular de la carga suspendida en un plano definido por el primer eje y el segundo eje o con una segunda función de recompensa que comprende las al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida y una relación entre la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión y un valor máximo de par de torsión anti-balanceo soportado.
- De acuerdo con una realización ejemplar del tercer aspecto, la segunda red neuronal puede comprender una red neuronal entrenada con base en un algoritmo de descenso de gradiente con una función de costo que comprende una posición de estado estable y una orientación de estado estable de la carga suspendida.
- De acuerdo con una realización ejemplar del segundo aspecto, el aparato de acuerdo con cualquier realización ejemplar de acuerdo con el segundo aspecto puede comprender el aparato de acuerdo con cualquier realización

ejemplar del tercer aspecto.

De acuerdo con un cuarto aspecto, un procedimiento puede comprender: medir, mediante un sistema de observación exteroceptivo acoplado a una base flotante, una posición o velocidad de al menos un objetivo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia que se mueve con la base flotante; medir, mediante una unidad de medición inercial, al menos un estado inercial de la base flotante con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial; y realizar una compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo basándose en una inferencia estadística sobre la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y el al menos un estado inercial de la base flotante.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, la base flotante puede comprender un brazo configurado para elevar o manipular el al menos un objetivo, o la base flotante puede comprender una viga de una grúa.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, la base flotante puede comprender un carro que se puede mover a lo largo de una viga de una grúa. El al menos un estado inercial de la base flotante puede comprender la aceleración del carro. El procedimiento puede comprender además: determinar una posición del carro con respecto a la viga; y realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo basándose además en la posición del carro con respecto a la viga.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el procedimiento puede comprender además: fusionar la posición del carro y la aceleración del carro con un filtro Kalman; determinar una señal de error para un filtro adaptativo basándose en una resta de la posición del carro y una salida del filtro Kalman; y filtrar la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo con el filtro adaptativo para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el filtro adaptativo puede comprender un filtro de mínimos cuadrados recursivo.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el procedimiento puede comprender además: fusionar la posición del carro y la aceleración del carro con una primera red neuronal; y realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo mediante una segunda red neuronal en función de la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y una salida de la primera red neuronal.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, la posición o velocidad del al menos un objetivo puede ser indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo de un primer eje del sistema de coordenadas de referencia inercial sustancialmente paralelo a la viga. La aceleración del carro puede ser indicativa de la aceleración del carro a lo largo del primer eje.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el procedimiento puede comprender además: medir una velocidad del carro con respecto a la viga; y determinar la posición del carro con respecto a la viga basándose en una integración de la velocidad del carro con respecto a la viga con respecto al tiempo.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, la grúa puede ser móvil a lo largo de un segundo eje del sistema de coordenadas de referencia inercial sustancialmente perpendicular a la viga. La posición o velocidad del al menos un objetivo puede ser además indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo del segundo eje y la aceleración del carro puede ser además indicativa de la aceleración del carro a lo largo del segundo eje.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el procedimiento puede comprender además: medir una velocidad de la grúa con respecto al segundo eje; y determinar la posición del carro basándose además en una integración de la velocidad de la grúa con respecto al segundo eje con respecto al tiempo.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el procedimiento puede comprender además: realizar un control de movimiento del al menos un objetivo en función de la posición o velocidad del al menos un objetivo.

De acuerdo con una realización ejemplar del cuarto aspecto, el al menos un objetivo puede comprender una carga suspendida.

De acuerdo con un quinto aspecto no cubierto por la invención, un procedimiento puede comprender: determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida, en el que la carga suspendida es operable con una pluralidad de polipastos; mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos con base en una función de mapeo multivariable; y ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión con al menos un

elemento neutro de la función de mapeo multivariable de tal manera que cada una de la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión sea superior o igual a un umbral, en el que el ajuste del al menos un elemento neutro no cambia el mapeo de la fuerza o velocidad espacial cartesiana a la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión.

5

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: controlar, en función de la fuerza o velocidad espacial cartesiana, el movimiento plano y/o la rotación plana de la carga suspendida.

10

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: controlar, en función de la fuerza o velocidad espacial cartesiana, el movimiento plano de la carga suspendida a lo largo de un primer eje y un segundo eje de un sistema de coordenadas de referencia inercial y la rotación plana alrededor de un tercer eje del sistema de coordenadas de referencia inercial.

15

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el primer eje y el segundo eje pueden ser perpendiculares entre sí y paralelos al suelo. El tercer eje puede ser perpendicular al primer eje y al segundo eje.

20

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, la función de mapeo multivariable puede comprender un subconjunto de una matriz jacobiana y el al menos un elemento neutro puede estar dentro de un espacio nulo del subconjunto de la matriz jacobiana.

25

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el subconjunto de la matriz jacobiana puede comprender columnas de la matriz jacobiana correspondientes a componentes de fuerza lineal de la fuerza espacial cartesiana para el primer eje y el segundo eje y un componente de par de torsión de la fuerza espacial cartesiana para el tercer eje.

30

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, la pluralidad de polipastos puede estar acoplada de manera fija a un carro de una grúa en un primer conjunto de puntos de conexión y a un bloque de cabeza de la grúa en un segundo conjunto de puntos de conexión. El bloque de cabeza puede estar configurado para estar unido a la carga suspendida. El procedimiento puede comprender además: determinar, en función de las ubicaciones del primer conjunto de puntos de conexión y del segundo conjunto de puntos de conexión, una pluralidad de vectores unitarios cartesianos, $\hat{\mathbf{s}}_i$, correspondientes a direcciones de la pluralidad de polipastos; determinar una pluralidad de vectores de brazo de par de torsión cartesiano, $\hat{\mathbf{e}}_i$, desde un centro del bloque de cabeza hasta el segundo conjunto de puntos de conexión, en el que una transpuesta $\mathbf{J}^T$ de la matriz jacobiana tiene un tamaño de $6 \times N$, y en el que

35

$$\mathbf{J}^T = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_1 & \dots & \hat{\mathbf{s}}_N \\ \vec{\mathbf{e}}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1 & \dots & \vec{\mathbf{e}}_N \times \hat{\mathbf{s}}_N \end{bmatrix},$$

40

en la que $N \geq 4$ es un número de la pluralidad de polipastos y $\times$ denota un producto vectorial, y en la que la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión, τ_i , satisface $\mathbf{F}_c = \mathbf{J}^T \tau_i$, en el que $\mathbf{F}_c$ comprende la fuerza cartesiana.

45

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el carro puede moverse a lo largo de una viga de la grúa, y el procedimiento puede comprender además: determinar una ubicación del carro con respecto a la viga; y determinar las ubicaciones del primer conjunto de puntos de conexión en función de la ubicación del carro con respecto a la viga.

50

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: determinar una ubicación del bloque de cabeza; y determinar ubicaciones del segundo conjunto de puntos de conexión en función de la ubicación del bloque de cabeza.

55

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: determinar la fuerza o velocidad espacial cartesiana basándose en un controlador lineal configurado para controlar el movimiento de la carga suspendida basándose en un conjunto de valores de entrada deseados y datos de retroalimentación indicativos de al menos el movimiento de la carga suspendida.

60

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: aplicar al menos un término de corrección de fuerza o velocidad espacial cartesiana a la fuerza o velocidad espacial cartesiana.

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: aplicar al menos un término de corrección de fuerza de tensión o par de torsión del espacio de elevación a la

pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión.

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento puede comprender además: determinar datos de retroalimentación del polipasto basándose en la aplicación de una inversa de la función de mapeo multivariable a los datos de medición del espacio de elevación asociados con la pluralidad de polipastos; y controlar, mediante el controlador lineal, el movimiento de la carga suspendida basándose en los datos de retroalimentación del polipasto.

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, los datos de medición del espacio de elevación pueden comprender al menos uno de: una pluralidad de velocidades de cabrestante, una pluralidad de posiciones de cabrestante, una pluralidad de pares de torsión de cabrestante o errores para la pluralidad de cabrestantes.

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento de acuerdo con cualquier realización ejemplar del quinto aspecto puede comprender cualquier realización ejemplar del procedimiento del cuarto aspecto.

De acuerdo con un sexto aspecto no cubierto por la invención, un procedimiento puede comprender: determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de una carga suspendida, en el que la carga suspendida es operable con una pluralidad de polipastos; mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos; determinar al menos un primer término de control anti-balanceo basado en una primera red neuronal configurada para tomar como entrada una altura de la carga suspendida desde el suelo y una masa de la carga suspendida; ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión basándose en el al menos un primer término de control anti-balanceo y al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida; y aplicar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión a la pluralidad de polipastos para controlar el movimiento de la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el procedimiento puede comprender además: determinar al menos un segundo término de control anti-balanceo basado en una segunda red neuronal configurada para tomar como entrada la altura de la carga útil desde el suelo, la masa de la carga útil y la velocidad y/o la dirección del viento; ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión basándose además en el al menos un segundo término de control anti-balanceo.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el al menos un primer término de control anti-balanceo puede comprender una matriz de control anti-balanceo, y el ajuste de la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión puede comprender una multiplicación o una suma de la matriz de control anti-balanceo y un vector de velocidad que comprende las al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el al menos un segundo término de control anti-balanceo puede comprender un vector de control anti-balanceo, y el ajuste de la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión puede comprender además la adición del vector de control anti-balanceo a un resultado de la multiplicación o la suma de la matriz de control anti-balanceo y el vector de velocidad.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el procedimiento puede comprender además: ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y/o del al menos un segundo término de control anti-balanceo. La primera red neuronal puede determinar el término de control anti-balanceo para el control del espacio de elevación.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, las al menos dos velocidades pueden comprender velocidades de al menos dos puntos de referencia estacionarios con respecto a la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, las velocidades de los al menos dos puntos de referencia pueden comprender velocidades con respecto a un primer eje y un segundo eje, en el que el primer eje y el segundo eje son perpendiculares entre sí y paralelos al suelo.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, los al menos dos puntos de referencia pueden comprender al menos dos esquinas de un propagador acoplado a la pluralidad de polipastos o al menos dos esquinas de la carga suspendida. El propagador puede estar configurado para estar fijado a la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el procedimiento puede comprender además: ajustar la fuerza o velocidad del espacio cartesiano en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y/o del al menos un segundo término de control anti-balanceo. La primera red neuronal puede determinar el

primer término de control anti-balanceo para el control del espacio cartesiano.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, las al menos dos velocidades pueden comprender una velocidad lineal de la carga suspendida con respecto a un primer eje, una velocidad lineal de la carga suspendida con respecto a un segundo eje y una velocidad angular de la carga suspendida con respecto a un tercer eje. El primer eje y el segundo eje pueden ser perpendiculares entre sí y paralelos al suelo y el tercer eje puede ser perpendicular al primer eje y al segundo eje.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, el procedimiento puede comprender además: determinar, mediante un controlador lineal, la fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida basándose en un conjunto de valores de entrada deseados y datos de retroalimentación indicativos del movimiento de la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, la primera red neuronal puede comprender una red neuronal entrenada con base en aprendizaje de refuerzo con una primera función de recompensa que comprende una velocidad lineal y una velocidad angular de la carga suspendida en un plano definido por el primer eje y el segundo eje o con una segunda función de recompensa que comprende las al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida y una relación entre la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión y un valor máximo de par de torsión anti-balanceo soportado.

De acuerdo con una realización ejemplar del sexto aspecto, la segunda red neuronal puede comprender una red neuronal entrenada con base en un algoritmo de descenso de gradiente con una función de costo que comprende una posición de estado estable y una orientación de estado estable de la carga suspendida.

De acuerdo con una realización ejemplar del quinto aspecto, el procedimiento de acuerdo con cualquier realización ejemplar del procedimiento del quinto aspecto puede comprender cualquier realización ejemplar del procedimiento del sexto aspecto.

De acuerdo con un séptimo aspecto no cubierto por la invención, un programa informático o un producto de programa informático puede comprender instrucciones configuradas para, cuando se ejecutan, hacer que un aparato realice cualquier realización ejemplar del procedimiento del cuarto, quinto y/o sexto aspecto.

De acuerdo con un octavo aspecto no cubierto por la invención, un aparato puede estar configurado para realizar cualquier realización ejemplar del procedimiento del cuarto, quinto y/o sexto aspecto. El aparato puede comprender, por ejemplo, al menos un procesador y al menos una memoria que incluye un código de programa, estando configurado el al menos un procesador y el código de programa para, cuando es ejecutado por el al menos un procesador, hacer que el aparato realice cualquier realización ejemplar del procedimiento del cuarto, quinto y/o sexto aspecto.

De acuerdo con un noveno aspecto no cubierto por la invención, un sistema puede comprender: una pluralidad de polipastos para operar una carga suspendida, en el que la pluralidad de polipastos están acoplados a una base flotante que comprende un sistema de observación exteroceptivo configurado para medir una posición o velocidad de la carga suspendida con respecto a un sistema de coordenadas de referencia que se mueve con la base flotante, y en el que la base flotante además comprende una unidad de medición inercial configurada para medir al menos un estado inercial de la base flotante con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial; medios para realizar una compensación de posición o velocidad para la carga suspendida en base al menos a un estado inercial de la base flotante; medios para determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida; medios para determinar al menos un primer término de control anti-balanceo basado en una primera red neuronal configurada para tomar como entrada una altura de la carga suspendida desde el suelo y una masa de la carga suspendida; medios para ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida; medios para mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana ajustada a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos en función de una función de mapeo multivariable; medios para ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión con al menos un elemento neutro de la función de mapeo multivariable de tal manera que cada una de la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión sea superior o igual a un umbral, en el que el ajuste del al menos un elemento neutro no cambia el mapeo de la fuerza o velocidad espacial cartesiana ajustada a la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión; y medios para aplicar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión a la pluralidad de polipastos para controlar el movimiento de la carga suspendida.

Cualquier realización ejemplar de los aspectos descritos anteriormente puede ser combinada con una o más realizaciones ejemplares adicionales del mismo aspecto o de otros aspectos. Sin embargo, los diferentes aspectos también pueden implementarse por separado. Muchas de las características asociadas se apreciarán más fácilmente a medida que se comprendan mejor mediante referencia a la siguiente descripción detallada

considerada en relación con los dibujos adjuntos.

Descripción de los dibujos

- 5 Los dibujos adjuntos, que se incluyen para proporcionar una mejor comprensión de las realizaciones ejemplares y constituyen una parte de la presente memoria descriptiva, ilustran realizaciones ejemplares y junto con la descripción ayudan a comprender las realizaciones ejemplares. En los dibujos:
- 10 La Figura 1 ilustra un ejemplo de una grúa apiladora automática (ASC), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 2 ilustra un ejemplo de un manipulador telescópico, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 3 ilustra un ejemplo de un aparato configurado para practicar una o más realizaciones ejemplares;
15 La Figura 4 ilustra un ejemplo de un modelo de sistema de muelle de una grúa flexible, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 5 ilustra un ejemplo de un diagrama de bloques para compensación de flexión dinámica, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 6 ilustra un ejemplo de movimiento de carro medido con y sin una retroalimentación de unidad de medición inercial (IMU), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
20 La Figura 7 ilustra un ejemplo de señales de sistema de medición de posicionamiento de carga (LPMS) filtradas y no filtradas, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 8 ilustra otro ejemplo de señales del sistema de medición de posicionamiento de carga (LPMS) filtradas y no filtradas, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
25 La Figura 9 ilustra un ejemplo de una grúa pórtico con neumáticos de caucho (RTG), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 10 ilustra un ejemplo de una arquitectura de control para el control de elevación coordinado, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 11 ilustra un ejemplo de rendimiento de un controlador de elevación coordinado, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
30 La Figura 12 ilustra un ejemplo de una red neuronal para el control de movimiento de una carga suspendida, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 13 ilustra un ejemplo de un modelo de viento para entrenar redes neuronales anti-balanceo, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
35 La Figura 14 ilustra un ejemplo de fuerzas y pares de torsión de viento efectivos simulados con respecto a diferentes ángulos y velocidades del viento aplicados a una carga suspendida, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 15 ilustra un ejemplo de controlador anti-balanceo de espacio cartesiano basado en redes neuronales, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
40 La Figura 16 ilustra un ejemplo de un controlador lineal con un término de corrección de avance basado en redes neuronales, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
La Figura 17 ilustra un ejemplo de rendimiento de amortiguación de oscilaciones para controladores de espacio de elevación y espacio cartesiano basados en redes neuronales, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares;
45 La Figura 18 ilustra un ejemplo de un procedimiento para compensación de flexión dinámica, de acuerdo con una realización ejemplar;
La Figura 19 ilustra un ejemplo de un procedimiento para el control cinemático de una carga suspendida, de acuerdo con una realización ejemplar; y
50 La Figura 20 ilustra un ejemplo de un procedimiento para el control anti-balanceo de una carga suspendida, de acuerdo con una realización ejemplar.

Se utilizan referencias iguales para designar partes similares en los dibujos adjuntos.

Descripción detallada

- 55 A continuación, se hará referencia en detalle a ejemplos de realización, cuyos ejemplos se ilustran en los dibujos adjuntos. La descripción detallada que se proporciona a continuación en relación con los dibujos adjuntos tiene como objetivo describir los presentes ejemplos y no representar las únicas formas en las que se puede construir o utilizar el presente ejemplo. La descripción establece las funciones del ejemplo y la secuencia de etapas para
60 construir y operar el ejemplo. Sin embargo, las mismas funciones y secuencias o funciones equivalentes se pueden lograr con diferentes ejemplos.

- Las realizaciones ejemplares de la presente divulgación se refieren al control de movimiento de un objetivo, como una carga suspendida. Las realizaciones ejemplares permiten mejorar el rendimiento del control en
65 máquinas de manipulación de cargas. Aunque algunas realizaciones ejemplares han sido descritas con

referencia a grúas de patio, como por ejemplo grúas apiladoras automáticas (ASC) o grúas pórtico con neumáticos de caucho I(RTG), se aprecia que las realizaciones ejemplares se pueden aplicar en cualquier tipo de máquinas de manipulación de cargas que tengan estructuras no rígidas, por ejemplo, otro tipo de grúas. Otros ejemplos de dichas máquinas de manipulación de cargas incluyen grúas pórtico montadas sobre rieles (RMG), grúas de barco a tierra (STS) o similares.

La Figura 1 ilustra un ejemplo de una grúa apiladora automática (ASC), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La ASC 100 puede estar configurada para manipular un objetivo (no mostrado), como por ejemplo un contenedor de carga. La ASC 100 puede comprender una o más de las siguientes partes: un carro 101, una cadena portacables 102, una pasarela 103, polipastos 104 (por ejemplo, cuerdas o cables), una primera pata flexible (lado del agua) 105, una segunda pata flexible (lado de la tierra) 106, tirantes 107, una primera viga de umbral (lado flexible) 108, un primer dispositivo de control de flujo de vórtice 109, un propagador 110, un bloque de cabeza 111, escaleras 112, un *bogie* 113, un motor de pórtico 114, una segunda viga de umbral (lado fijo) 115, un segundo dispositivo de control de flujo de vórtice 116, una caseta eléctrica (*E-house*) 117, un carrete de cable 118, una caseta de transformadores 119, una primera pata fija (lado de la tierra) 120, una segunda pata fija (lado del agua) 121, tirantes 122, una primera viga principal (lado de la tierra) 123, o una segunda viga principal (lado del agua) 124. El carro 101 puede ser móvil a lo largo de las vigas principales 123, 124 de la ASC 100. Sin embargo, en disposiciones alternativas, un carro podría ser móvil a lo largo de una sola viga de una grúa. Los polipastos 104 pueden estar unidos al carro 101 y, por lo tanto, mover el carro a lo largo de las vigas principales 123, 124 puede hacer que los polipastos 104 y, por lo tanto, un objetivo sostenido por el propagador, se muevan con respecto al suelo, es decir, con respecto a un eje y de un sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi). El objetivo puede ser, por ejemplo, una carga suspendida, que puede estar configurada para colgar de manera estacionaria o ser manipulada en el aire por las fuerzas de tensión de los polipastos 104.

El carro 101 puede comprender además un sistema de medición de posición de carga (LPMS, no mostrado), por ejemplo, una cámara, un láser u otro(s) sensor(es), configurado(s) para rastrear el movimiento, por ejemplo, la posición y/o la velocidad, del propagador 110, el bloque de cabeza 111 y/o el objetivo. Sin embargo, el LPMS puede funcionar con respecto a un sistema de coordenadas de referencia (xr, yr, zr) que se mueve con el carro 101. El sistema de coordenadas de referencia (xr, yr, zr) puede estar así bloqueado en el carro 101 (base flotante). Se observa que las perturbaciones externas, como la flexión de diferentes estructuras de la ASC 100, pueden provocar perturbaciones externas en el sistema LPMS. Por lo tanto, el LPMS es un ejemplo de un sistema de observación exteroceptivo. Otro ejemplo de un sistema de observación exteroceptivo es un sistema de medición de posición objetivo (TPMS). El TPMS puede estar configurado para medir una posición objetivo, como por ejemplo la posición de un contenedor o un remolque. Una posición objetivo puede comprender una posición desde la que se debe levantar una carga o hacia la que se debe liberar una carga. Por ejemplo, el TPMS puede estar configurado para medir una posición de un contenedor objetivo sobre el que se debe liberar un contenedor que se está operando actualmente. El carro 101 es un ejemplo de una base flotante que es susceptible a perturbaciones externas que causan un movimiento no intencional de la base flotante con respecto al sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi). En el caso de una grúa que no comprende un carro, por ejemplo, los polipastos 104 que se unen directamente a la(s) viga(s) 123, 124, la base flotante puede comprender al menos una viga de la grúa.

Para permitir la compensación de posición y/o velocidad de las señales proporcionadas por el LPMS, el carro 101, o en general la base flotante, puede comprender una unidad de medición inercial (IMU) 125. La IMU 125 puede estar acoplada de manera fija al carro 101 (base flotante). La IMU 125 puede comprender circuitos para medir al menos un estado inercial de la IMU 125. La IMU 125 puede medir un estado inercial del carro 101 con respecto al sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi), por ejemplo, el suelo. La IMU 125 puede comprender, por ejemplo, un acelerómetro lineal unido de forma rígida al carro 101. Un eje sensible del acelerómetro puede ser paralelo al movimiento del carro en la dirección y. El estado inercial puede por lo tanto comprender la aceleración del carro, por ejemplo, con respecto a la dirección y (sustancialmente paralela a la(s) viga(s) 123, 124).

Debido a la flexión de la ASC 100, el LPMS puede indicar que el objetivo se está moviendo incluso si el objetivo estuviera realmente estacionario con respecto al suelo. Se pueden superponer errores similares a la salida del LPMS cuando el objetivo se mueve intencionalmente. Esto degrada el rendimiento del control. La IMU 125 permite compensar las perturbaciones externas superpuestas a las señales del LPMS debido a la flexión de varias estructuras de la ASC 100, como se describirá más adelante.

La Figura 2 ilustra un ejemplo de un manipulador telescópico, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El manipulador telescópico 200 puede comprender un brazo 201 formado por una o más partes. El brazo 201 puede estar configurado para elevar o manipular un objetivo (no mostrado). El brazo 201 puede comprender la IMU 125. Alternativamente, la IMU 125 puede estar ubicada en el cuerpo principal 203 del manipulador telescópico 200. Nuevamente, la IMU 125 puede estar configurada para rastrear el movimiento del brazo 201 con respecto al sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi), por ejemplo, el suelo. El brazo 201 puede ser susceptible a perturbaciones externas tales como flexión causada por el viento o

movimientos rápidos del brazo 201 y, por lo tanto, el brazo 201 se proporciona como otro ejemplo de una base flotante. La información obtenida por la IMU 125 puede utilizarse nuevamente para compensar perturbaciones externas superpuestas a la medición de un sistema de observación exteroceptivo configurado para rastrear el movimiento del propagador 110 y/o un objetivo asociado con el mismo y/o una posición objetivo, como por ejemplo la posición de un contenedor o un remolque. El sistema de observación exteroceptivo puede estar ubicado en cualquier lugar adecuado en el manipulador telescópico 200, por ejemplo, en el brazo 201, el cuerpo principal 203 o el eslabón de cuerpo 202. El sistema de observación exteroceptivo, por ejemplo, LPMS o TPMS, puede comprender, por ejemplo, una cámara o un sensor láser configurado para rastrear el propagador 110, una carga y/o una posición objetivo. Se observa que la ASC 100 y el manipulador telescópico 200 se proporcionan como ejemplos de máquinas de base flotante, en el que se pueden aplicar las realizaciones ejemplares de la presente divulgación. Las realizaciones ejemplares se pueden aplicar, sin embargo, a otros tipos de máquinas, por ejemplo, máquinas que comprenden un sistema de elevación similar al ASC 100. Ejemplos de tales máquinas incluyen la RTG 900 de la Figura 9. Las realizaciones ejemplares también se pueden aplicar a cualquier máquina de manipulación de cargas que comprenda un brazo similar al manipulador telescópico 200 como base flotante, por ejemplo, cualquier otro tipo de grúa.

La Figura 3 ilustra un ejemplo de un aparato configurado para poner en práctica una o más realizaciones ejemplares. El aparato 300, por ejemplo, una máquina de manipulación de cargas o componente(s) de la misma, puede comprender al menos un procesador 302. El al menos un procesador 302 puede comprender, por ejemplo, uno o más de varios dispositivos de procesamiento o circuitos de procesador, como por ejemplo un coprocesador, un microprocesador, un controlador, un controlador lógico programable (PLC), un procesador de señales digitales (DSP), un circuito de procesamiento con o sin un DSP adjunto, o varios otros dispositivos de procesamiento que incluyen circuitos integrados como, por ejemplo, un circuito integrado específico de aplicación (ASIC), una matriz de compuertas programables en campo (FPGA), una unidad de microcontrolador (MCU), un acelerador de hardware (HW), un chip de computadora de propósito especial, o similares.

El aparato 300 puede comprender además al menos una memoria 304. La al menos una memoria 304 puede estar configurada para almacenar, por ejemplo, código de programa informático o similar, por ejemplo, software de sistema operativo y software de aplicación. La al menos una memoria 304 puede comprender uno o más dispositivos de memoria volátil, uno o más dispositivos de memoria no volátil y/o una combinación de los mismos. Por ejemplo, la al menos una memoria 304 puede estar incorporada como dispositivos de almacenamiento magnético (tales como unidades de disco duro, disquetes, cintas magnéticas, etc.), dispositivos de almacenamiento magnético óptico o memorias de semiconductores (tales como ROM de máscara, PROM (ROM programable), EPROM (PROM borrable), ROM flash, RAM (memoria de acceso aleatorio), etc.).

El aparato 300 puede comprender además una interfaz de comunicación 308 configurada para permitir que el aparato 300 transmita y/o reciba información hacia/desde otros dispositivos. En un ejemplo, el aparato 300 puede recibir señales de la IMU 125 y/o del LPMS, que pueden estar integrados dentro del aparato 300 o ser externos al aparato 300. La interfaz de comunicación puede estar configurada para proporcionar al menos una conexión de radio inalámbrica o una conexión por cable. El aparato 300 puede comprender además una interfaz de usuario 310. La interfaz de usuario 310 puede comprender un dispositivo de entrada, por ejemplo, para recibir entradas de usuario indicativas de movimientos deseados del objetivo o los objetivos. La interfaz de usuario 310 también puede comprender un dispositivo de salida, por ejemplo, para proporcionar diversa información de control al usuario. El dispositivo de entrada puede adoptar diversas formas, como una rueda, una palanca de control, un teclado, una pantalla táctil, uno o más botones de control integrados o similares. El dispositivo de salida puede comprender, por ejemplo, una pantalla, un altavoz o similares.

Cuando el aparato 300 está configurado para implementar alguna funcionalidad, algún componente y/o componentes del aparato 300, como por ejemplo el al menos un procesador 302 y/o la al menos una memoria 304, pueden estar configurados para implementar esta funcionalidad. Además, cuando el al menos un procesador 302 está configurado para implementar alguna funcionalidad, esta funcionalidad puede implementarse utilizando el código de programa 306 comprendido, por ejemplo, en la al menos una memoria 304.

La funcionalidad descrita en la presente memoria descriptiva puede ser realizada, al menos en parte, por uno o más componentes de productos de programas informáticos, tales como componentes de software. De acuerdo con una realización, el aparato comprende un procesador o circuitos de procesador, tal como, por ejemplo, un microcontrolador, configurado por el código de programa cuando se ejecuta para ejecutar las realizaciones de las operaciones y la funcionalidad descritas. Alternativa o adicionalmente, la funcionalidad descrita en la presente memoria descriptiva puede ser realizada, al menos en parte, por uno o más componentes lógicos de hardware. Por ejemplo, y sin limitación, los tipos ilustrativos de componentes lógicos de hardware que pueden usarse incluyen matrices de compuertas programables en campo (FPGA), circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), productos estándar de aplicación específica (ASSP), sistemas de sistema en un chip (SOC), dispositivos lógicos programables complejos (CPLD) y unidades de procesamiento de gráficos (GPU).

El aparato 300 comprende medios para llevar a cabo al menos una realización ejemplar descrita en la presente memoria descriptiva. En un ejemplo, los medios comprenden al menos un procesador 302, al menos una memoria 304 que incluye un código de programa 306 configurado para, cuando es ejecutado por el al menos un procesador, hacer que el aparato 300 lleve a cabo la(s) realización(es) ejemplares.

El aparato 300 puede comprender, por ejemplo, una máquina de manipulación de cargas, como por ejemplo una grúa de patio, un ASC, una RTG, un manipulador telescópico, una carretilla pòrtico, una grúa aérea, otro tipo de grúa o similar. El aparato 300 puede comprender, como alternativa, un componente o un subsistema de, o asociado con, cualquier máquina de este tipo. Aunque el aparato 300 se ilustra como un único aparato, se aprecia que, siempre que sea aplicable, las funciones del aparato 300 pueden distribuirse a una pluralidad de aparatos, por ejemplo, para implementar realizaciones ejemplares como un servicio de computación en la nube.

La Figura 4 ilustra un ejemplo de un modelo de sistema de muelle de una grúa flexible, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El sistema de modelo de muelle se describe con referencia al ASC 100. Sin embargo, también se podría proporcionar un modelo de muelle similar para otros tipos de máquinas de manipulación de cargas. La flexión de la ASC 100 se puede modelar, por ejemplo, definiendo flexibilidades entre el suelo y la(s) viga(s) principal(es) (MG) 123, 124, entre la(s) viga(s) principal(es) 123, 124 y el carro (TR) 101, y/o entre el carro 101 y el bloque de cabeza (HB) 111. Entre el carro 101 y el bloque de cabeza 111, las fuerzas de tensión de los polipastos 104 permiten controlar el movimiento del bloque de cabeza 111 y, por lo tanto, también del propagador 110 y el objetivo. Se ha observado que la flexión cíclica del portal de una grúa puede variar, por ejemplo, desde unos pocos centímetros hasta decenas de centímetros. Por lo tanto, la flexión del portal puede ser significativa, por ejemplo, en comparación con un objetivo de posicionamiento de contenedor de ± 5 cm. Además, la flexión puede tener lugar en la banda de control de los cabrestantes configurados para generar las fuerzas de tensión de los polipastos 104. Debido a que la flexión puede tener características espectrales similares a los movimientos del contenedor rastreados por el LPMS, el filtrado de introducción de retardo (por ejemplo, paso bajo/alto/de banda) puede no proporcionar una solución suficiente para todos los casos de uso. Dichos enfoques de filtrado podrían incluso degradar el rendimiento del control en condiciones de funcionamiento dinámicas.

La Figura 5 ilustra un ejemplo de un diagrama de bloques para compensación de flexión dinámica, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El sistema de compensación de flexión dinámica 500 puede recibir una primera señal de entrada, representada en el ejemplo de la Figura 5 por una señal de posición LPMS, indicativa de la posición objetivo. En general, la primera señal puede comprender una señal recibida desde un sistema de observación configurado para medir una posición o velocidad del objetivo con respecto al sistema de coordenadas de referencia (xr, yr, zr) que se mueve con el sistema de observación. El sistema de observación puede estar ubicado en una base flotante. Por lo tanto, el sistema de observación puede ser un sistema de observación exteroceptivo, que puede ser susceptible a fuerzas externas que afecten el movimiento del sistema de observación. El sistema de coordenadas de referencia (xr, yr, zr) puede moverse con la base flotante. El sistema de coordenadas de referencia (xr, yr, zr) puede ser estacionario con respecto a la base flotante y/o al sistema de observación.

Se puede recibir una segunda señal de entrada desde la IMU 125, que puede estar configurada para medir un estado inercial de la base flotante con respecto al sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi). En este ejemplo, la segunda señal de entrada comprende la aceleración del carro (TR) 101. En general, el sistema de compensación de flexión 500 puede realizar una compensación de posición o velocidad para el objetivo basándose en el estado inercial de la base flotante. La compensación de posición o velocidad puede basarse en una inferencia estadística sobre la posición o velocidad medidas del objetivo y el estado inercial de la base flotante. La inferencia estadística puede comprender la fusión de sensores de la posición o velocidad medidas del objetivo y el estado inercial de la base flotante. Sin embargo, el sistema puede ampliarse para proporcionar operaciones similares para una pluralidad de objetivos. Además, la compensación puede basarse en la medición de una pluralidad de estados inerciales de la base flotante, por ejemplo, aceleraciones con respecto a una pluralidad de ejes del sistema de coordenadas de referencia inercial (xi, yi, zi). Por lo tanto, se puede realizar una compensación de posición o velocidad multidimensional.

Cuando se aplica la compensación de flexión dinámica al ASC 100, una RTG u otro tipo de grúa que comprende un carro que se puede mover a lo largo de al menos una viga, el sistema de compensación de flexión 500 puede recibir además una tercera señal de entrada indicativa de la posición del carro 101 con respecto a la viga de la grúa. La tercera señal puede comprender, por ejemplo, una velocidad del carro con respecto a la viga. La posición del carro con respecto a la viga puede determinarse entonces en función de la velocidad del carro 101, por ejemplo, utilizando el integrador de tiempo discreto 501 ($KT_s/(z - 1)$). La compensación de posición o velocidad para el objetivo puede realizarse entonces en función de la posición del carro 101 con respecto a la viga. Tanto la posición del carro 101 como la señal IMU (señal "2") pueden muestrearse a una frecuencia de muestreo suficientemente alta y sincronizada.

La posición y aceleración del carro 101 pueden fusionarse con un filtro de estimación de posición 502, por

ejemplo, un filtro Kalman. La salida del filtro de estimación de posición 502 puede comprender la posición del carro (TR) con aceleraciones perturbadoras, por ejemplo, el desplazamiento causado por los cambios de geometría en la dirección y con respecto a la fuerza de la gravedad. Por lo tanto, la señal de salida del filtro de estimación de posición 502 puede comprender la posición del carro 101 con la flexión del portal superpuesta.

En el caso de un filtro Kalman, la n-ésima muestra de salida $\hat{x}_n$ del filtro de estimación de posicionamiento 502 se puede determinar en función de:

$$\hat{x}_n = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}_{n-1} + \begin{bmatrix} 1 & T/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} kT \Delta x_{n-1} + \begin{bmatrix} T/2 \\ 1 \end{bmatrix} kT \Delta v_{x_{n-1}},$$

en la que $\hat{x}_{n-1}$ es la muestra de salida anterior del filtro de estimación de posicionamiento 502, k es una constante, T es el intervalo de muestreo, Δx_{n-1} es el cambio de la posición del carro 101, y $\Delta v_{x_{n-1}}$ es la salida anterior de la unidad de medición inercial 125, en el ejemplo de la Figura 5 la aceleración del carro 101. Sin embargo, es posible reemplazar el filtro Kalman estacionario descrito anteriormente con una variante de filtro Kalman o un filtro de partículas.

El desplazamiento causado por los movimientos del carro y la flexión del portal (aceleraciones perturbadoras TR) se puede extraer de la salida del filtro de estimación de posición, por ejemplo, restando la posición del carro de la salida del filtro de estimación de posición 502. La resta se puede implementar, por ejemplo, mediante el sumador 503 con una entrada invertida. Esto mejora el control del movimiento, ya que sin ninguna compensación el LPMS puede interpretar erróneamente los movimientos del carro, la flexión de la rueda/portal o similares, para indicar que el objetivo se está balanceando.

La señal obtenida puede proporcionarse como una señal de error a un filtro adaptativo 504, por ejemplo, un filtro de mínimos cuadrados recursivos (RLS). La posición o velocidad medidas del objetivo pueden filtrarse con el filtro adaptativo 504 para realizar la compensación de posición o velocidad. Por lo tanto, los desplazamientos pueden pasar a través del filtro adaptativo 504, que puede ajustar los desplazamientos con un algoritmo de optimización para que coincidan con las características de amplitud y fase de error en las lecturas LPMS, por ejemplo, en la dirección y. De esta manera, cualquier controlador de movimiento (por ejemplo, un controlador anti-balanceo) que se base en las lecturas LPMS recibe una retroalimentación de alto ancho de banda sin modos de error causados por cambios estructurales cíclicos o flexión de la base flotante. Por ejemplo, dado que la IMU 125 en el carro 101 está referenciada a la fuerza de la gravedad (sistema de coordenadas de referencia inercial), la IMU 125 puede detectar tanto las aceleraciones del carro como las causadas por los cambios estructurales cíclicos. Esta información se utiliza entonces de manera ventajosa para rectificar la señal LPMS. El control anti-balanceo también puede denominarse alternativamente amortiguación de oscilación activa.

En caso de RLS, el filtro adaptativo 504 se puede implementar de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Inicialización:

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{P} = \delta^{-1} \mathbf{I},$$

donde el vector $\hat{\mathbf{w}}$ comprende los pesos adaptativos del filtro, δ es una constante positiva e $\mathbf{I}$ es la matriz identidad. El orden del filtro puede ser, por ejemplo, ocho.

Para cada instante de tiempo $n = 1, 2 \dots$, calcular:

$$\boldsymbol{\pi}(n) = \mathbf{P}(n-1) \mathbf{u}(n),$$

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\boldsymbol{\pi}(n)}{\lambda + \mathbf{u}^H(n) \boldsymbol{\pi}(n)},$$

$$\hat{\mathbf{w}}(n) = \hat{\mathbf{w}}(n-1) + \mathbf{k}(n) \xi^*(n)$$

$$\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) - \lambda^{-1} \mathbf{k}(n) \mathbf{u}^H(n) \mathbf{P}(n-1),$$

en la que $u(n)$ es la entrada del filtro adaptativo, en el ejemplo de la Figura 5 un vector de muestras de posición LPMS, $\xi^*(n)$ es un conjugado complejo de la señal de error y λ es una constante, por ejemplo, $\lambda = 0,99$. Sin embargo, se puede utilizar otro filtro adaptativo o una red neuronal en lugar del algoritmo RLS.

- 5 Por lo tanto, la(s) realización(es) ejemplar(es) de la Figura 5 proporciona un enfoque basado en la fusión de sensores de bajo costo para compensar errores en las lecturas de posicionamiento LPMS. Los errores pueden originarse, por ejemplo, a partir de tensiones elásticas o intercambios de fuerza reactiva entre componentes que causan flexión cíclica. Dichos errores pueden variar con el tiempo y depender de las masas de inercia reducidas en los cabrestantes en el carro 101, la(s) viga(s) principal(es) 123, 124, ruedas o similares. La compensación de estos errores permite mejorar el rendimiento de control de las máquinas de manipulación de cargas. Debido a que los errores superpuestos en las lecturas LPMS pueden ocupar la banda de control en el dominio de frecuencia, por ejemplo, se puede aplicar una combinación de filtrado Kalman y filtrado RLS adaptativo para implementar un cancelador de errores de tres entradas.
- 10
- 15 Alternativamente, la posición (o velocidad) y la aceleración del carro 101 pueden fusionarse mediante una red neuronal. La red neuronal puede tomar como entrada la posición (o velocidad) y la aceleración del carro 101, por ejemplo, de manera similar al filtro de estimación de posición 502. La red neuronal puede entrenarse, por ejemplo, proporcionando conjuntos de posiciones (o velocidades) y aceleraciones del carro 101 como datos de entrenamiento y utilizando los resultados de la fusión de un sistema no basado en redes neuronales (por ejemplo, un filtro Kalman) como datos de verdad fundamental. De manera similar, puede utilizarse otra red neuronal para realizar una compensación de posición o velocidad para el objetivo en función de la posición o velocidad medidas del objetivo, la salida del filtro de estimación de posición 502 o una red neuronal que sustituya al filtro de estimación de posición 502.
- 20
- 25 La Figura 6 ilustra un ejemplo de movimiento medido del carro con y sin una retroalimentación de la unidad de medición inercial (IMU), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El desplazamiento en el eje y se proporciona en unidades de distancia normalizadas. La salida del filtro de estimación de posición 502 (filtro Kalman en este ejemplo) que fusiona la posición del carro con las aceleraciones en la dirección y se ilustra mediante la curva 601 como desplazamiento con respecto al eje y. La posición observada por los sensores de posición del carro 101 se ilustra mediante la curva 602. Efectivamente, el filtro de estimación de posición 502 integra dos veces las aceleraciones del carro 101 de una manera libre de deriva y las combina con el estado de movimiento interno del carro. Esta medición ejemplar revela flexibilidades que no son observadas por los sensores de posición del carro 101.
- 30
- 35 La Figura 7 y la Figura 8 ilustran ejemplos de señales de sistema de medición de posicionamiento de carga (LPMS) filtradas y no filtradas, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La Figura 7 ilustra el desplazamiento medido del contenedor (eje y) con respecto al tiempo (s) para el LPMS no filtrado (círculos), el LPMS filtrado (triángulos) y un sensor láser (cuadrados) que actúa como un observador estacionario externo. El desplazamiento en el eje y se proporciona nuevamente en unidades de distancia normalizadas. La figura de la derecha es una versión ampliada de la figura de la izquierda. La Figura 8 ilustra de manera similar la velocidad medida (mm/s) de un contenedor. Al comparar la salida LPMS no filtrada con la salida del sensor láser, se observa que la flexión cíclica da como resultado un componente de señal oscilante superpuesto a la salida LPMS. Cabe destacar que la derivada de la salida LPMS no filtrada cambia de signo cerca de las frecuencias naturales de movimiento de la máquina de manipulación de cargas (RTG) probada. Esto puede provocar que los cabrestantes de la RTG reciban comandos de control erróneos. La retroalimentación puede, por ejemplo, conducir a una situación complicada, en la que el controlador no puede garantizar la pretensión del cable. Por lo tanto, pueden producirse combas en el cable y cambios indeseables en los ángulos entre las cuerdas auxiliares y el bloque de cabeza, que aplica impulsos y excita las oscilaciones del contenedor con el siguiente cambio en la dirección de movimiento (por ejemplo, aflojando las cuerdas auxiliares o incluso produciendo un efecto de latigazo que sacude el portal). Como se puede apreciar en la figura, el procedimiento de compensación de flexión dinámica divulgado que da como resultado las lecturas LPMS filtradas suprime este comportamiento casi por completo sin introducir un retraso. El control de movimiento de una máquina de manipulación de cargas se puede realizar entonces en función de la posición o velocidad del objetivo, según lo proporcionado por las lecturas LPMS filtradas. Por lo tanto, el rendimiento de control del sistema se puede mejorar en gran medida.
- 40
- 45
- 50
- 55 Puede resultar complicado diseñar grúas de patio de alta inercia sin cambios no plásticos durante la operación. Estos fenómenos pueden corromper las lecturas del LPMS, lo que da como resultado un accionamiento aleatorio y no deseado del cabrestante. El procedimiento de compensación de flexión dinámica divulgado fusiona la posición del carro con aceleraciones que se originan a partir de cambios que varían con el tiempo de la geometría de la grúa, que se pueden ajustar como se describió anteriormente. Por lo tanto, se logra una amortiguación de oscilación más rápida, por ejemplo, en caso de balanceo grande (por ejemplo, control anti-balanceo) o para un posicionamiento preciso del objetivo. Para estimar y compensar los errores originados por flexión, se puede hacer referencia a la fuerza de la gravedad utilizando la IMU 125 montada en el carro 101. La IMU 125 puede comprender, por ejemplo, un acelerómetro MEMS (sistema microelectromecánico) económico. El enfoque divulgado puede permitir diseñar grúas con material más liviano y, por lo tanto, proporcionar beneficios
- 60
- 65

de costos. Además, los cálculos a bordo divulgados se pueden implementar sin ningún cambio o cambios significativos en las soluciones de control descentralizadas que se ejecutan en plataformas informáticas modernas. Además, como ha sido indicado anteriormente, el procedimiento de compensación de flexión descrito no se limita a considerar las oscilaciones en la dirección y (dirección del movimiento del carro 101). Como alternativa, o adicionalmente, se puede aplicar un enfoque similar a la dirección x (perpendicular a la dirección y). Por ejemplo, una RTG puede ser móvil en la dirección x. La ampliación de la compensación de flexión para considerar también la aceleración en la dirección x (medida por la IMU 125) permite compensar las perturbaciones en la dirección x, por ejemplo, debidas a cambios elásticos provocados por el frenado de las ruedas. El sistema TPMS también puede beneficiarse de la solución descrita.

La Figura 9 ilustra un ejemplo de una grúa pórtico con neumáticos de caucho (RTG), de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. Aunque la RTG 900 se utiliza como referencia para describir el procedimiento para el control de elevación coordinado, las realizaciones ejemplares descritas anteriormente para realizar la compensación de flexión dinámica también se pueden aplicar a la RTG 900, ya sea por separado o en combinación con el enfoque de control de elevación coordinado descrito en la presente memoria descriptiva. Por lo tanto, la RTG 900 puede comprender la IMU 125, por ejemplo, montada rígidamente en un carro de la RTG. De manera similar al ASC 100, el carro puede moverse a lo largo de una o más vigas de la RTG. La solución de control de elevación coordinada puede utilizar las lecturas LPMS filtradas, para las cuales se realiza una compensación de posición o velocidad en función de las mediciones inerciales obtenidas por la IMU 125. Sin embargo, se observa que la solución de control de elevación coordinada se puede aplicar sin la IMU 125, por ejemplo, utilizando una señal LPMS no filtrada como base para las operaciones de control descritas en la presente memoria descriptiva.

La RTG 900, o en general cualquier tipo adecuado de grúa, puede comprender polipastos 104 para operar una carga suspendida, representada por el contenedor 902. Los polipastos 104 pueden estar acoplados (por ejemplo, de manera fija) al carro 101 en los respectivos puntos de conexión A_i . Los polipastos 104 pueden estar acoplados (por ejemplo, de manera fija) al bloque de cabeza 111 en los respectivos puntos de conexión B_i . El bloque de cabeza 111 puede estar configurado para ser fijado al contenedor 902, por ejemplo, por medio del propagador 110. La RTG 900 puede ser móvil a lo largo de la dirección x (dirección del pórtico). El carro 101 puede ser móvil a lo largo de la viga en la dirección y (dirección del carro).

El procedimiento de control de elevación coordinado descrito en la presente memoria descriptiva proporciona un procedimiento de mapeo de fuerza-par de torsión para los polipastos 104 y una topología de control de movimiento relacionada basada en él. El mapeo se puede utilizar para permitir el control de movimiento en el espacio cartesiano. Por ejemplo, dada una fuerza que afecta al propagador (por ejemplo, debido a la interacción del contenedor con el viento), el mapeo produce una distribución de par de torsión coincidente para los polipastos 104 en función de las ubicaciones de los puntos de conexión B_i en el bloque de cabeza 111 y los puntos de conexión A_i en el carro 101. Debido a que la ubicación física de los puntos de conexión B_i en el bloque de cabeza 111 se puede rastrear utilizando el sistema LPMS, las capacidades máximas de los cabrestantes en el carro 101 quedan disponibles para controlar el propagador 110 en cada punto en el espacio de trabajo. Esto significa que el mapeo es adecuado, por ejemplo, para el desarrollo de control anti-balanceo y de asistencia al usuario. Dado un modelo CAD (diseño asistido por ordenador) del carro 101 y del bloque de cabeza 111 con la disposición de los polipastos 104 que los conectan entre sí, es posible extraer parte de la arquitectura del controlador que está dedicada a los mapeos de fuerza o velocidad.

El controlador (de elevación coordinada) puede ordenar al sistema que se mueva en las direcciones x y/o y, y/o que gire alrededor del eje z (dirección oblicua). Este comando puede entonces traducirse al espacio de coordenadas de elevación (por ejemplo, espacio de unión, espacio de cable, espacio de cuerda) en función del mapeo de fuerza para determinar el papel de cada cable para hacer que se aplique la fuerza deseada al contenedor 902. Por ejemplo, los inversores de elevación pueden usar los comandos mapeados para trabajar junto con los mecanismos de elevación para crear fuerzas de tensión de cable deseadas, que dan como resultado un vector de fuerza que afecta al propagador 110 en las direcciones x, y y/u oblicua. Por lo tanto, un ingeniero de control puede no necesitar realizar ningún ajuste en el sitio de los controladores de elevación auxiliares para implementaciones específicas. Esto proporciona una mejora significativa en los procesos de ingeniería necesarios para la implementación de RTG manuales y automáticos al minimizar los ajustes de control. Además, se puede preservar la compatibilidad con versiones anteriores de los sistemas existentes.

En el ejemplo de la Figura 9, una fuerza de perturbación del viento F_d afecta al contenedor 902 desde la derecha. Se puede aplicar una fuerza de control espacial cartesiana F_c al contenedor 902 a través de los polipastos 104 para provocar el movimiento deseado del contenedor 902 o para mantener el contenedor estacionario independientemente de una fuerza de perturbación del viento F_d (caso anti-balanceo).

El mapeo de fuerza-par de torsión puede ser realizado por una función de mapeo multivariable determinada en función de la geometría del sistema, extraída por ejemplo del modelo CAD. Se puede definir una pluralidad de vectores unitarios cartesianos, $\hat{s}_i$, correspondientes a direcciones de los polipastos 104. Estos vectores unitarios

pueden tener una longitud igual a uno y una dirección que refleje la dirección de un polipasto respectivo, es decir, la dirección entre los respectivos puntos de conexión A_i y B_i . Los vectores unitarios pueden determinarse dinámicamente en función de las ubicaciones de los puntos de conexión (A_i , B_i) en cualquier momento dado. Por ejemplo, la ubicación del carro 101 con respecto a la(s) viga(s) puede determinarse primero y las ubicaciones de los puntos de conexión A_i pueden determinarse luego en función de la ubicación del carro 101 con respecto a la(s) viga(s). De manera similar, primero se puede determinar una ubicación (incluida la orientación) del bloque de cabeza 111 (por ejemplo, basándose en lecturas LPMS filtradas o no filtradas) y luego se pueden determinar las ubicaciones de los puntos de conexión B_i basándose en la ubicación del bloque de cabeza 111. Además, se pueden determinar vectores de brazo de par de torsión cartesiano, $\hat{\mathbf{e}}_i$, desde un centro (C) del bloque de cabeza 111 hasta los puntos de conexión B_i , por ejemplo, basándose en la ubicación actual del bloque de cabeza 111. Las fuerzas de tensión (o pares de torsión) de los polipastos 104 se denotan por τ_i . Un vector de fuerza de tensión se puede definir como $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M]^T$. El espacio definido por las fuerzas de tensión τ_i de los polipastos 104 se puede llamar el espacio (de coordenadas) de elevación.

De acuerdo con una realización ejemplar, la función de mapeo multivariable puede comprender una matriz jacobiana $\mathbf{J}$, cuya transpuesta $\mathbf{J}^T$ puede darse por:

$$\mathbf{J}^T = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{S}}_1 & \dots & \hat{\mathbf{S}}_N \\ \bar{\mathbf{E}}_1 \times \hat{\mathbf{S}}_1 & \dots & \bar{\mathbf{E}}_N \times \hat{\mathbf{S}}_N \end{bmatrix},$$

en la que $\times$ denota un producto vectorial. La matriz $\mathbf{J}^T$ puede ser, por lo tanto, de tamaño $6 \times N$, en la que $N \geq 4$ es el número de polipastos 104. Las fuerzas de tensión (o pares de torsión) pueden satisfacer la ecuación $\mathbf{F}_C = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau}$, en la que $\mathbf{F}_C$ comprende la fuerza cartesiana $\mathbf{F}_C = [f_x, f_y, f_z, f_{rx}, f_{ry}, f_{rz}]^T$, en la que f_x, f_y y f_z son componentes de fuerza lineal de la fuerza espacial cartesiana con respecto a los ejes x, y y z , y en la que f_{rx}, f_{ry} y f_{rz} son los componentes de par de torsión de la fuerza espacial cartesiana con respecto a los ejes x, y y z . El tamaño $6 \times N$ puede corresponder al caso general de movimiento espacial con respecto a cualquier dirección.

La Figura 10 ilustra un ejemplo de una arquitectura de control para el control de elevación coordinado, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares.

El bloque de entrada 1002 del controlador de elevación coordinado 1000 puede obtener los valores de entrada deseados, por ejemplo, $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$, en el que $\dot{x}_d, \ddot{x}_d$ indican la primera y la segunda derivada de la posición o velocidad deseada del bloque de cabeza x_d . Los comandos deseados creados por un operador humano o un sistema de automatización pueden determinar el movimiento deseado del contenedor 902. El movimiento deseado puede ser una entrada cambiante o una solicitud de velocidad cero y aceleración cero.

El controlador de elevación coordinado 1000 puede comprender además o tener acceso a un modelo CAD 1004 de la RTG 900, o en general de la grúa en cuestión. El modelo CAD 1004 puede comprender información sobre la geometría de la grúa, por ejemplo, posiciones efectivas de los puntos de fijación del polipasto en el carro 101 y el bloque de cabeza 111, por ejemplo, con respecto a sus centroides. Esta información puede proporcionarse para varios tipos de grúas y varios diseños de polipastos (auxiliares). La información puede almacenarse localmente en la grúa o puede accederse a ella de manera remota, por ejemplo, descargándose de un servidor a través de una conexión de red, que puede proporcionarse, por ejemplo, mediante la interfaz de comunicación 308.

Un bloque de función de mapeo 1006 puede utilizar la información proporcionada por el modelo CAD 1004 para crear las ecuaciones algebraicas de la función de mapeo multivariable, por ejemplo, la jacobiana. Por ejemplo, el bloque de función de mapeo 1006 puede utilizar los vectores de los puntos de conexión y las direcciones de los cables que se muestran en la Figura 9 y crear una matriz de mapeo multivariable, por ejemplo, la matriz jacobiana $\mathbf{J}$. El espacio cartesiano puede caracterizarse por las seis dimensiones (x, y, z, rx, ry, rz). La geometría del polipasto puede definirse en función de los conjuntos de puntos de conexión. Como ha sido indicado anteriormente, un conjunto de puntos de conexión (A_i) puede ser estacionario con respecto al carro 101. Un conjunto de puntos de conexión (B_i) puede estar unido al bloque de cabeza móvil 111. Por lo tanto, el conjunto de puntos de conexión A_i se puede obtener a partir del modelo CAD 1004. Los valores iniciales de B_i también se pueden obtener a partir del modelo CAD 1004, pero en cada ciclo de control se pueden mover de acuerdo con las coordenadas actuales del bloque de cabeza (generadas por la señal LPMS o valores deseados). Como resultado, se puede mantener una aproximación suficiente de las direcciones de los polipastos actualizando dinámicamente los conjuntos de puntos de conexión. El mapeo multivariado se puede utilizar entonces para el mapeo de velocidades, fuerzas y/o errores entre los espacios cartesianos y de elevación.

El controlador lineal 1008 puede determinar una fuerza espacial cartesiana para controlar el movimiento del contenedor 902. El controlador lineal 1008 puede recibir como entrada el valor o los valores de entrada deseados y datos de retroalimentación indicativos de al menos el movimiento del contenedor 902. Por ejemplo, se puede aplicar un control PD lineal (proporcional-derivativo) con o sin compensación de fuerzas gravitacionales o fuerzas

de elevación existentes. Aunque se describe que el controlador lineal 1008 proporciona una fuerza como su salida, el controlador lineal podría estar configurado alternativamente para proporcionar una velocidad como su salida. También se pueden configurar otras funciones del controlador de elevación coordinado 1000 para actuar sobre velocidades en lugar de fuerzas.

En el bloque 1010, uno o más términos de corrección de espacio cartesiano 1012 pueden aplicarse a la salida del controlador lineal 1008 para obtener la fuerza espacial cartesiana F_c sujeta al mapeo fuerza-par de torsión en el bloque de distribución de fuerza 1014. El o los términos de corrección de espacio cartesiano 1012 pueden aplicarse, por ejemplo, sumándolos a la salida del controlador lineal y/o multiplicando la salida del controlador lineal 1008 por el o los términos de corrección. El o los términos de corrección de espacio cartesiano 1012 podrían generarse, por ejemplo, con una red neuronal, como se describirá más adelante.

El bloque de distribución de fuerza 1014 puede mapear la fuerza espacial cartesiana F_c a fuerzas de tensión o pares de torsión para los polipastos 104 basándose en la función de mapeo multivariable. Sin embargo, las fuerzas de tensión o pares de torsión resultantes pueden ajustarse con al menos un elemento neutro de la función de mapeo multivariable de modo que cada una de las fuerzas de tensión o pares de torsión sea superior o igual a un umbral. Esto permite evitar el pandeo o la holgura del polipasto y, por lo tanto, garantizar que el sistema pueda controlarse basándose en el supuesto de tener polipastos 104 rígidos. Un elemento neutro de la función de mapeo multivariable puede ser un elemento cuyo ajuste no cambia el mapeo de la fuerza espacial cartesiana F_c a las fuerzas de tensión o pares de torsión de los polipastos 104. Por ejemplo, los elementos neutros pueden estar dentro de un espacio nulo de un subconjunto de la matriz jacobiana J , como se describirá más adelante.

Por ejemplo, suponiendo que el número de polipastos 104 es cuatro, el bloque de distribución de fuerza 1014 puede aplicar la última matriz jacobiana 4x6 generada (J_{4x6}). En este caso, el espacio 6D puede incluir direcciones de velocidad lineal (v_x, v_y, v_z) y direcciones de velocidad angular (w_x, w_y, w_z). Sin embargo, si el movimiento deseado del contenedor 902 se limita al movimiento plano y la rotación, solo un subconjunto de componentes del espacio 6D puede ser relevante. Por ejemplo, si el controlador lineal 1008 está configurado para controlar el movimiento plano del contenedor 902 con respecto al suelo (por ejemplo, los ejes x y y del sistema de coordenadas de referencia inercial) y la rotación plana alrededor del eje vertical (z), solo los componentes x (dirección del pórtico), y (dirección del carro) y z (rotación alrededor del eje vertical) pueden ser relevantes para el controlador lineal 1008. Por lo tanto, la matriz J_{4x6} puede reducirse para cubrir solo el movimiento plano, lo que da como resultado una matriz jacobiana 4x3 (J_{4x3}). Esto introduce un grado de redundancia para invertir la jacobiana con una posibilidad de optimización de las fuerzas de tensión (pares de motor) en función del espacio nulo de la matriz J_{4x3} . Por lo tanto, la función de mapeo multivariable puede comprender un subconjunto (por ejemplo, J_{4x3}) de la matriz jacobiana (por ejemplo, J_{4x6}). El o los elementos neutros pueden estar dentro del espacio nulo del subconjunto de la matriz jacobiana. El subconjunto de la matriz jacobiana se puede determinar seleccionando columnas de la matriz jacobiana correspondientes a los componentes de fuerza lineal de la fuerza espacial cartesiana para el eje x y el eje y , y un componente de par de torsión de la fuerza espacial cartesiana para el eje z . Dada una fuerza de tensión mínima τ_0 , se puede utilizar un procedimiento de optimización algebraica para garantizar una tensión mínima mientras se mapea la fuerza espacial cartesiana F_c desde el espacio cartesiano al espacio de elevación. El valor de τ_0 se puede determinar, por ejemplo, en función de limitaciones mecánicas (holgura/pandeo del cable) o en función de los requisitos del mecanismo de elevación. En el caso general de N polipastos, el tamaño del subconjunto de la matriz jacobiana, correspondiente a direcciones seleccionadas, por ejemplo, movimiento plano, puede ser $3 \times IV$. Un ejemplo de reducción de dimensión es seleccionar los elementos planos ($x, y, oblicuo$), reduciendo las dimensiones a $3 \times N$, tal como se describió anteriormente.

El bloque de distribución de fuerza 1014 puede actuar como una línea de frontera entre el espacio cartesiano y el espacio de elevación. Antes del bloque de distribución de fuerza 1014, los términos de control del espacio cartesiano asociados con el contenedor 902, el propagador 110, el bloque de cabeza 111 o el carro 101 pueden aplicarse en el bloque 1010. Después del bloque de distribución de fuerza 1014, uno o más términos de corrección de espacio de elevación 1018 pueden aplicarse en el bloque 1016. El término o los términos de corrección de espacio de elevación 1018 pueden aplicarse, por ejemplo, añadiéndolos a la salida del bloque de distribución de fuerza 1014 (salida de la función de mapeo multivariable) y/o multiplicando la salida del bloque de distribución de fuerza 1014 con el término o los términos de corrección 1018. Esto permite que los términos de control y/o estimación asociados con los polipastos 104, los accionamientos de motor o las poleas se apliquen en el espacio de elevación. Por ejemplo, si el viento sopla en la dirección del carro, el bloque de distribución de fuerza 1014 puede convertir la fuerza del viento en el espacio de elevación para determinar cuánto afecta la fuerza del viento a cada polipasto. Los accionamientos de motor 1020 pueden utilizarse para aplicar las fuerzas de tensión o pares de torsión determinados a los polipastos 104. El uso inverso del bloque de distribución de fuerza 1014 permite identificar el resultado de aplicar fuerzas de tensión de cable particulares. Por ejemplo, es posible determinar cuánto afecta a la dirección de elevación principal el hecho de tirar de cada polipasto mediante una determinada fuerza de tensión en una posición determinada. Otro beneficio del bloque de distribución de fuerza es la posibilidad de utilizarlo para comprobar la viabilidad del diseño de la grúa basándose

en el análisis de los signos de los componentes del espacio nulo.

En general, puede ser deseable aplicar las correcciones tan pronto como el sistema adquiera información sobre la necesidad de dicha compensación. Por lo tanto, los términos de corrección pueden aplicarse en el espacio cartesiano o en el espacio de elevación, o en ambos. Por ejemplo, haciendo referencia a la ley de Newton, $F = ma$, si se desea provocar una aceleración de 2 m/s^2 en la dirección del carro para un contenedor de 40 toneladas, es una suposición segura que es necesaria al menos una fuerza de 800.000 N. Este valor de fuerza puede usarse como término de corrección en el espacio cartesiano. Luego, es posible usar la primera columna de la matriz jacobiana para hacer un equilibrio y resolver cuál sería la proporción de la primera elevación en la fuerza requerida. El valor obtenido puede aplicarse como término de corrección en el espacio de elevación. Por lo tanto, el término o los términos de corrección de avance pueden mejorar el comportamiento al considerar la dinámica conocida. Alternativamente, un algoritmo de inteligencia artificial (IA), como por ejemplo una red neuronal, puede aprender del comportamiento de la grúa para crear dicho término o términos de corrección. Por ejemplo, el control no lineal basado en modelos, la linealización de retroalimentación, la compensación de par de torsión o el control dinámico inverso son enfoques posibles que se pueden implementar en los bloques ilustrados como términos de corrección.

El LPMS 1024 puede rastrear al menos el movimiento del contenedor 902 afectado, por ejemplo, por los accionamientos de motor 1020 (por ejemplo, cabrestantes acoplados a los polipastos 104) o, en general, el movimiento de la mecánica de la grúa 1022. El LPMS 1024 puede proporcionar retroalimentación indicativa de al menos el movimiento del contenedor 902 al controlador lineal 1008.

Opcionalmente, en el bloque de corrección de retroalimentación 1026, se pueden aplicar una o más correcciones a las señales LPMS. En las grúas de patio, puede ser deseable detectar y controlar el movimiento de su carga útil, por ejemplo, el contenedor 902. Se debe permitir que un operador humano o un sistema de automatización proporcionen un control de movimiento preciso en el sistema de coordenadas de referencia inercial y con respecto a un punto de vista de un observador externo. Por lo tanto, puede ser deseable corregir la dinámica interna, la inexactitud del sensor, la respuesta negativa del actuador, la flexibilidad de los neumáticos y sus no linealidades sin afectar significativamente la trayectoria del contenedor 902. Estas no linealidades se pueden corregir dentro del bloque de corrección de retroalimentación 1026, antes de pasar las señales LPMS al controlador lineal 1008. Por ejemplo, el sistema de compensación de flexión dinámica 500 se puede implementar como un algoritmo de corrección de retroalimentación en el bloque de corrección de retroalimentación 1026. De manera similar, los resultados del control de movimiento basado en cámara se pueden utilizar dentro de la arquitectura de control de elevación coordinada como corrección de retroalimentación.

El controlador de elevación coordinado 1000 puede comprender además un bloque de distribución de fuerza inversa 1028. En el bloque de distribución de fuerza 1014, la matriz jacobiana puede aprovecharse para mapear fuerzas a pares de torsión. Sin embargo, existen potenciales considerables en el uso de la matriz jacobiana para mapear velocidades. Por ejemplo, en lugar de la retroalimentación del LPMS 1024, la velocidad del bloque de cabeza puede obtenerse mediante un mapeo basado en la matriz jacobiana inversa de las velocidades del cabrestante. El bloque de distribución de fuerza inversa 1028 puede, por ejemplo, recibir como entrada un vector de velocidad del cabrestante $\dot{L}$ y aplicar un mapeo jacobiano inverso para derivar la velocidad del bloque de cabeza mediante $\dot{x} = J(x)^{-1}\dot{L}$.

En general, el bloque de distribución de fuerza inversa 1028 puede determinar datos de retroalimentación del polipasto basándose en la aplicación de una función inversa de mapeo multivariable del bloque de distribución de fuerza 1014 a los datos de medición del espacio de elevación asociados con los polipastos 104. Los datos de medición del espacio de elevación pueden comprender, por ejemplo, velocidades del cabrestante, posiciones del cabrestante, pares de torsión del cabrestante o errores asociados con los polipastos 104. El controlador lineal 1008 puede controlar el movimiento del contenedor 902 basándose en los datos de retroalimentación del polipasto. También se pueden aplicar correcciones de retroalimentación opcionales a los datos de retroalimentación del polipasto. La distribución de fuerza inversa 1028 se puede utilizar, por ejemplo, para proporcionar una retroalimentación aproximada de la posición o velocidad. El sistema se puede aumentar luego por otros medios, por ejemplo, con un sistema de visión, para proporcionar una resolución más fina. Si la distribución de fuerza inversa se basa en el mapeo jacobiano determinado en función de la estructura de polipasto, incluso una retroalimentación de baja precisión puede no causar ningún problema de estabilidad.

La Figura 11 ilustra un ejemplo de rendimiento de un controlador de elevación coordinado, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La figura de la izquierda ilustra el error angular en unidades angulares normalizadas y la figura de la derecha ilustra el error de posición x (círculos) y el error de posición y (cuadrados) en unidades de distancia normalizadas. El controlador de elevación coordinado 1000 se habilita en $t = 20 \text{ s}$. Se observa que el controlador de elevación coordinado 1000 logra amortiguar las oscilaciones en menos de 20 segundos. El controlador de elevación coordinado 1000 que comprende el mapeo de fuerzas/velocidades del espacio cartesiano a fuerzas de tensión/pares de torsión del espacio de elevación proporciona, por lo tanto, una solución eficiente para el control de movimiento del contenedor 902.

La Figura 12 ilustra un ejemplo de una red neuronal, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La red neuronal 1200 puede configurarse (mediante entrenamiento) para realizar una tarea particular, por ejemplo, para realizar la fusión de sensores como el filtro de posicionamiento 502 como parte del sistema de compensación de flexión dinámica 500 o para generar términos de corrección de espacio cartesiano o de elevación para un controlador lineal, por ejemplo, dentro del controlador de elevación coordinado 1000. La red neuronal 1200 se proporciona como un ejemplo de un algoritmo de IA. Sin embargo, se puede utilizar en su lugar cualquier algoritmo de IA adecuado. La red neuronal 1200 puede comprender una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Los nodos de la capa de entrada, i_1 a i_n , pueden estar conectados a uno o más de los m nodos de la primera capa oculta, n_{11} a n_{1m} . Los nodos de la primera capa oculta pueden estar conectados a uno o más de los k nodos de la segunda capa oculta, n_{21} a n_{2k} . Se aprecia que, aunque la red neuronal de ejemplo de la Figura 12 ilustra dos capas ocultas, una red neuronal puede aplicar cualquier número y cualquier tipo de capas ocultas. La red neuronal 1200 puede comprender además una capa de salida. Los nodos de la última capa oculta pueden estar conectados a uno o más nodos de la capa de salida, o_1 a o_j . Se observa que el número de nodos puede ser diferente para cada capa de la red. Un nodo también puede denominarse neurona, unidad de cómputo o unidad de cómputo elemental. Una o más de las capas pueden ser capas completamente conectadas, por ejemplo, capas en las que cada nodo está conectado a cada nodo de una capa anterior. Cada capa puede tomar la entrada de una o más capas anteriores y proporcionar su salida como entrada para una o más de las capas posteriores. Los nodos de cierta capa pueden tomar la entrada de los nodos de una o más de las capas anteriores y proporcionar la salida a una o más de las capas siguientes. Los nodos también pueden recibir retroalimentación de una o más de las capas posteriores.

Cada nodo 1201 puede configurarse para recibir una o más entradas, a_1 a a_n , de uno o más nodos de una o más capas anteriores y calcular una salida en función de los valores de entrada recibidos. Las entradas pueden asociarse con parámetros para ajustar la influencia de una entrada particular en la salida. Por ejemplo, los pesos w_1 a w_n asociados con las entradas a_1 a a_n pueden usarse para multiplicar los valores de entrada a_1 a a_n . El nodo 1201 puede configurarse además para combinar las entradas en una salida, o una activación. Por ejemplo, el nodo 1201 puede configurarse para sumar los valores de entrada modificados. También puede aplicarse un sesgo o compensación b para agregar una constante a la combinación de entradas modificadas. Los pesos y sesgos pueden ser parámetros entrenables. Por ejemplo, cuando la red neuronal se entrena para una tarea particular, los valores de los pesos y/o sesgos asociados con diferentes entradas y diferentes nodos pueden actualizarse de manera que un error asociado con la realización de la tarea se reduzca a un nivel aceptable. Además, se puede aplicar una función de activación f para controlar cuándo y cómo el nodo 1201 proporciona la salida. A modo de ejemplo, la red neuronal 1200 puede comprender una red neuronal completamente conectada con cuatro capas ocultas, cada capa oculta con 128 nodos. La función de activación de los nodos 1201 puede comprender una función ReLU (unidad lineal rectificadora).

La alimentación de un conjunto de datos de entrada a través de las capas de la red neuronal 1200 para producir una salida puede denominarse propagación hacia adelante. Durante este proceso, los pesos y sesgos de la red neuronal 1200 afectan las activaciones de los nodos individuales y, por lo tanto, la salida proporcionada por la capa de salida. Como se indicó anteriormente, la red neuronal 1200 puede entrenarse para producir una salida deseada para ciertos datos de entrada (invisibles). Durante el entrenamiento, las propiedades (por ejemplo, los pesos) de la red neuronal se pueden modificar de modo que su salida se acerque lo más posible a la salida deseada.

En el aprendizaje supervisado, la salida generada por la red neuronal 1200 puede compararse con una salida deseada, por ejemplo, datos de verdad fundamental proporcionados para fines de entrenamiento, para calcular un valor de error, por ejemplo, mediante una función de pérdida o una función de costo. El entrenamiento puede realizarse minimizando o disminuyendo el error de la salida, que puede evaluarse mediante la función de pérdida o la función de costo. La actualización de la red neuronal puede realizarse luego en función del cálculo de una derivada con respecto a los parámetros entrenables de la red neuronal 1200. Esto puede hacerse, por ejemplo, utilizando un algoritmo de retropropagación que determina gradientes para cada capa comenzando desde la capa final de la red hasta que se hayan determinado los gradientes de los parámetros entrenables de las diferentes capas. Por lo tanto, la red neuronal puede entrenarse utilizando el algoritmo de descenso de gradiente. Los parámetros de cada capa pueden actualizarse en consecuencia de modo que la pérdida se reduzca iterativamente. En el caso del aprendizaje de refuerzo, la red neuronal 1200 puede entrenarse sin datos de verdad fundamental en función de una recompensa acumulativa que se maximizará al realizar cambios en la red neuronal 1200. A continuación, se describen procedimientos para entrenar la red neuronal 1200 para determinar términos de control anti-balanceo para el control de movimiento de una carga suspendida.

La Figura 13 ilustra un ejemplo de un modelo de viento para entrenar redes neuronales anti-balanceo, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La necesidad de control anti-balanceo puede surgir, por ejemplo, de las condiciones de viento que prevalecen en áreas portuarias. El viento puede introducir fuerzas y pares de torsión que conducen a la oscilación del contenedor 902, lo que puede ser generalmente indeseable en operaciones de recogida y colocación de contenedores. En las soluciones de control de movimiento descritas, la fuerza/par de torsión aplicado al centro del contenedor 902 puede usarse para modelar la perturbación del

estado causada por el viento. Las condiciones del viento pueden representarse por la velocidad y la dirección del viento. Se puede determinar un mapeo entre la condición del viento y las fuerzas/par de torsión mediante un modelo de simulación del viento, un ejemplo del cual se proporciona en la Figura 13. Los cambios de presión causados por el viento pueden crear distribuciones de fuerza (flechas negras) alrededor del contenedor 902. Las fuerzas resultantes se consideran como los valores efectivos de fuerza/par de torsión y pueden ser variables dependiendo del ángulo de carga, así como del ángulo y la velocidad del viento.

La Figura 14 ilustra un ejemplo de fuerzas y pares de torsión de viento efectivos simulados con respecto a diferentes ángulos y velocidades del viento aplicados a una carga suspendida, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. Las curvas 1401 y 1402 ilustran fuerzas con respecto al eje x (F_x) y al eje y (F_y) para velocidades del viento de 5 m/s y 20 m/s, respectivamente, para diferentes ángulos del viento. Las líneas cruzadas representan resultados de simulación obtenidos por otro modelo de simulación. El modelo de viento dinámico permite asegurar la capacidad de los procedimientos anti-balanceo basados en redes neuronales para amortiguar los efectos del viento en condiciones de viento variables.

La Figura 15 ilustra un ejemplo de un controlador anti-balanceo de espacio cartesiano basado en una red neuronal, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El controlador espacial cartesiano 1502 puede ir seguido del bloque de distribución de fuerza 1014 que comprende la función de mapeo de fuerza/par de torsión multivariable (por ejemplo, mapeo jacobiano con optimización de espacio nulo), que incorpora la disposición de elevación física en una forma analítica. Por lo tanto, los roles de cada polipasto pueden determinarse analíticamente para producir una fuerza que actúe sobre el contenedor 902 en el sistema de coordenadas de referencia inercial, por ejemplo, para que coincida con la fuerza producida por el viento. En la fase de entrenamiento de la(s) red(es) neuronal(es), el bloque de dinámica de sistema 1504 puede incluir un simulador de dinámica del sistema. Durante la operación (fase de inferencia de la(s) red(es) neuronal(es)) el bloque 1504 puede comprender el sistema de grúa real. Sin embargo, se observa que el entrenamiento también podría ocurrir con el sistema de grúa real. El bloque de dinámica de sistema 1504 puede proporcionar velocidades asociadas con el contenedor 902, por ejemplo, un vector de velocidad $\mathbf{v}$ que comprende velocidades de al menos dos puntos de referencia estacionarios con respecto al contenedor 902 (por ejemplo, las esquinas superiores del contenedor 902), como entrada al controlador espacial cartesiano 1502. El controlador espacial cartesiano 1502 también puede recibir del bloque de dinámica de sistema 1504 la altura actual (h) del contenedor 902 desde el suelo y/o la masa (m) del contenedor 902. El controlador espacial cartesiano 1502 puede determinar una fuerza espacial cartesiana para el sistema anti-balanceo a partir del estado dado del sistema. El controlador espacial cartesiano 1502 puede tener, por ejemplo, la forma:

$$\mathbf{f} = M(h, m)\mathbf{v} + \mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$$

en la que $M(h, m)$ y $\mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$ son los términos de control anti-balanceo primero y segundo (espacio cartesiano), respectivamente. Sin embargo, se observa que el uso del segundo término anti-balanceo puede ser opcional y, por lo tanto, también el bloque de medición/estimación de viento ($\mathbf{w}$) 1506 puede no estar presente en algunas realizaciones ejemplares. El vector $\mathbf{v} \in R^3$ puede incluir velocidades lineales del contenedor 902 (o del propagador/bloque de cabeza) con respecto al eje x y al eje y, y velocidad angular en oblicuidad. La velocidad del viento $\mathbf{w} \in R^2$ puede indicar la dirección y la velocidad del viento. Los términos de control anti-balanceo pueden generarse mediante redes neuronales primera y segunda, respectivamente. El primer término de control anti-balanceo puede ser una matriz, p. ej., $\mathbf{M} \in R^{3 \times 3}$. El segundo control anti-balanceo puede ser un vector, p. ej., $\mathbf{b} \in R^3$. La fuerza $\mathbf{f}$ determinada por el controlador espacial cartesiano puede entonces distribuirse en fuerzas de tensión deseadas o pares de torsión del cabrestante para amortiguar las oscilaciones. Sin embargo, se observa que el control anti-balanceo puede aplicarse sobre una fuerza espacial cartesiana determinada para provocar un movimiento deseado del contenedor 902. También se aprecia que el controlador espacial cartesiano podría configurarse alternativamente para actuar sobre la velocidad del contenedor 902, por ejemplo, para generar una velocidad en lugar de la fuerza espacial cartesiana $\mathbf{f}$.

El aprendizaje de refuerzo (RL) se puede aplicar para entrenar una primera red neuronal para determinar el primer término de control anti-balanceo $M(h, m)$. De manera similar, se puede entrenar una red neuronal para determinar el segundo término de control anti-balanceo $\mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$. La primera red neuronal se puede entrenar utilizando aprendizaje de refuerzo con una función de recompensa que comprende una velocidad lineal y una velocidad angular del contenedor 902 en el plano xy. De acuerdo con una realización ejemplar, la función de recompensa puede comprender:

$$r = 0,5 \exp(10^3 \|\mathbf{v}_{lin}\|^2) + 0,5 \exp(10^5 \|\mathbf{v}_{ang}\|^2)$$

en la que $\mathbf{v}_{lin}$ comprende las velocidades lineales con respecto al eje x y al eje y, y $\mathbf{v}_{ang}$ comprende la velocidad angular alrededor del eje z. Cuando la primera red neuronal se entrena con dicha función de recompensa sobre diferentes alturas y masas del contenedor 902, la primera red neuronal aprende a generar un primer término de

control anti-balanceo adecuado $M(h, m)$. Este término de control se puede aplicar para determinar la fuerza espacial cartesiana apropiada por el controlador espacial cartesiano 1502 con el fin de amortiguar las oscilaciones del contenedor 902. Esto permite mitigar el balanceo no deseado de los contenedores que tienen diferentes masas, teniendo también en cuenta la altura actual del contenedor.

El entrenamiento de la segunda red neuronal (segundo término de control anti-balanceo) se puede realizar, por ejemplo, basándose en el algoritmo de descenso de gradiente con una función de costo que comprende la posición de estado estable y la orientación de estado estable del contenedor 902. El primer término de corrección anti-balanceo se puede mantener fijo durante el entrenamiento de la segunda red neuronal. Por ejemplo, la función de costo puede comprender:

$$c = 10^2 \|x\|^2 + 10^2 \|y\|^2,$$

en la que x es la posición del contenedor en estado estable y y es la orientación del contenedor en estado estable. La posición y la orientación en estado estable se pueden determinar en función de la amortiguación del balanceo del contenedor utilizando el segundo término de control anti-balanceo en cada etapa de la optimización. Cuando la segunda red neuronal se entrena con dicha función de costo sobre diferentes alturas y masas del contenedor 902 y velocidades del viento, la segunda red neuronal aprende a generar un segundo término de control anti-balanceo adecuado $b(h, m, \mathbf{w})$ que se puede aplicar para ajustar la fuerza espacial cartesiana en función de la velocidad del viento actual.

De manera similar, es posible diseñar un controlador anti-balanceo del espacio de elevación basado en una red neuronal, que determina las fuerzas de tensión de los pares de torsión para las grúas directamente a partir de un estado dado del sistema. El controlador de espacio de elevación para controlar las fuerzas de tensión de los pares de torsión de los cabrestantes de elevación puede tener, por ejemplo, la forma:

$$\boldsymbol{\tau} = \sigma(V(h, m))\mathbf{v} + \mathbf{b}(h, m, \mathbf{w}),$$

en la que $V(h, m)$ y $\mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$ son el primer y segundo término de control anti-balanceo (espacio de elevación), respectivamente. El símbolo $\sigma(\cdot)$ representa una función de fijación, que puede utilizarse para garantizar que la salida del controlador obedezca los límites del sistema dados. También se podría aplicar una función de fijación similar al controlador espacial cartesiano 1502. Nuevamente, el uso del segundo término de control anti-balanceo puede ser opcional.

El aprendizaje de refuerzo se puede aplicar para entrenar la primera red neuronal para determinar el primer término de control anti-balanceo (espacio de elevación) $V(h, m)$. La segunda red neuronal se puede entrenar para determinar el segundo término de control anti-balanceo (espacio de elevación) $\mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$. La primera red neuronal se puede entrenar nuevamente utilizando aprendizaje de refuerzo con una función de recompensa que comprende velocidades asociadas con el contenedor 902 y una relación entre las fuerzas de tensión o pares de torsión y un valor máximo de par de torsión anti-balanceo soportado. De acuerdo con una realización ejemplar, la función de recompensa puede comprender:

$$r = 0,95 \exp(10^2 \|\mathbf{v}\|^2) + 0,05 \exp(\|\boldsymbol{\tau}/\tau_{max} - 0,5\|^2),$$

en la que $\mathbf{v} \in R^4$ comprende velocidades de, por ejemplo, dos esquinas superiores del contenedor 902 con respecto al eje x y al eje y , $\boldsymbol{\tau} \in R^4$ representa las fuerzas de tensión o pares de torsión aplicados a los polipastos, y τ_{max} es la fuerza de tensión máxima del valor de par de torsión soportado por el sistema. El primer término en la función de recompensa representa la amortiguación del sistema y el segundo término actúa como una regularización que estabiliza el proceso de aprendizaje. La optimización se puede realizar sobre una altura de propagador variable y un peso de contenedor mediante el uso de aleatorización de dominio en la que el estado se muestrea aleatoriamente al comienzo de cada episodio. Como resultado, la primera red neuronal aprende a generar un primer término de control anti-balanceo adecuado $V(h, m)$ que da como resultado una fuerza de tensión o pares de torsión del espacio de elevación adecuados que se generarán por el controlador de espacio de elevación, con el fin de amortiguar las oscilaciones del contenedor 902. Por lo tanto, la primera red neuronal entrenada por RL se entrena para producir coeficientes para la matriz $V(\cdot)$ como función de la masa y la altura del contenedor. En efecto, esto se sigue de la multiplicación por la velocidad del contenedor, lo que reduce la estructura de control a una estructura lineal y, por lo tanto, aumenta la robustez. De manera similar al controlador cartesiano 1502, se puede entrenar una segunda red neuronal para que genere un segundo término de corrección anti-balanceo $\mathbf{b}(h, m, \mathbf{w})$ adecuado (espacio de elevación) considerando también la velocidad del viento $\mathbf{w}$.

La Figura 16 ilustra un ejemplo de un controlador lineal con un término de corrección de avance basado en redes neuronales, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. El controlador lineal 1602 puede ser similar al

controlador lineal 1008. Por ejemplo, el controlador lineal 1602 puede comprender un controlador P y estar configurado para controlar el movimiento del contenedor 902 en función de las señales recibidas desde el LPMS 1024. El controlador lineal 1602 puede determinar una fuerza espacial cartesiana en función de la retroalimentación del LPMS y/o el movimiento deseado del contenedor 902 (por ejemplo, un comando para mantener el contenedor 902 estacionario).

En el bloque 1604, se puede determinar un término de avance del espacio cartesiano. El término de corrección de avance de espacio cartesiano se puede determinar en función del primer término de corrección anti-balanceo (espacio cartesiano) $M(h, m)$ generado por la primera red neuronal, cuando se la entrena para el control del espacio cartesiano. La primera red neuronal puede tomar como entrada la masa (m) y la altura actual (h) del contenedor 902 desde el suelo. El primer término de corrección anti-balanceo $M(h, m)$ se puede multiplicar por la velocidad actual v del contenedor 902 para obtener el término de corrección de avance de espacio cartesiano. Alternativamente, el primer término de corrección anti-balanceo $M(h, m)$ se puede añadir a la velocidad actual v del contenedor 902 para obtener el término de corrección de avance de espacio cartesiano. Por lo tanto, el término de retroalimentación basado en la red neuronal se puede determinar en función del LPMS 1024 que puede proporcionar una estimación de la velocidad actual del contenedor 902. Opcionalmente, el segundo término de corrección anti-balanceo $b(h, m, w)$ se puede agregar al primer término de corrección anti-balanceo antes de aplicar la corrección a la salida de fuerza espacial cartesiana por el controlador lineal 1602. Como se describió anteriormente, el segundo término de corrección anti-balanceo se puede generar mediante una segunda red neuronal configurada para tomar como entrada la velocidad del viento w (velocidad del viento y/o dirección del viento) además de la masa y la altura actual del contenedor 902. La velocidad actual v puede comprender velocidades lineales del contenedor 902 (o del propagador 110) con respecto al eje x y al eje y y una velocidad angular del contenedor 902 con respecto al eje z , es decir, velocidades lineales con respecto a dos ejes perpendiculares entre sí y paralelos al suelo y velocidad angular con respecto a un eje perpendicular al suelo.

En el bloque 1606, la fuerza espacial cartesiana determinada por el controlador lineal 1602 puede ajustarse mediante el término de corrección de avance espacial cartesiano. El término de corrección de avance espacial cartesiano puede, por ejemplo, sumarse a la fuerza espacial cartesiana determinada por el controlador lineal 1602 o multiplicarse por ella.

En el bloque 1608, la fuerza espacial cartesiana resultante se puede asignar a las fuerzas de tensión o pares de torsión de los polipastos, por ejemplo, como se describe con referencia al bloque de distribución de fuerza 1014.

En el bloque 1610, las fuerzas de tensión o pares de torsión se pueden aplicar a los polipastos 104, por ejemplo, mediante cabrestantes auxiliares de la grúa, para controlar el movimiento del contenedor 902.

El LPMS 1024 puede monitorizar la grúa y/o el contenedor 902 y proporcionar retroalimentación indicativa del movimiento de la grúa o el contenedor 902 al controlador lineal 1602.

Aunque se describe que el controlador lineal 1602 genera una fuerza espacial cartesiana, podría configurarse alternativamente para actuar sobre velocidades. En ese caso, el término de avance espacial cartesiano basado en redes neuronales podría aplicarse a la velocidad determinada por el controlador lineal 1602.

Como alternativa al término de corrección de avance de espacio cartesiano 1604, el sistema de control de la Figura 16 puede configurarse alternativamente para controlar el movimiento del contenedor 902 en el espacio de elevación. Por lo tanto, se puede aplicar un término de corrección de espacio de elevación después de mapear (1608) la fuerza espacial cartesiana a las fuerzas de tensión o pares de torsión del espacio de elevación.

El término de corrección de espacio de elevación puede determinarse en función del primer término de corrección anti-balanceo (espacio de elevación) $V(h, m)$ generado por la primera red neuronal, cuando se la entrena para el control del espacio de elevación. La primera red neuronal puede tomar como entrada la masa (m) y la altura actual (h) del contenedor 902 desde el suelo. El primer término de corrección anti-balanceo $V(h, m)$ puede multiplicarse por la velocidad actual v del contenedor 902 para obtener el término de corrección de espacio de elevación. Por lo tanto, el término de avance del espacio de elevación basado en la red neuronal puede determinarse en función del LPMS 1024 que puede proporcionar una estimación de la velocidad actual del contenedor 902. En general, la velocidad del contenedor 902 puede comprender velocidades de al menos dos puntos de referencia que son estacionarios con respecto al contenedor 902, cuando el contenedor se está elevando o manipulando con la grúa. Los puntos de referencia pueden comprender, por ejemplo, esquinas del contenedor 902 o esquinas del propagador 110. Las velocidades de los puntos de referencia pueden comprender, por ejemplo, velocidades con respecto al eje x y al eje y , es decir, dos ejes perpendiculares entre sí y paralelos al suelo. Opcionalmente, el segundo término de corrección anti-balanceo $b(h, m, w)$ puede añadirse al primer término de corrección anti-balanceo $V(h, m)$ antes de aplicar la corrección a las fuerzas de tensión o pares de torsión del espacio de elevación después del bloque de mapeo de fuerza 1608. El segundo término de corrección anti-balanceo puede generarse nuevamente por la segunda red neuronal configurada para tomar

como entrada la velocidad del viento w además de la masa y la altura actual del contenedor 902.

La Figura 17 ilustra un ejemplo de rendimiento de amortiguación de oscilaciones para controladores de espacio de elevación basados en redes neuronales y de espacio cartesiano, de acuerdo con una o más realizaciones ejemplares. La posición x , la posición y y la orientación del contenedor 902 se ilustran tanto para el controlador de espacio de elevación (" x ") como para el controlador espacial cartesiano (" o "). Las posiciones x y y se proporcionan en unidades de distancia normalizadas y la orientación se proporciona en unidades angulares normalizadas. Se observa que ambos controladores pueden amortiguar el balanceo aproximadamente al mismo tiempo y, por lo tanto, su rendimiento es comparable. Sin embargo, el controlador de espacio de elevación se puede implementar sin ningún conocimiento previo externo sobre la cinemática de la grúa o la disposición de elevación. Además, el controlador de espacio de elevación no requiere resolver el problema de optimización dentro de la arquitectura de control, es decir, el controlador se puede implementar en función de un mapeo puro de las observaciones de LPMS a las fuerzas de tensión o pares de torsión de los cabrestantes de elevación auxiliares. Sin embargo, el controlador espacial cartesiano proporciona una optimización menos compleja desde el punto de vista del aprendizaje de refuerzo, un número menor de parámetros del controlador y, por lo tanto, puede permitir la implementación sin el sistema LPMS para lograr ahorros de costos sin sacrificar el rendimiento anti-balanceo. El controlador espacial cartesiano también puede transferirse a otras estructuras de grúa cinemáticas modificando el conocimiento previo sobre la geometría/cinemática de elevación. Por lo tanto, el controlador espacial cartesiano se puede aplicar a diferentes geometrías de elevación sin un ajuste extenso de parámetros. El controlador espacial cartesiano permite además resolver la optimización del espacio nulo durante la inferencia, lo que puede ser compatible con las prácticas y tendencias en el dominio de la robótica desde la perspectiva del modelado de cinemática directa y, por lo tanto, se puede admitir una amplia gama de aplicaciones de control.

Como se ha descrito anteriormente, el enfoque de compensación de flexión dinámica se puede utilizar en combinación con el enfoque de control de elevación coordinado. Además, el enfoque de control de elevación coordinado se puede mejorar con términos de corrección basados en redes neuronales en el espacio cartesiano o en el espacio de elevación. Uno o más de estos enfoques se pueden combinar dentro de un sistema o un aparato. Por ejemplo, dicho sistema se puede incorporar en la ASC 100 o en la RTG 900. Por lo tanto, se pueden incorporar diferentes aspectos de la presente divulgación de forma individual o en combinación para proporcionar un sistema de control de movimiento global.

La Figura 18 ilustra un ejemplo de un procedimiento para compensación de flexión dinámica, de acuerdo con una realización ejemplar.

En 1801, el procedimiento puede comprender medir, mediante un sistema de observación exteroceptivo acoplado a una base flotante, una posición o velocidad de al menos un objetivo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia que se mueve con la base flotante.

En 1802, el procedimiento puede comprender medir, mediante una unidad de medición inercial, al menos un estado inercial de la base flotante con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial.

En 1803, el procedimiento puede comprender realizar una compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo en función del al menos un estado inercial de la base flotante.

La Figura 19 ilustra un ejemplo de un procedimiento para el control cinemático de una carga suspendida, de acuerdo con una realización ejemplar.

En 1901, el procedimiento puede comprender determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de la carga suspendida, en el que la carga suspendida es operable con una pluralidad de polipastos.

En 1902, el procedimiento puede comprender mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos con base en una función de mapeo multivariable.

En 1903, el procedimiento puede comprender ajustar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión con al menos un elemento neutro de la función de mapeo multivariable de tal manera que cada una de la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión sea superior o igual a un umbral, en el que el ajuste del al menos un elemento neutro no cambia el mapeo de la fuerza o velocidad espacial cartesiana a la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión.

La Figura 20 ilustra un ejemplo de un procedimiento para el control anti-balanceo de una carga suspendida, de acuerdo con una realización ejemplar.

En 2001, el procedimiento puede comprender determinar una fuerza o velocidad espacial cartesiana para controlar el movimiento de una carga suspendida, en el que la carga suspendida es operable con una pluralidad de polipastos.

- 5 En 2002, el procedimiento puede comprender mapear la fuerza o velocidad espacial cartesiana a una pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión para la pluralidad de polipastos.

- 10 En 2003, el procedimiento puede comprender determinar al menos un primer término de control anti-balanceo basado en una primera red neuronal configurada para tomar como entrada una altura de la carga suspendida desde el suelo y una masa de la carga suspendida.

- 15 En 2004, el procedimiento puede comprender ajustar la fuerza o velocidad espacial cartesiana o la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión en función del al menos un primer término de control anti-balanceo y al menos dos velocidades asociadas con la carga suspendida.

- En 2005, el procedimiento puede comprender aplicar la pluralidad de fuerzas de tensión o pares de torsión a la pluralidad de polipastos para controlar el movimiento de la carga suspendida.

- 20 Otras características de los procedimientos resultan directamente de las funcionalidades y parámetros de los aparatos y sistemas descritos en la presente memoria descriptiva, como se describe en las reivindicaciones adjuntas, a lo largo de la memoria descriptiva y en los dibujos y, por lo tanto, no se repiten aquí. También se pueden aplicar diferentes variaciones de los procedimientos, como se describe en relación con las diversas realizaciones ejemplares.

- 25 Un aparato puede estar configurado para realizar o provocar la realización de cualquier aspecto de los procedimientos descritos en la presente memoria descriptiva. Además, un programa informático puede comprender instrucciones configuradas para, cuando se ejecutan, provocar que un aparato realice cualquier aspecto de los procedimientos descritos en la presente memoria descriptiva. Además, un aparato puede comprender medios para realizar cualquier aspecto de los procedimientos descritos en la presente memoria descriptiva. De acuerdo con una realización ejemplar, los medios comprenden al menos un procesador y al menos una memoria que incluye un código de programa, el al menos un procesador y un código de programa configurado para, cuando se ejecuta por el al menos un procesador, provocar la realización de cualquier aspecto de los procedimientos.

- 35 Cualquier intervalo o valor de dispositivo que se proporciona en la presente memoria descriptiva puede ampliarse o modificarse sin perder el efecto buscado. Asimismo, cualquier realización puede combinarse con otra realización a menos que se prohíba explícitamente.

- 40 Aunque la materia objeto ha sido descrita en un lenguaje específico para las características y/o actos estructurales, se debe entender que la materia objeto definida en las reivindicaciones adjuntas no se limita necesariamente a las características o actos específicos descritos anteriormente. Más bien, las características y actos específicos descritos anteriormente se divulgan como ejemplos de implementación de las reivindicaciones y se pretende que otras características y actos equivalentes estén dentro del alcance de las reivindicaciones.

- 45 Se entenderá que los beneficios y ventajas descritos anteriormente pueden estar relacionados con una realización o pueden estar relacionados con varias realizaciones. Las realizaciones no se limitan a aquellas que resuelven alguno o todos los problemas indicados o aquellas que tienen alguno o todos los beneficios y ventajas indicados. Se entenderá además que la referencia a "un" elemento puede referirse a uno o más de esos elementos.

- 50 Las etapas u operaciones de los procedimientos descritos en la presente memoria descriptiva pueden llevarse a cabo en cualquier orden adecuado o de manera simultánea cuando sea apropiado. Además, se pueden eliminar bloques individuales de cualquiera de los procedimientos sin alejarse del alcance de la materia objeto descrita en la presente memoria descriptiva. Los aspectos de cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente se pueden combinar con aspectos de cualquiera de las otras realizaciones descritas para formar otras realizaciones sin perder el efecto buscado.

- 60 En la presente memoria descriptiva, el término "que comprende" es utilizado para significar que incluye el procedimiento, los bloques o los elementos identificados, pero dichos bloques o elementos no comprenden una lista exclusiva y un procedimiento o aparato puede contener bloques o elementos adicionales.

65

REIVINDICACIONES

1. Un aparato, que comprende: una base flotante (101) que comprende un sistema de observación exteroceptivo (LPMS, TPMS) configurado para medir una posición o velocidad de al menos un objetivo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia (x_r , y_r , z_r) que se mueve con la base flotante (101), en el que la base flotante (101) además comprende una unidad de medición inercial (IMU) configurada para medir al menos un estado inercial de la base flotante (101) con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial (x_i , y_i , z_i); y medios para realizar una compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo, **caracterizado porque** dicha compensación de posición o velocidad está basada en una inferencia estadística sobre la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y el al menos un estado inercial de la base flotante (101).
2. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la base flotante (101) comprende un brazo (201) configurado para elevar o manipular el al menos un objetivo, o en el que la base flotante (101) comprende una viga (123, 124) de una grúa.
3. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la base flotante (101) comprende un carro (101) que se puede mover a lo largo de una viga (123, 124) de una grúa, en el que el al menos un estado inercial de la base flotante (101) comprende la aceleración del carro (101), y en el que el aparato además comprende: medios para determinar una posición del carro (101) con respecto a la viga (123, 124); y medios para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo basándose además en la posición del carro (101) con respecto a la viga (123, 124).
4. El aparato de acuerdo con la reivindicación 3, que además comprende: medios para fusionar la posición del carro (101) y la aceleración del carro (101) con un filtro Kalman; medios para determinar una señal de error para un filtro adaptativo (504) basándose en una resta de la posición del carro (101) y una salida del filtro Kalman; y medios para filtrar la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo con el filtro adaptativo (504) para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo.
5. El aparato de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el filtro adaptativo (504) comprende un filtro de mínimos cuadrados recursivo.
6. El aparato de acuerdo con la reivindicación 3, que además comprende:
medios para fusionar la posición del carro (101) y la aceleración del carro (101) con una primera red neuronal; y
medios para realizar la compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo mediante una segunda red neuronal en función de la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y una salida de la primera red neuronal.
7. El aparato de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en el que la posición o velocidad del objetivo es indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo de un primer eje del sistema de coordenadas de referencia inercial (x_i , y_i , z_i) sustancialmente paralelo a la viga (123, 124), y en el que la aceleración del carro (101) es indicativa de la aceleración del carro (101) a lo largo del primer eje.
8. El aparato de acuerdo con la reivindicación 7, en el que la grúa se puede mover a lo largo de un segundo eje del sistema de coordenadas de referencia inercial (x_i , y_i , z_i) sustancialmente perpendicular a la viga (123, 124), en el que la posición o velocidad del al menos un objetivo es además indicativa de la posición o velocidad del al menos un objetivo a lo largo del segundo eje, y en el que la aceleración del carro (101) es además indicativa de la aceleración del carro (101) a lo largo del segundo eje.
9. El aparato de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que además comprende:
medios para realizar un control de movimiento del al menos un objetivo en función de la posición o velocidad del al menos un objetivo.
10. El aparato de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, en el que el al menos un objetivo comprende una carga suspendida.
11. El aparato de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el sistema de coordenadas de referencia (x_r , y_r , z_r) es estacionario con respecto a la base flotante (101).
12. Un procedimiento que comprende: medir, mediante un sistema de observación exteroceptivo (LPMS, TPMS) acoplado a una base flotante (101), una posición o velocidad de al menos un objetivo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia (x_r , y_r , z_r) que se mueve con la base flotante (101); medir,

mediante una unidad de medición inercial (IMU), al menos un estado inercial de la base flotante (101) con respecto a un sistema de coordenadas de referencia inercial (x_i , y_i , z_i); y realizar una compensación de posición o velocidad para el al menos un objetivo, **caracterizado porque** dicha compensación de posición o velocidad está basada en una inferencia estadística sobre la posición o velocidad medidas del al menos un objetivo y el al menos un estado inercial de la base flotante (101).

5

10

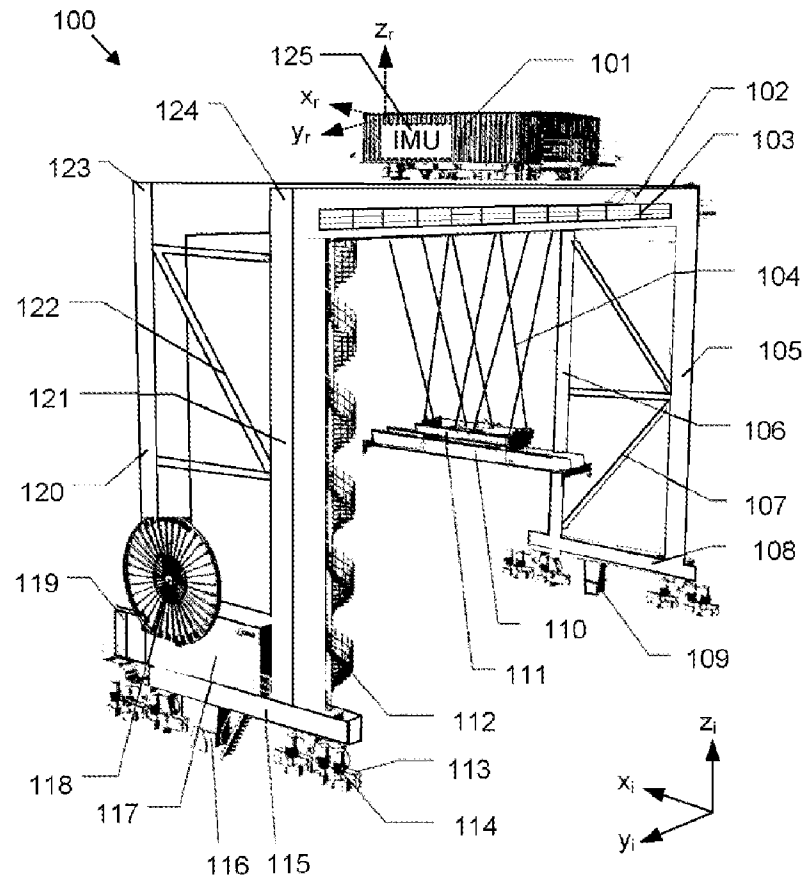


FIG. 1

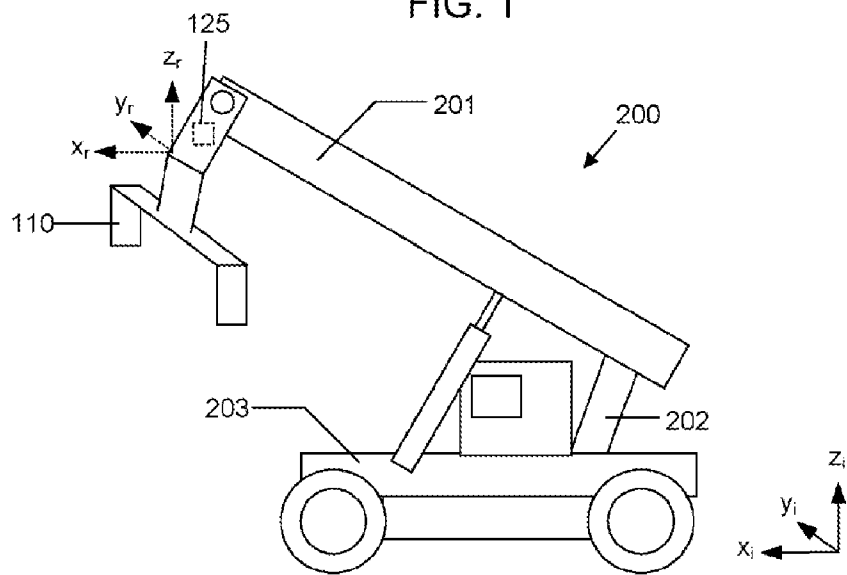


FIG. 2

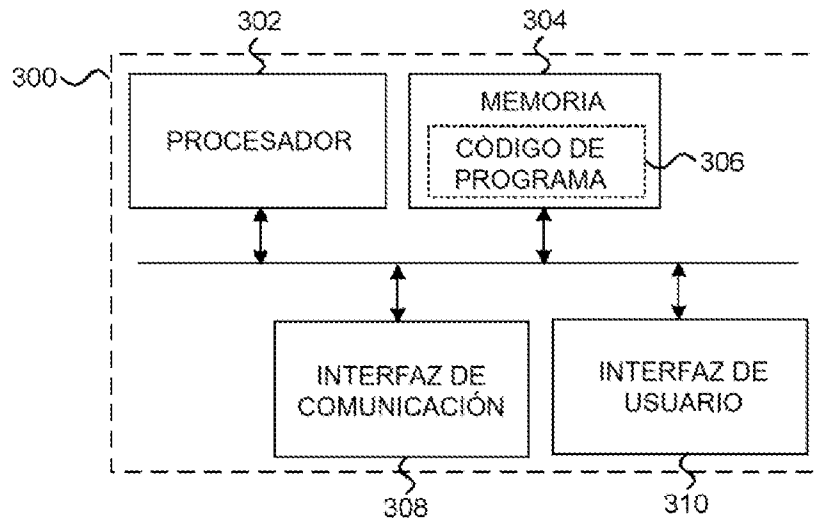


FIG. 3

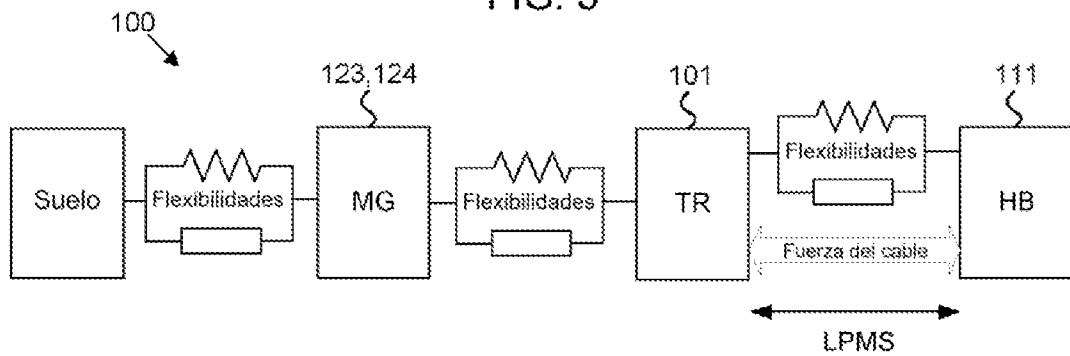


FIG. 4

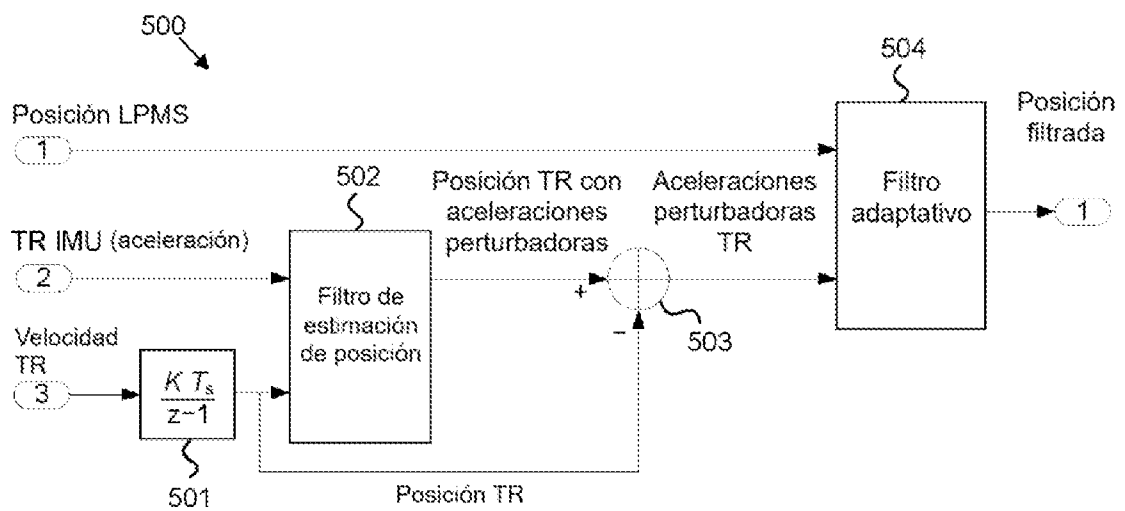


FIG. 5

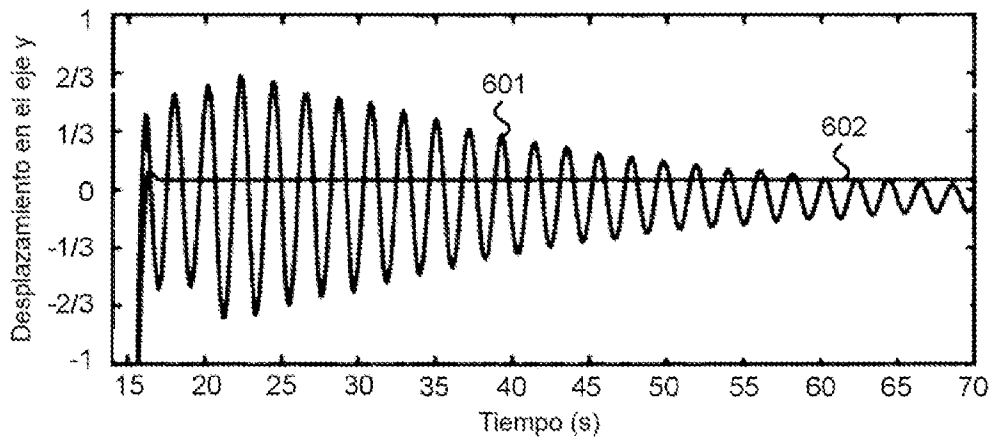


FIG. 6

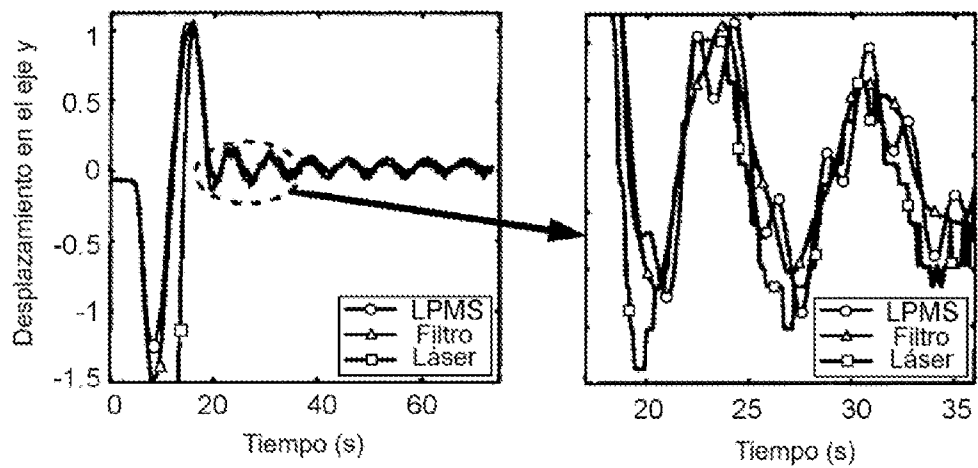


FIG. 7

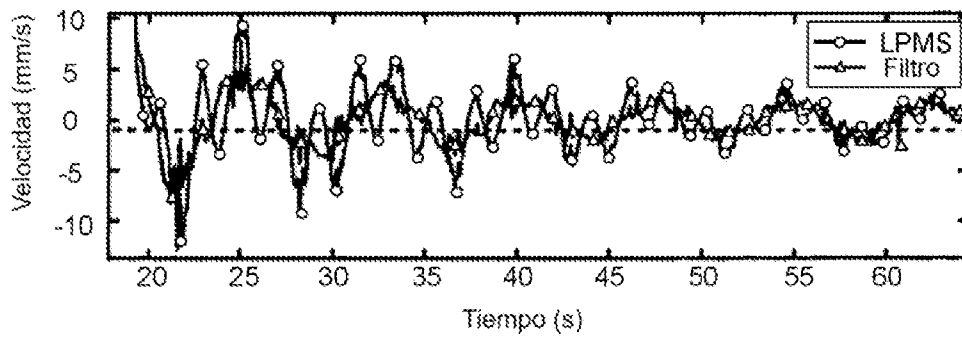


FIG. 8

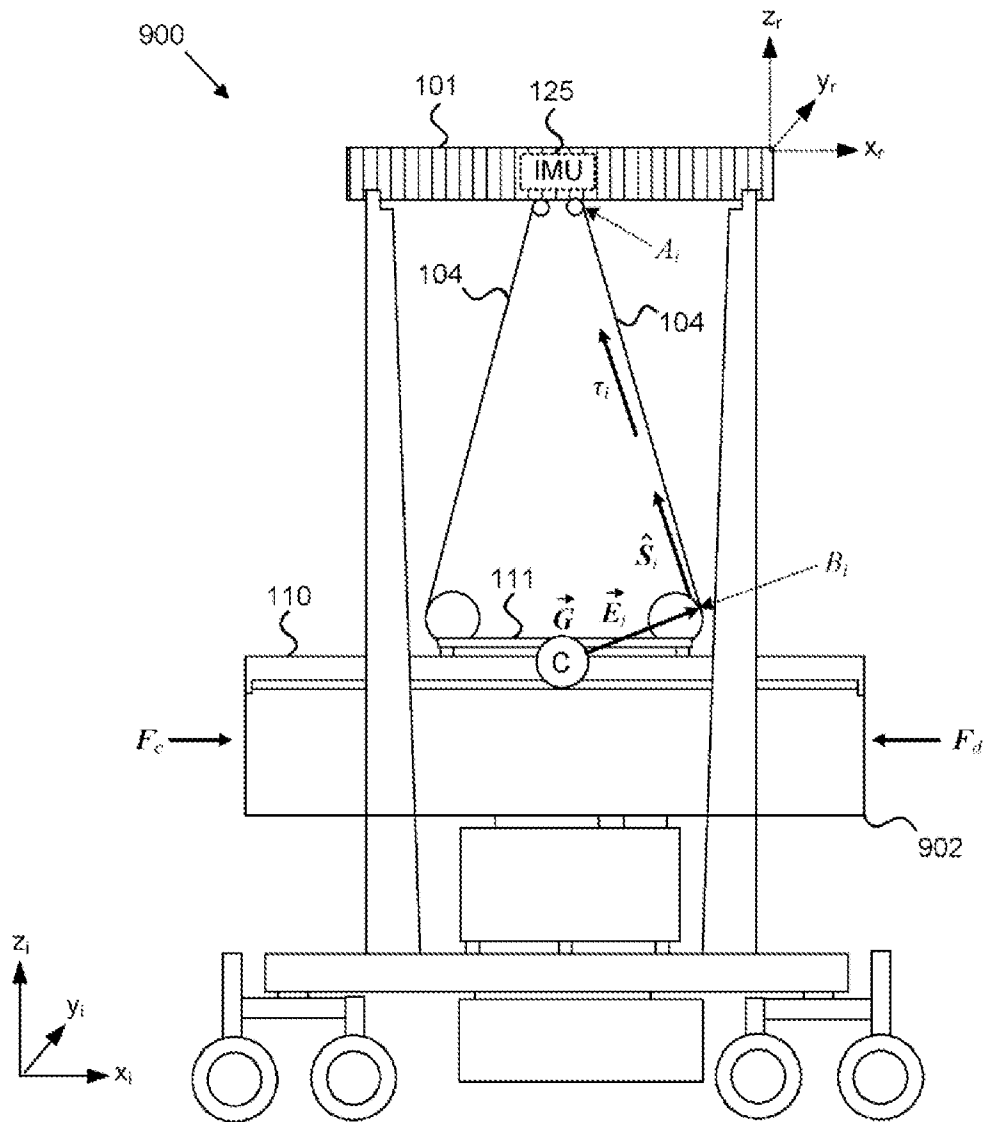


FIG. 9

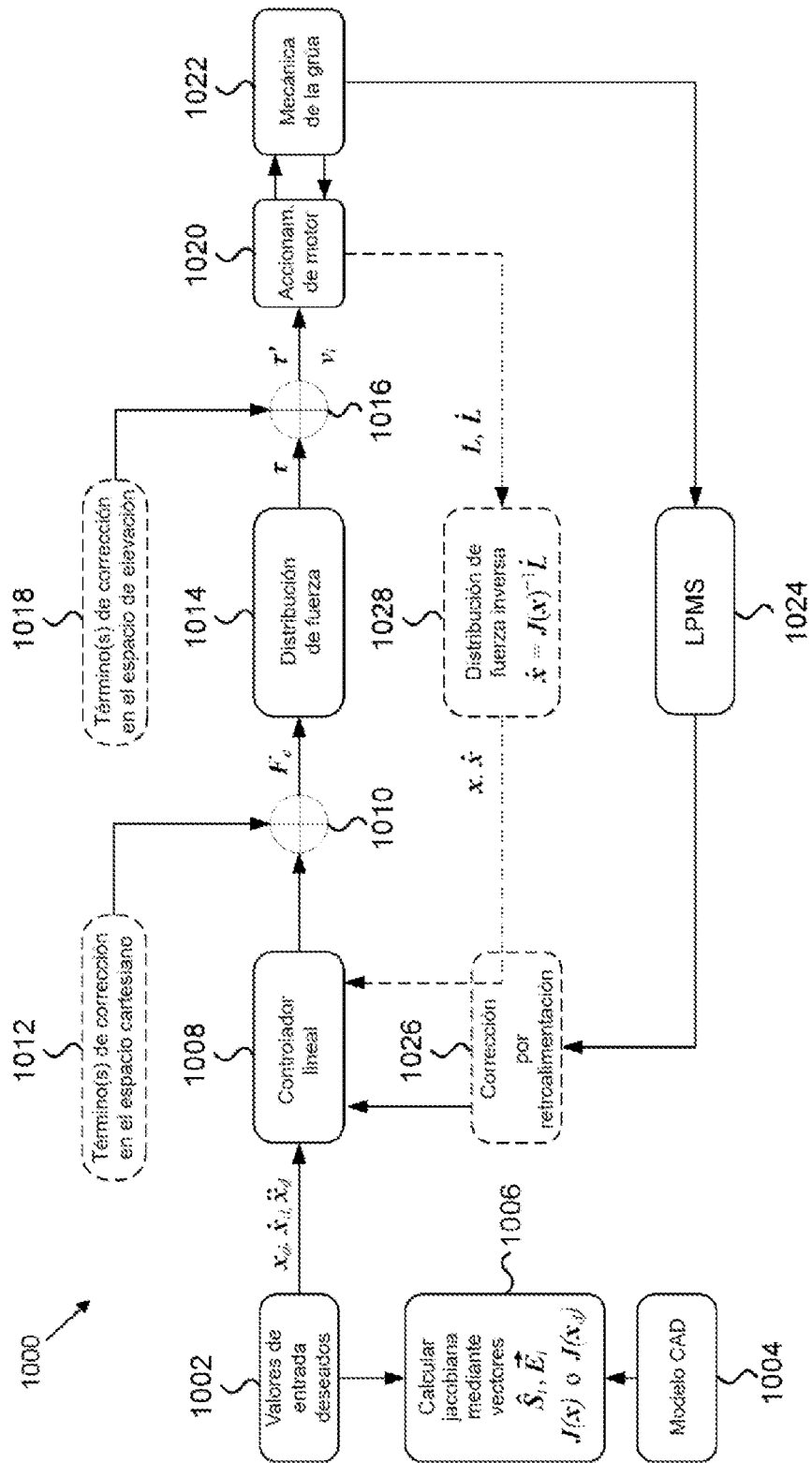


FIG. 10

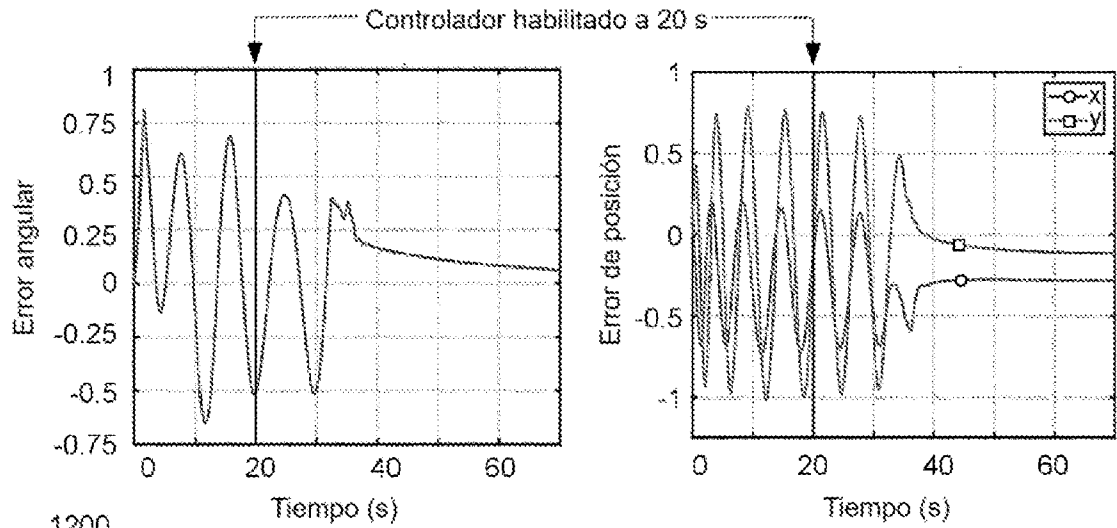


FIG. 11

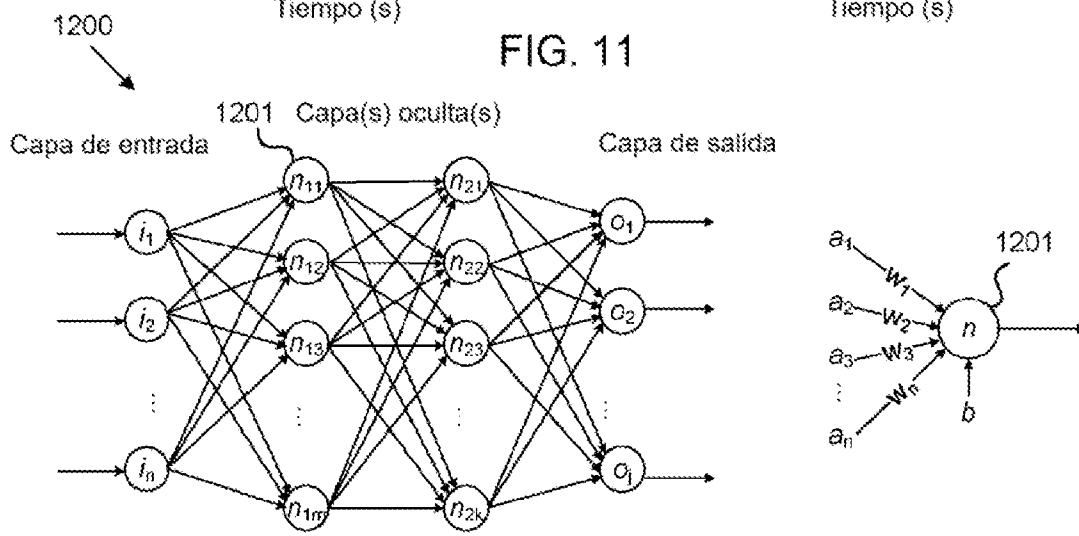


FIG. 12

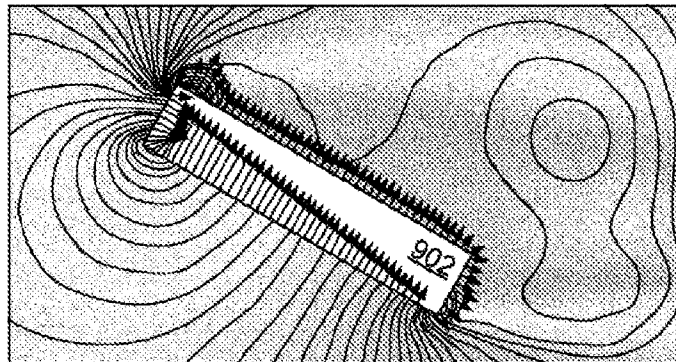


FIG. 13

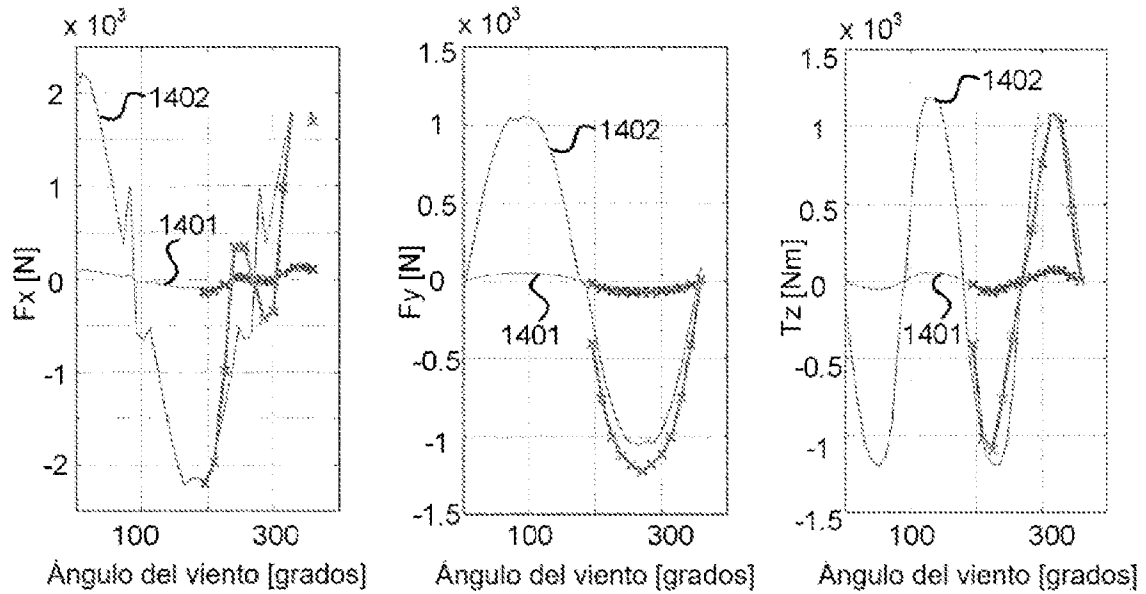


FIG. 14

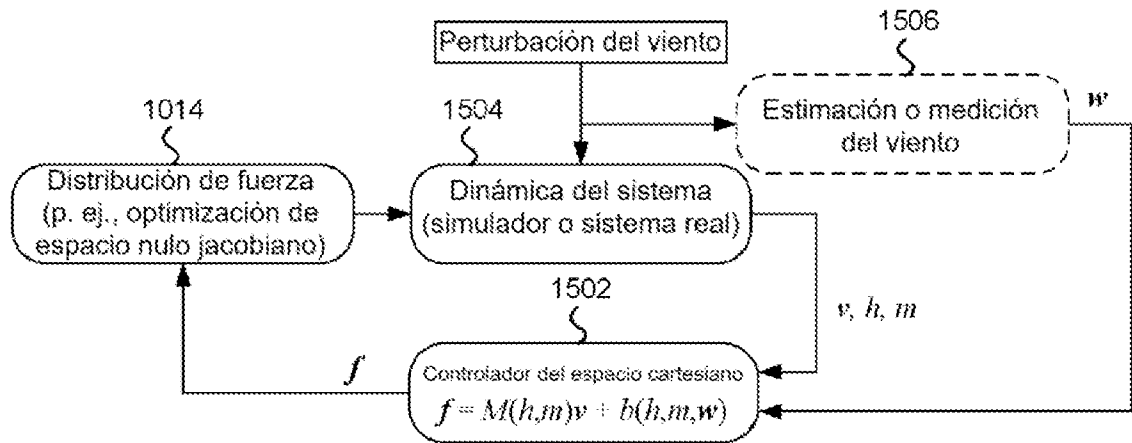


FIG. 15

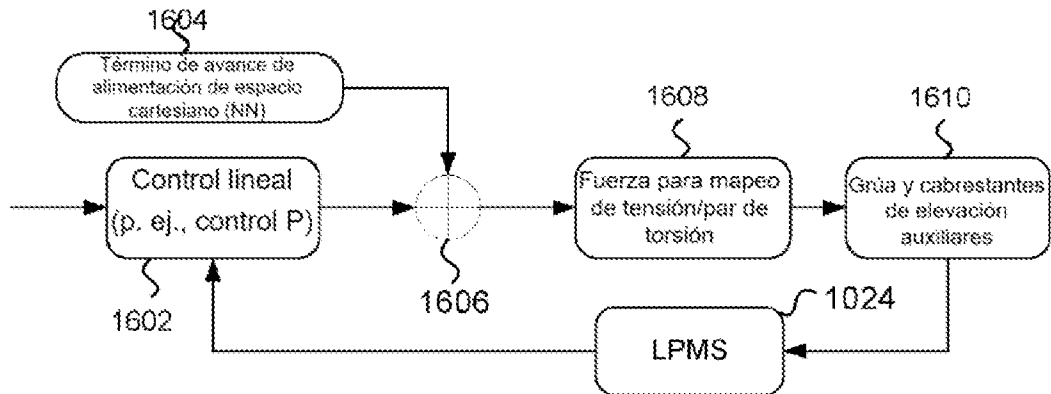


FIG. 16

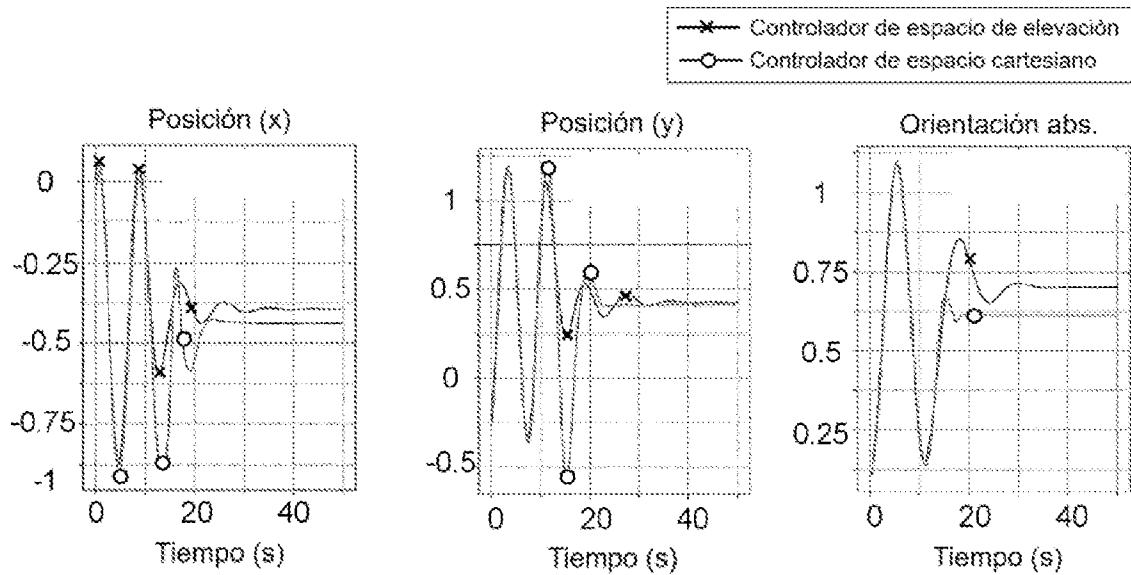


FIG. 17

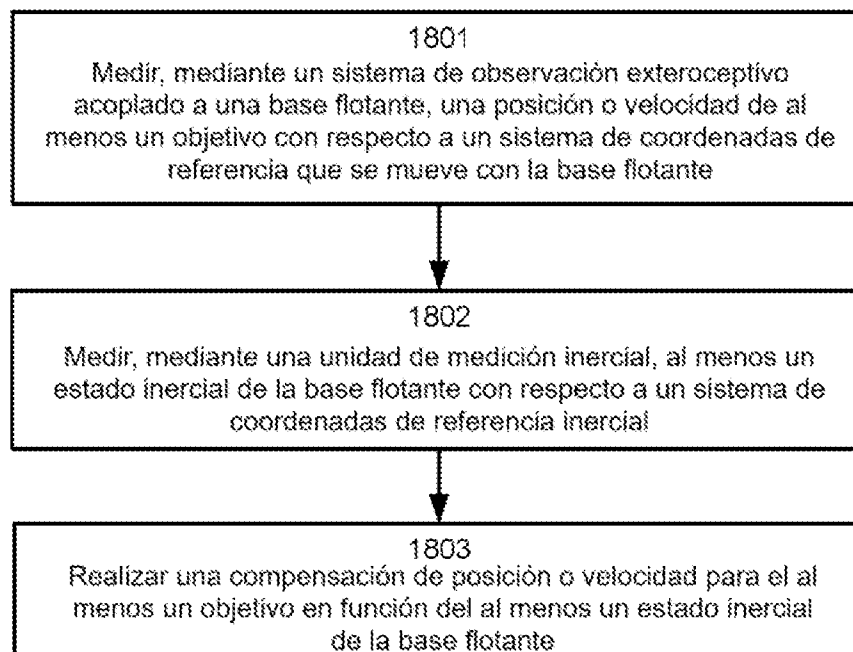


FIG. 18

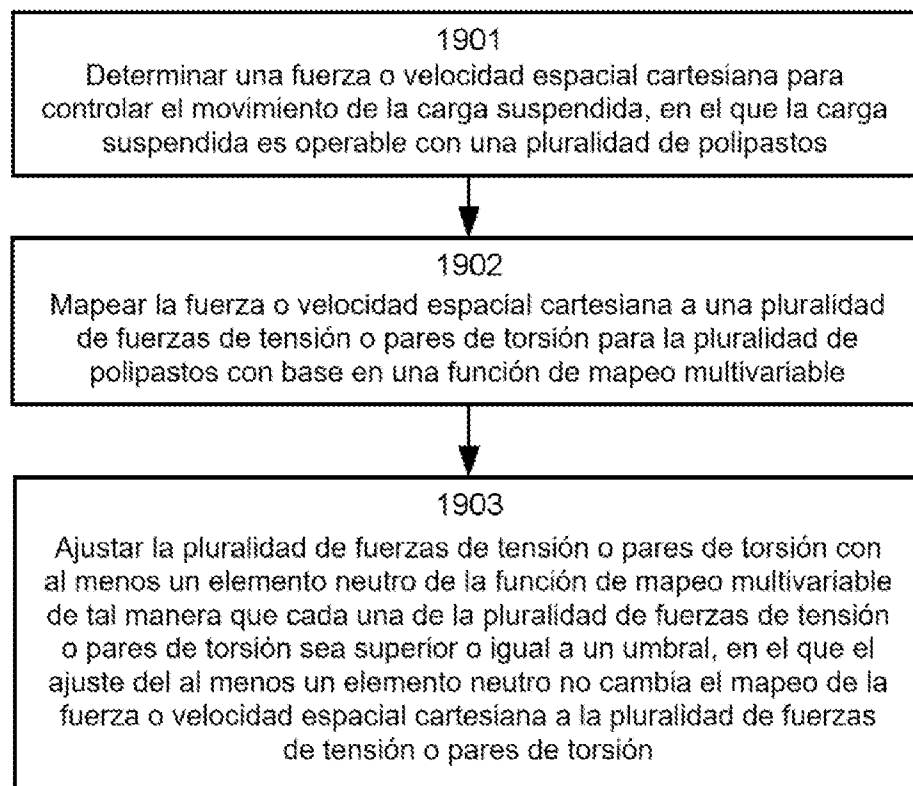


FIG. 19

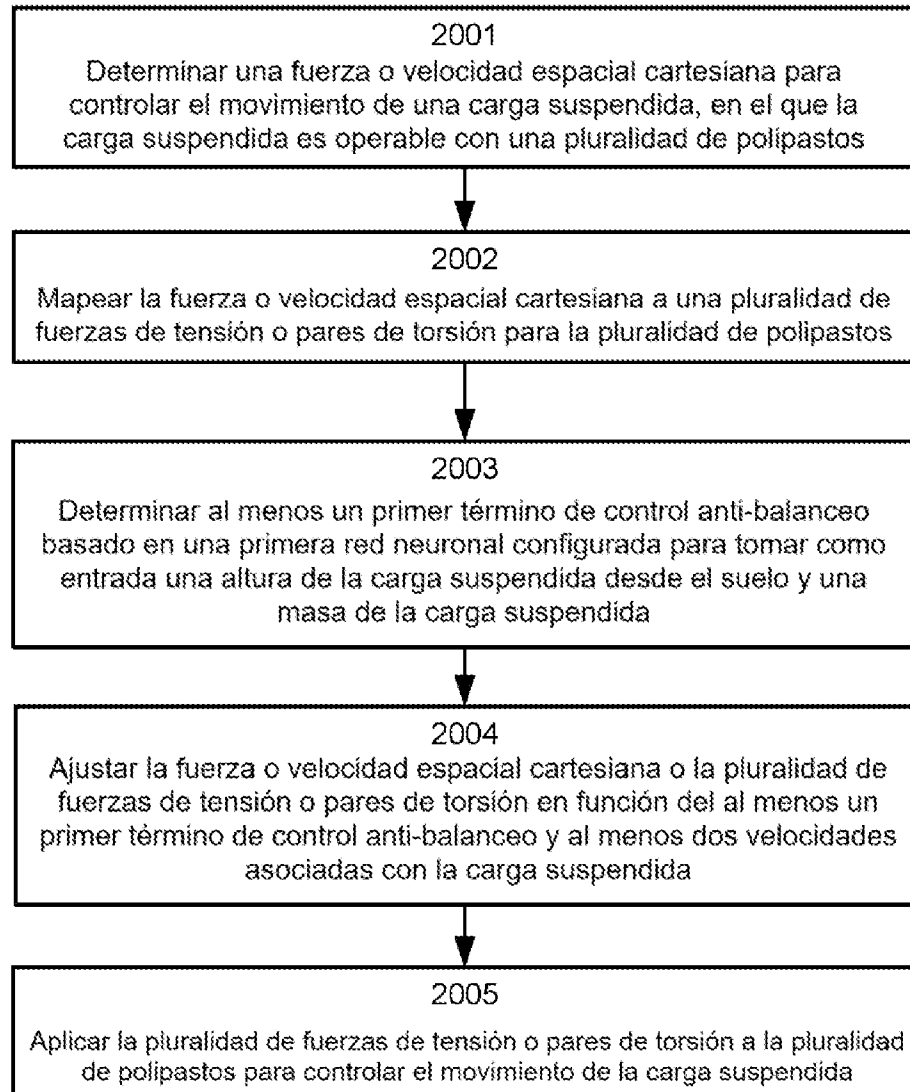


FIG. 20