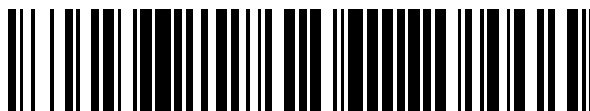


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 743 527**

51 Int. Cl.:

B66C 13/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.09.2017** **E 17190875 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.05.2019** **EP 3305710**

54 Título: **Procedimiento de control de grúa antibalanceo con filtro de tercer orden**

30 Prioridad:

05.10.2016 FR 1659607

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

19.02.2020

73 Titular/es:

**MANITOWOC CRANE GROUP FRANCE (100.0%)
66 Chemin du Moulin Carron
69570 Dardilly , FR**

72 Inventor/es:

**CLAEYS, XAVIER y
BONNABEL, SILVÈRE**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 743 527 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de control de grúa antibalanceo con filtro de tercer orden

5 La presente invención se refiere al campo general de los equipos de elevación, del tipo de grúa, y más particularmente del tipo de grúas torre, que comprenden un punto de fijación móvil, del tipo de carro, al que se puede suspender una carga para mover, llamada "carga suspendida", y que están equipados con un sistema de control que permite llevar a cabo el movimiento y el control del desplazamiento de dicha carga suspendida.

10 La presente invención se refiere más particularmente a procedimientos de control para gestionar el sistema de dirección de dicho equipo de elevación.

15 Generalmente, dichos procedimientos de control, que están destinados a proporcionar asistencia en el control de la máquina, comprenden una etapa de adquirir una instrucción de control, durante la cual se recoge la instrucción de velocidad que se expresa por el conductor de la máquina de elevación y que corresponde a la velocidad que dicho conductor desea dar a la carga suspendida, luego se desarrolla un paso de procesamiento en el que se desarrolla, a partir de dicha instrucción de conducción, una instrucción de rendimiento que aplicado a los motores de accionamiento que mueven dicha carga suspendida.

20 Además, para garantizar la precisión y seguridad de las operaciones de transporte de carga suspendida, los procedimientos de control conocidos generalmente buscan controlar, y más particularmente limitar, la amplitud de las oscilaciones pendulares, o "balanceo", a las cuales la carga suspendida puede estar sujeta al movimiento del carro.

25 Para este propósito, es conocido en particular para combatir el lastre mediante un servo de circuito cerrado, en el que se miden los valores reales de la posición y la velocidad del carro, así como el valor del ángulo de giro de la carga, para poder generar una corrección de la instrucción que se aplica a los motores que accionan el carro y que tiene como objetivo reducir dicho balanceo.

30 Aunque un sistema de este tipo mitiga efectivamente la suspensión, puede tener algunas desventajas.

De hecho, un servocontrol de circuito cerrado de este tipo impone la implementación de numerosos sensores, destinados, por ejemplo, a medir el ángulo real del globo, lo que aumenta la complejidad y, en consecuencia, el costo y el riesgo de fallo del sistema de control, y más generalmente del equipo de elevación equipado con dicho sistema de dirección.

35 Además, la complejidad del modelo matemático utilizado por dicho sistema de control, así como la cantidad de datos a medir y procesar, tienden a movilizar recursos relativamente grandes y costosos en términos de potencia informática, memoria y energía.

40 Además, la asistencia de pilotaje así ofrecida puede tender a amortiguar excesivamente las respuestas (reacciones) del equipo de elevación a las instrucciones del conductor (u "operador de grúa"), distorsionando así la percepción intuitiva del comportamiento de la máquina que puede tener dicho conductor, y en particular al darle al conductor la impresión desagradable de que la máquina carece de capacidad de respuesta y no implementa fielmente sus instrucciones.

45 Se conoce un procedimiento según el preámbulo de la reivindicación 1 a partir del documento FR 3.016.872 A1.

50 Por lo tanto, los objetos asignados a la invención buscan superar los inconvenientes antes mencionados y proponer un nuevo procedimiento para controlar el movimiento de una carga suspendida que garantice un desplazamiento rápido y suave de la carga suspendida, con un control efectivo de la carga suspendida, que procure al conductor una sensación leal que permita un control muy libre, receptivo y relativamente intuitivo, y que sea, a pesar de estas actuaciones, particularmente simple y económico de implementar.

55 Los objetos asignados a la invención se logran mediante un procedimiento para controlar el movimiento de una carga suspendida en un punto de unión de un equipo de elevación, comprendiendo dicho procedimiento una etapa (a) de adquisición de la instrucción de control, en el transcurso de la cual se adquiere la llamada "instrucción de control" que es representativa de una velocidad de desplazamiento que el conductor del equipo de elevación desea conferir a la carga suspendida, luego una etapa (b) de tratamiento durante la cual se desarrolla una instrucción llamada "instrucción de ejecución", que está destinada a aplicarse al menos a un motor de accionamiento, a partir de dicha instrucción de control para mover la carga suspendida, caracterizándose el procedimiento porque la etapa de procesamiento (b) comprende una subetapa (b4) de regularización C^3 durante la cual se procesa la instrucción de control para conferir a dicha instrucción de control propiedades de derivabilidad tercera con respecto al tiempo y de continuidad con respecto al tiempo, con el fin de generar, a partir de dicha instrucción de control, la denominada "instrucción de control filtrada" que es de clase C^3 , y luego se define la instrucción de ejecución a partir de dicha instrucción de control filtrada.

65 Más preferentemente, la subetapa (b4) de regularización C^3 puede consistir en una subetapa (a4) de filtrado de tercer

orden en la que se aplica a la instrucción de control un filtro de tercer orden a fin de generar una instrucción de control filtrada que es clase C^3 .

5 Por "ser de clase C^3 ", se indica, en el sentido matemático del término, que el parámetro considerado, aquí la instrucción de control filtrada, o más precisamente la función que representa la evolución de dicho parámetro considerado como una función del tiempo, es decir, aquí la función que representa la evolución de la instrucción de control filtrado en función del tiempo, es tres veces derivable (diferenciable) con respecto al tiempo, y dicha función, así como sus derivadas temporales primera, segunda y tercera son continuas.

10 Ventajosamente, la regularización C^3 de la instrucción de control (instrucción de velocidad para la carga suspendida), y más particularmente el uso para este propósito de un filtro de tercer orden aplicado a dicha instrucción de control, hace posible asegurar que la instrucción de control filtrada, que luego se utilizará efectivamente para definir la instrucción de ejecución aplicada a los motores de accionamiento, es de clase C^3 .

15 Ventajosamente, una instrucción de control filtrada, así regularizada C^3 , tiene condiciones de regularidad excepcionales (en el sentido de que aquí es tres veces derivable, y que sus derivadas temporales primera, segunda y tercera son continuas), y en consecuencia también tiene propiedades matemáticas de continuidad y de límite que generalmente no tiene la instrucción de control sin procesar, según la define y modifica en tiempo real el conductor de la máquina.

20 De hecho, se recordará que es probable que el conductor de la máquina varíe la instrucción de control en cualquier momento, de forma impredecible.

25 Dependiendo de las diferentes situaciones a las que debe reaccionar el conductor de la máquina, la instrucción de control (que aquí toma la forma de una instrucción de velocidad para la carga suspendida) puede variar en dirección, cuando el conductor de la máquina decide cambiar la dirección del movimiento (izquierda/derecha, distancia/aproximación), y en segundo lugar en amplitud (intensidad), cuando el conductor pasa de un movimiento que desea rápido a un movimiento más lento (desaceleración), o viceversa (aceleración).

30 Además, la velocidad de estos cambios en la instrucción de control puede variar considerablemente, dependiendo de la frecuencia y la velocidad con la que el conductor de la máquina acciona los comandos para realizar cambios o correcciones de trayectoria.

35 Por lo tanto, la instrucción de control sin procesar puede presentar en la práctica algunas variaciones abruptas de tipo escalonado que pueden asimilarse matemáticamente a las discontinuidades.

40 Del mismo modo, debido en particular a estas discontinuidades, las derivadas de tiempo (típicamente del orden uno y del orden dos) de la instrucción de control, que se utilizarán preferiblemente en el modelado del comportamiento de la carga suspendida y en la elaboración de la instrucción de ejecución, podrían presentar puntualmente, si se calcularan directamente sin la regularización adecuada (filtrado), ciertas divergencias o discontinuidades, de modo que la instrucción de ejecución resultante podría causar reacciones espasmódicas o inestables de la carga suspendida.

45 Esta es la razón por la cual el procedimiento según la invención suaviza ventajosamente la instrucción de control antes de que se aplique realmente al motor o motores de accionamiento, lo que elimina de la señal de control (instrucción de ejecución) las inestabilidades, discontinuidades y otras divergencias que podrían causar sacudidas y la aparición (o mantenimiento) de una oscilación.

50 Por lo tanto, es posible obtener un movimiento de la carga suspendida que sea particularmente regular y estable, independientemente de la naturaleza de dicho movimiento (es decir, sea cual sea la forma de la trayectoria deseada por el conductor de la máquina), e independientemente de la velocidad y amplitud de dicho movimiento deseado por el conductor de la máquina.

55 Ventajosamente, y como se detallará más adelante, la regularidad C^3 conferida a la instrucción de control permite además definir posteriormente la instrucción de ejecución, a partir de dicha instrucción de control, mediante un modelo matemático simplificado que no solo es simple y rápido de ejecutar, sino que, sobre todo, produce una instrucción de ejecución que es inherentemente no generadora de oscilaciones, es decir, una instrucción de ejecución que, cuando se aplica a los motores de accionamiento, no causa (no puede causar por sí misma) oscilaciones.

60 Además, el procedimiento según la invención permite notablemente un ajuste libre y preciso de los coeficientes, así como de la pulsación, del filtro de tercer orden que se aplica a la instrucción de control, lo que permite mantener en todas las circunstancias una convergencia rápida de la velocidad de la carga suspendida hacia la instrucción de velocidad expresada por el conductor de la máquina.

65 En otras palabras, el procedimiento proporciona un control dinámico y receptivo.

A continuación, el procedimiento según la invención permite ventajosamente optimizar el uso del motor o motores de

accionamiento, ya que permite obtener el mejor rendimiento posible de dicho motor o dichos motores, especialmente en términos de velocidad o aceleración conferida al punto de unión de la carga, respetando en todo momento los límites materiales de dicho motor o motores.

5 Se entiende que si un motor no puede alcanzar la instrucción que se le ha fijado porque dicha instrucción es demasiado alta con respecto a las capacidades de dicho motor, entonces el accionamiento real del punto de enganche sufrirá una insuficiencia con respecto al accionamiento deseado, de modo que el movimiento de dicho punto de unión (y por lo tanto el movimiento de la carga suspendida) que se obtendrá no corresponderá al movimiento deseado.

10 Sin embargo, si la instrucción de ejecución se calcula por definición precisamente para obtener (teóricamente) un movimiento (movimiento deseado) regular y sin oscilación, se entenderá que si, en la práctica, el motor de accionamiento no ejecuta correctamente dicha instrucción de ejecución, entonces el sistema de control no se comportará como se desea, y eso puede dar lugar a la aparición de una suspensión y cierta pérdida de control de los movimientos del punto de conexión y de la carga.

15 Aquí, gracias a la invención, es posible parametrizar la regularización C^3 , y más particularmente es posible parametrizar el filtrado del tercer orden, y si es necesario modificar esta parametrización de la regularización C^3 (o filtrado, respectivamente) a lo largo del tiempo, de modo que la instrucción de ejecución, al tiempo que promueve una respuesta rápida del sistema de control, no exceda la capacidad real de los motores de accionamiento en términos de
20 velocidad máxima y aceleración máxima.

A este respecto, se observará en particular que, por un lado, la aceleración máxima que se puede impartir al punto de unión (carro) depende directamente de la capacidad de aceleración máxima de los motores de accionamiento utilizados para mover dicho punto de unión, y que por otro lado existe matemáticamente, debido a las leyes físicas de
25 la dinámica, una relación entre la aceleración del punto de unión (aceleración del carro) y la tercera derivada de la velocidad de la carga suspendida.

Por lo tanto, cuando se corrige C^3 , la instrucción de control sin procesar (instrucción de velocidad de la carga suspendida) expresada por el conductor de la máquina, según la invención, lleva a cabo ventajosamente una
30 planificación del perfil de la instrucción de velocidad que aplicaremos a los motores de accionamiento, es decir que planificamos la evolución en el tiempo (y más particularmente la tasa de cambio por unidad de tiempo) del valor de la instrucción de ejecución (valor de la instrucción de velocidad del carro), según un perfil de evolución que refleje mejor la instrucción de control deseada pero que también sea y sobre todo sea compatible con la capacidad de los motores para proporcionar una respuesta que sea en todo momento la altura de dicha instrucción de ejecución.

35 De esta manera, la instrucción de ejecución es en la práctica siempre "realizable", es decir que dicha instrucción de ejecución es intrínsecamente tal que dicho sistema de control real todavía es capaz de "realizar" (lograr) en realidad dicha instrucción de ejecución que se le aplica y, por lo tanto, de proporcionar una respuesta real que sea consistente con el comportamiento esperado de dicho sistema de control, y más particularmente consistente con el
40 comportamiento esperado del carro (como dicho comportamiento esperado está definido por la instrucción de ejecución).

Por lo tanto, la instrucción de ejecución nunca toma el sistema de control real por defecto.

45 Más particularmente, el filtro de tercer orden propuesto simplifica la implementación de saturaciones apropiadas, durante el procesamiento de la instrucción de control, y por lo tanto la implementación de límites dinámicos "inteligentes" de la instrucción de ejecución, que permiten dibujar extraer lo mejor de los motores de accionamiento, al tiempo que garantiza un control permanente, preciso y confiable de los movimientos del punto de unión y la carga suspendida.

50 Finalmente, se observará que el procedimiento de control según la invención permite ventajosamente controlar el equipo de elevación mediante un servocontrol de bucle abierto, simplemente aplicando la instrucción de ejecución (referencia de velocidad) al motor de accionamiento en cuestión, sin requerir ninguna medición de la suspensión efectiva (es decir, sin la necesidad de obtener retroalimentación sobre el ángulo real de la oscilación), lo que limita el
55 número de sensores y la potencia de cálculo necesarios para controlar y, por lo tanto, reduce la complejidad, la congestión y el consumo de energía del sistema de dirección.

Otros objetos, características y ventajas de la invención aparecerán con más detalle al leer la descripción que sigue, y con la ayuda de los dibujos adjuntos, proporcionados con fines puramente ilustrativos y no limitativos, entre los
60 cuales:

La figura 1 ilustra, en una vista en perspectiva esquemática, la disposición general de un ejemplo de mecanismo elevador accionado por un procedimiento según la invención.

65 La figura 2 ilustra, en una vista lateral esquemática, el principio general de un modelo de péndulo mecánico que subyace al procedimiento según la invención.

La figura 3 ilustra, en forma de diagrama de bloques, el cálculo de la pulsación aplicable al filtro de tercer orden, así como la saturación preliminar de la instrucción de control, que precede al filtrado del tercer orden.

5 La figura 4 ilustra, en forma de diagrama de bloques, el principio de implementar una etapa de procesamiento (b) según la invención, y más particularmente el detalle de un filtro de tercer orden según la invención.

10 La figura 5 ilustra, en una vista esquemática desde arriba, la correspondencia entre los sistemas de coordenadas cartesianas y las coordenadas cilíndricas que hacen posible expresar las instrucciones de control, y luego las instrucciones de ejecución, en marcadores apropiados.

15 La figura 6 ilustra, en forma de diagrama de bloques, la implementación del procedimiento según la invención para controlar, por un lado, un motor de orientación (la "orientación" denota el componente de giro de guiñada, alrededor un eje (ZZ') llamado "eje de orientación") y en segundo lugar un motor de distribución (la "distribución" designa el componente radial de distancia o aproximación con respecto al eje (ZZ') de orientación), de un conjunto de control expresado en coordenadas cilíndricas, que comprende un componente radial y un componente angular.

20 La figura 7 ilustra esquemáticamente un punto de referencia de control filtrado obtenido en respuesta a un punto de referencia de control sin procesar de tipo escalonado, y un punto de referencia de ejecución que se determina a partir de dicho punto de referencia de control filtrado, de modo que esto se ilustra en la figura 6, por medio de una fórmula de conversión derivada del modelo mecánico de la figura 2.

25 La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar el movimiento de una carga 1 suspendida en un punto de unión H de un equipo de elevación 2.

30 El equipo de elevación 2 está diseñado para poder mover el punto de unión H y, en consecuencia, la carga suspendida 1, según un componente de la rotación de guiñada Θ alrededor de un primer eje vertical (ZZ'), llamado "eje de orientación", y/o según un componente radial R, correspondiente a un movimiento llamado "distribución", aquí en traslación a lo largo de un segundo eje (DD'), llamado "eje de distribución" que intersecta dicho eje de orientación (ZZ'), como se ilustra en las figuras 1 y 2.

El equipo de elevación 2 puede en particular formar una grúa torre, cuyo mástil 3 materializa el eje de orientación (ZZ'), y cuya flecha 4 materializa el eje de distribución (DD'), tal como está ilustrado en la figura 1.

35 En aras de la simplicidad de la descripción, tal configuración de grúa torre se considerará a continuación, y más particularmente una configuración de una grúa torre con pluma horizontal 4, entendiéndose que es perfectamente posible aplicar el principio de la invención a otros equipos de elevación, y en particular a grúas móviles o grúas de pluma abatible.

40 Observe la intersección del eje de distribución (DD') y el eje de orientación (ZZ').

El punto de unión H está formado preferiblemente por un carro 5, que puede ser guiado ventajosamente en traslación a lo largo del eje de distribución (DD'), a lo largo de la pluma 4.

45 Por conveniencia, podemos asimilar el carro 5 y el punto de unión H en lo que sigue.

50 El movimiento de orientación Θ , y, respectivamente, el movimiento de distribución R, y más particularmente el movimiento de accionamiento del carro 5 en traslación R a lo largo de la pluma 4, puede garantizarse mediante cualquier motor de accionamiento 7, 8 adecuado, preferiblemente eléctrico, y más particularmente por al menos un motor (eléctrico) 8 de orientación y, respectivamente, un motor (eléctrico) de distribución 7.

La carga 1 está suspendida en el punto de unión H por un dispositivo de suspensión 6, como un cable de suspensión. A continuación, dicho dispositivo de suspensión se asimilará a dicho cable de suspensión 6, por comodidad.

55 La carga suspendida 1 también se puede mover preferiblemente en un componente vertical, denominado "elevación", para variar la altura a la que la carga suspendida 1 con relación al suelo.

60 Preferiblemente, será posible para este propósito variar la longitud L del cable de suspensión 6, típicamente por medio de un cabrestante accionado por un motor (preferiblemente eléctrico) de elevación, para cambiar la distancia de la carga suspendida 1 en el punto de unión H, y así elevar la carga 1 acortando la longitud L (enrollando el cable de suspensión 6) o, por el contrario, bajar dicha carga 1 mediante un alargamiento de dicha longitud L (desenrollando el cable 6).

65 Por conveniencia, el término "sistema de dirección" puede usarse para designar el movimiento y el control del desplazamiento de la carga suspendida 1, dicho conjunto típicamente comprende el módulo o módulos (calculadoras) 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 que permiten la implementación del procedimiento según la invención, así como los motores

de accionamiento 7, 8 (actuadores) y, si corresponde, los elementos móviles (efectores) de la máquina accionados por dichos motores de accionamiento 7, 8; dichos miembros móviles corresponden aquí, por un lado, al mástil 3 y a la pluma 4, que se puede guiar según el movimiento de orientación Θ , y por otro lado al carro 5 que proporciona el movimiento dispensador R a lo largo de la pluma 4.

5 Según la invención, el procedimiento comprende una etapa (a) de adquisición de la instrucción de control durante la cual se adquiere la llamada "instrucción de control" V_u que es representativa de una carga de velocidad de desplazamiento V_{load} que el conductor del equipo de elevación 2 desea conferir a la carga suspendida 1.

10 El procedimiento según la invención comprende entonces una etapa (b) de procesamiento en la que se desarrolla, a partir de dicho valor de consigna de pilotaje V_u , aquí por medio de un módulo de procesamiento 10, una "consigna de ejecución" V_{trol} que está destinada a aplicarse al menos a un motor de accionamiento 7, 8 para mover la carga suspendida 1 y, más particularmente, para mover el carro 5 al que está suspendida dicha carga 1.

15 Se observará que, ventajosamente, el procedimiento hace posible controlar la velocidad, en lugar de la trayectoria, y más particularmente controlar la velocidad del carro 5, desde una referencia de velocidad V_u que corresponde a la velocidad deseada para la carga suspendida 1.

20 Como tal, la instrucción de ejecución V_{trol} expresará preferiblemente la instrucción de velocidad que debe alcanzar el punto de unión H (es decir, la instrucción de velocidad que debe alcanzar el carro 5).

25 En otras palabras, el procedimiento comprende preferiblemente una etapa (a) durante la cual el conductor define (libremente) y expresa (voluntariamente) una instrucción de conducción en la forma de una instrucción de velocidad que desea ver seguida por la carga suspendida 1, luego una etapa de procesamiento (b) durante la cual se procesa dicha instrucción de control (consigna de velocidad de la carga suspendida), aquí más particularmente filtrada por un filtro de tercer orden, para convertirla en una instrucción correspondiente de velocidad del carro 5, formando la instrucción de ejecución (de velocidad) V_{trol} que se aplica al motor de accionamiento 7, 8 adecuado.

30 Además, se observará que el procedimiento ofrece al operador de la máquina una gran libertad de maniobra, ya que dicho conductor puede fijar libremente, en cualquier momento y según la amplitud que elija, la instrucción de control (consigna de velocidad) V_u que desea que ejecute la carga 1, y esto sin verse forzado, por ejemplo, a respetar una trayectoria fija predeterminada.

35 Se observará además que el procedimiento según la invención es válido tanto para controlar el movimiento de orientación θ como para controlar el movimiento de distribución R, o para controlar cualquier combinación de estos dos movimientos simultáneamente.

40 Desde el punto de vista formal, se observará que la posición de los miembros móviles, es decir, el punto de unión H/carro 5 por un lado, la carga 1 suspendida por el otro y los movimientos de dichos miembros móviles, ya sea en un sistema de coordenadas cartesianas (O, X, Y, Z) asociado con la base (considerada fija) del vehículo elevador 2, o en una referencia de tipo "polar" (O, r, θ) utilizando coordenadas cilíndricas o incluso esféricas.

Por convención, será posible observar, en dicho marco cartesiano:

45 P_{trol}^x y P_{trol}^y las posiciones en X (primer eje horizontal), respectivamente en Y (segundo eje horizontal, perpendicular al primer eje horizontal X), del carro 5 (el índice "trol" denota el carro o "trolley");

V_{trol}^x y V_{trol}^y los componentes de velocidad en X, respectivamente en Y, de dicho carro 5;

50 P_{load}^x y P_{load}^y las posiciones en X, respectivamente en Y, de la carga suspendida 1 (el índice de "carga" denota la carga suspendida 1);

55 V_{load}^x y V_{load}^y los componentes de velocidad en X, respectivamente en Y, de dicha carga suspendida 1, que corresponden a los componentes de la velocidad (deseada) de la carga suspendida 1, y por lo tanto, en la práctica, a los componentes de la carga punto de consigna piloto V_u .

60 Cuando se utilizan las coordenadas cilíndricas (r, θ), se podrá más particularmente unir a cada miembro móvil considerado un sistema de coordenadas Frenet que permita expresar el componente radial V^r (según el movimiento de distribución R) y el componente ortopédico V^θ (según la tangente al movimiento de orientación Θ) de la velocidad del miembro móvil en cuestión, como se muestra en particular en la figura 5.

65 Por lo tanto, en dicha figura 5, al igual que en la figura 6, V_{load}^r y V_{load}^θ representan los componentes radiales y respectivamente ortorradianal del vector velocidad V_{load} de la carga 1 suspendida (es decir, en la práctica los componentes radial y ortorradianal de la instrucción de control en velocidad V_u), mientras que V_{trol}^r y V_{trol}^θ representa los componentes radial y respectivamente ortorradianal del vector velocidad V_{trol} del carro 5 (es decir, los componentes radial y ortorradianal de la instrucción de ejecución en velocidad V_{trol} , que se aplican respectivamente al motor de distribución

7 y al motor de orientación 8).

Como se ilustra en las figuras 3, 4 y 6, el conductor de la máquina puede proporcionar la instrucción de control V_u mediante cualquier miembro de control apropiado 11.

5 El dispositivo de control 11 puede tomar la forma de una palanca de mando, o un conjunto de palancas que permiten al conductor expresar la instrucción de velocidad de orientación (la velocidad de guiñada, ortorradiar) $V_{load\theta}$ y la instrucción de velocidad de distribución (velocidad radial) V_{loadr} que desea imprimir a la carga suspendida 1.

10 Por simple conveniencia de notación, la instrucción de control V_u sin procesar, tal como la expresa el conductor de la máquina en el miembro de control 11, es decir, la señal proporcionada por la palanca de mando a la entrada del sistema de control, preferiblemente se referirá a V_{JOY} en las figuras antes mencionadas.

15 Para explicar mejor la invención, ahora se expondrán algunos elementos mecánicos teóricos que hacen posible modelar un sistema pendular, con referencia a la figura 2.

Tenga en cuenta que la explicación dada aquí en un plano, con referencia a una sola dimensión de desplazamiento, a lo largo del eje X, que se considera paralela a la pluma 4 y al eje de distribución (DD'), sigue siendo válida en tres dimensiones

20 Según el principio fundamental de la dinámica (ley de Newton), y descuidando cualquier fuerza externa como el viento, tenemos:

$$M\vec{a}_{load} = \vec{T} + M\vec{g}$$

25 donde

M representa la masa de la carga suspendida 1;

30 a_{load} representa la aceleración de la carga suspendida 1 (considerada aquí soportada por la dirección horizontal X);

T representa la tensión del cable de suspensión 6; g representa la gravedad (aceleración gravitacional).

35 La ecuación anterior significa que el vector $M a_{load} - Mg$ es colineal (paralelo) al vector T. Como resultado, tenemos:

$$\tan \beta = \frac{M a_{load}}{Mg} = \frac{a_{load}}{g}$$

40 con β el ángulo (ángulo de oscilación) que forma el cable de suspensión 6 con la Z vertical.

Suponiendo ángulos pequeños, también podemos escribir:

$$\sin \beta \approx \tan \beta = \frac{P_{trol} - P_{load}}{L}$$

45 con

P_{trol} la posición (aquí en X) del carro 5,

50 P_{load} la posición (aquí en X) de la carga 1, y

L la longitud del cable de suspensión 6.

La siguiente relación se deduce entre la posición P_{trol} del carro por un lado, y la posición P_{load} de la carga suspendida y la velocidad V_{load} de la carga por otro lado:

55

$$P_{trol} = P_{load} + \frac{L}{g} a_{load} = P_{load} + \frac{L}{g} \frac{d}{dt} V_{load}$$

y, derivando la expresión anterior con respecto al tiempo, se obtiene una ecuación diferencial del segundo grado, llamada "fórmula de conversión", que expresa la velocidad V_{trol} del carro 5 en función de la velocidad V_{load} de la carga suspendida 1:

$$V_{trol} = V_{load} + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}$$

que también se puede expresar mediante la transformada de Laplace

$$V_{trol}(p) = (1 + \frac{L}{g} p^2) V_{load}$$

En la práctica, gracias a la fórmula de conversión anterior, por lo tanto, es posible calcular la referencia de velocidad del carro V_{trol} , es decir, específicamente la instrucción de ejecución V_{trol} , a partir del valor de la velocidad V_{load} que se desea conferir a la carga suspendida, es decir, desde la instrucción de control V_u .

Sin embargo, también es necesario tener en cuenta el hecho de que, en el sistema de control real, el carro 5 necesariamente tiene una aceleración finita (limitada). Esta condición material requiere que, desde un punto de vista matemático, la aceleración del carro, es decir, la derivada del tiempo de la velocidad del carro,

$$\dot{V}_{trol} = \frac{d}{dt} V_{trol}$$

debe, por un lado, existir y, por otro lado, estar acotada (es decir, aumentarse en un valor fijo finito).

Sin embargo, el cálculo de la velocidad del carro (instrucción de ejecución) V_{trol} según la fórmula de conversión anterior implica la segunda derivada del tiempo

$$\ddot{V}_{load} = \frac{d^2}{dt^2} V_{load}$$

de la velocidad de la carga suspendida (velocidad de conducción) V_{load} .

Con respecto a esta fórmula de conversión, la aceleración del carro

$$\dot{V}_{trol} = \frac{d}{dt} V_{trol}$$

se expresa como una función de la derivada temporal tercera

$$\ddot{V}_{load} = \frac{d}{dt} \dot{V}_{load} = \frac{d^3}{dt^3} V_{load}$$

de la velocidad de la carga V_{load}

De ello se deduce que la condición de existencia y de delimitación de la aceleración del carro V_{trol} impone que la tercera derivada temporal \ddot{V}_{load} de la velocidad de la carga V_{load} existe y está acotada, es decir que la velocidad de la carga suspendida V_{load} (y consecuentemente la instrucción de control V_u que servirá para fijar dicha velocidad de la carga suspendida) es tres veces derivable y que su derivada tercera es continuada (y está acotada).

En otras palabras, debe garantizarse que la instrucción de control V_u realmente utilizada para calcular (según la fórmula de conversión anterior) la instrucción de ejecución V_{trol} es (en todo momento y en todas las circunstancias) de la clase C^3 , y esto a pesar de que dicha instrucción de control V_u es inicialmente expresada por el conductor de la máquina, y se adquiere sustancialmente en tiempo real, en una forma sin procesar V_{JOY} que es probable que varíe de manera impredecible con el tiempo, a libre elección del conductor, y por lo tanto no necesariamente tiene estas propiedades de regularidad C^3 .

El motivo es que, según la invención, la etapa (b) de tratamiento comprende ventajosamente una subetapa (b4) de regularización C^3 en la cual se trata la instrucción de control V_u a fin de conferir a dicha instrucción de control V_u propiedades de diferenciabilidad tercera con respecto al tiempo y de continuidad con respecto al tiempo, para generar, a partir de dicha instrucción de control V_u , una instrucción de control filtrada V_f que es de clase C^3 , entonces la define la instrucción de ejecución V_{trol} a partir de dicha instrucción de control filtrada V_f .

Según una variante posible de aplicación, la regularización C^3 se puede realizar utilizando polinomios de interpolación.

Según esta variante, la instrucción de control V_u se interpola, y más particularmente varios o todos los valores considerados entre la sucesión de diferentes valores tomados por la instrucción de control V_u durante un intervalo de tiempo dado, por medio de un polinomio

Dicho polinomio posee intrínsecamente una clase de regularidad (al menos) C^3 , y por lo tanto proporciona una aproximación precisa y específica de clase C^3 de la instrucción de control, en forma de una instrucción de control filtrada V_f de tipo polinomial.

Tal polinomio proporciona así una planificación de clase C^3 de la instrucción de control.

Sin embargo, según otra variante particularmente preferida que es más sencilla de implementar que la variante por interpolación polinómica, durante la subetapa (b4) de regularización C^3 , la instrucción de control V_u se aplica para regular C^3 dicha instrucción de control, un filtro de tercer orden F3 para generar la instrucción de control filtrada V_f que es de clase C^3 .

En otras palabras, la subetapa (b4) es preferiblemente una subetapa de filtrado de tercer orden en la que se aplica a la instrucción de control V_u un filtro de tercer orden F3 a fin de generar una instrucción de control filtrada V_f que es tres veces derivable (y más exactamente de clase de regularidad C^3).

Preferiblemente, la regularización C^3 , y más particularmente el filtrado de tercer orden, se realiza por medio de un módulo de filtrado de tercer orden 12, formado por una calculadora, electrónica o informática.

El filtrado de tercer orden F3 se puede escribir como una función de transferencia:

$$V_f(p) = F3 \cdot V_u(p) = \frac{1}{\frac{p^3}{\omega^3} + c_2 \frac{p^2}{\omega^2} + c_1 \frac{p}{\omega} + 1} V_u(p)$$

con:

ω la pulsación del filtro de tercer orden F3;

C_1, C_2 los coeficientes, respectivamente del primer orden y del segundo orden, utilizados por dicho filtro de tercer orden F3.

En el dominio temporal, el filtro de tercer orden F3 da como resultado la siguiente ecuación diferencial:

$$V_f + \frac{c_1}{\omega} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega^2} \ddot{V}_f + \frac{1}{\omega^3} \dddot{V}_f = V_u$$

Para optimizar el filtro del tercer orden F3, elegiremos preferiblemente: $c_1 = 2,15$ y $c_2 = 1,75$, como se muestra en la figura 4.

Estos valores permiten optimizar la reactividad del filtro F3, minimizando su tiempo de respuesta al 5 % (es decir, el tiempo requerido para converger la respuesta a una instrucción de tipo escalonado con un error de menos del 5 % del valor de dicho escalonado), limitando el sobreimpulso ("overshoot").

Tenga en cuenta que, según una posible variante de realización de la invención, podría utilizarse directamente la instrucción de control filtrada V_f en tanto que instrucción de ejecución V_{trol} aplicada a los motores de accionamiento 7 y 8, es decir que se podría plantear: $V_{\text{trol}} = V_f$.

De hecho, gracias a la regularización C^3 , obtenida aquí mediante el filtrado del tercer orden, la instrucción de control filtrada V_f está intrínsecamente definida y, en general, "planificada", para converger gradualmente hacia la instrucción de control V_u sin ser "demasiado rígida".

De esta manera, dicha instrucción de control filtrada V_f , regularizada C^3 , es realmente posible, los motores de accionamiento 7, 8 pueden seguir dicha instrucción de control filtrado V_f .

5 Así, en el ejemplo ilustrado en la figura 7, donde el conductor de la máquina aplica una instrucción de control V_u del tipo escalonado, se puede ver que la instrucción de control filtrada V_f evoluciona realmente según una pendiente más progresiva que la de dicho escalón, y sin discontinuidad.

10 Sin embargo, según otra variante de realización particularmente preferida de la invención, después de haber determinado la instrucción de control filtrada V_f , la instrucción de ejecución se puede definir (y calcular) de la siguiente manera, aplicando la fórmula de conversión mencionada anteriormente:

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

con:

15 V_f la instrucción de control filtrada (regularizada C^3), aquí más preferiblemente del filtro de tercer orden F3,

L la longitud del cable de suspensión 6 que conecta la carga suspendida al punto de unión, g la gravedad.

20 Esta fórmula de conversión, simple y rápida de ejecutar, tiene la ventaja de ser intrínsecamente una función antioscilaciones.

25 Por lo tanto, el uso de la fórmula de conversión anterior es ventajosamente equivalente a aplicar a la instrucción de control filtrada V_f una función antioscilación (adicional), que hace posible producir una instrucción de ejecución V_{trol} que no genera oscilaciones.

30 De hecho, la fórmula de conversión anterior proviene de un modelo simplificado de péndulo, en el que se considera que el ángulo de oscilación β es casi cero, es decir que la carga suspendida 1 no se balancea (o casi no lo hace) con respecto al carro 5.

Ventajosamente, esto significa, recíprocamente, que una instrucción de ejecución V_{trol} desarrollada a partir de este modelo es tal que, si dicha instrucción de ejecución es realmente ejecutada fielmente por los motores de accionamiento 7, 8, y por lo tanto por el carro 5, dicha instrucción de ejecución V_{trol} no puede, por sí misma, provocar oscilaciones.

35 La figura 7 muestra una instrucción de ejecución V_{trol} obtenida así aplicando la fórmula de conversión a una instrucción de control filtrada V_f emitida de una instrucción de control V_u de tipo escalonado.

40 La conversión de la instrucción filtrada V_f en instrucción de ejecución V_{trol} puede realizarse por cualquier módulo de conversión apropiado (calculador) 13 apropiado, del tipo de circuito electrónico o módulo programado por ordenador.

45 También se observará que la determinación de la instrucción de ejecución V_{trol} según la invención puede llevarse a cabo ventajosamente sin que sea necesario conocer, y *a fortiori* sin que sea necesario medir, la masa M de la carga suspendida 1, en la medida en que este parámetro (la masa M de la carga 1) no interviene en las fórmulas utilizadas durante el paso (b) del tratamiento, y en particular no interviene en la definición del filtro de tercer orden F3 o en la fórmula de conversión mencionada anteriormente.

50 Por lo tanto, es posible economizar una medición de la masa M de la carga suspendida 1 o de un tratamiento de este parámetro de masa M , lo que de nuevo hace posible simplificar la estructura de la máquina elevadora 2, y simplificar y acelerar la ejecución del procedimiento.

Ventajosamente, los efectos antioscilación intrínsecamente proporcionados por un lado por la regularización C^3 como tal, y por otro lado por el uso de una fórmula de conversión sin oscilaciones, se combinarán para ofrecer un servocontrol optimizado del movimiento de la carga suspendida 1, totalmente desprovisto de oscilaciones.

55 Dada la capacidad del procedimiento para generar una instrucción de ejecución que no cause oscilaciones, podemos, de manera particularmente preferible, implementar el servocontrol según la invención en bucle abierto.

60 Por lo tanto, será posible en particular controlar el equipo de elevación 2, y más particularmente los movimientos del carro 5 (aquí típicamente en orientación Θ y distribución R), aplicando "ciegamente" la instrucción de ejecución (aquí preferiblemente un conjunto velocidad) V_{trol} al motor o motores de accionamiento 7, 8, sin proporcionar un servocontrol que apunte a reducir el balanceo real que podría resultar de la aplicación de esta instrucción de ejecución o incluso que resultaría de perturbaciones externas.

En particular, será posible conducir el equipo de elevación 2 sin tener que usar una retroalimentación (“feedback”) medida o calculada del ángulo de oscilación real (real) de la carga suspendida 1, o del retorno medido o calculado de la velocidad angular de la oscilación efectiva de dicha carga suspendida 1 y, preferiblemente, sin tener que usar un retorno medido de la velocidad efectiva (real) del desplazamiento del punto de unión H.

Al utilizar el procedimiento según la invención en un bucle abierto, es por lo tanto ventajosamente posible obtener un excelente control del desplazamiento de la carga suspendida 1, y más particularmente ofrecer al operador de la máquina excelentes posibilidades de control manual del desplazamiento de la carga suspendida, mediante un procedimiento que combina simplicidad y velocidad de ejecución, al tiempo que simplifica la estructura del equipo de elevación 2, incluido el ahorro de sensores para medir la oscilación.

Sin embargo, el procedimiento según la invención sigue siendo perfectamente compatible, como una realización alternativa, con un servocontrol de circuito cerrado, según el cual la instrucción de ejecución V_{trol} se determina primero según la invención, en particular se aplica el filtrado de tercer orden, y luego dicha instrucción de ejecución de V_{trol} se aplica a los motores de accionamiento 7, 8 al tiempo que se prevé un servocontrol de bucle cerrado (como se describe anteriormente) para reducir activamente un posible balanceo, por si acaso apareciera una oscilación a pesar de todo, provocada por perturbaciones externas al sistema de control, como ráfagas de viento, por ejemplo.

Ventajosamente, según una realización alternativa de este tipo, la determinación de la instrucción de ejecución V_{trol} según la invención, con la regularización C^3 , por un lado, y el uso de la fórmula de conversión antioscilación mencionada anteriormente, por otro lado, sin embargo, será posible generar una instrucción de ejecución (referencia de velocidad del carro) V_{trol} ya optimizada, que no genere oscilaciones (intrínsecamente), de modo que la tarea de compensación de la oscilación asignada al bucle cerrado del servocontrol se simplificará enormemente (ya que esto solo reducirá la posible oscilación causada por las únicas alteraciones externas al sistema de control).

También se recordará que los motores de accionamiento 7, 8 tienen, por su naturaleza, capacidades limitadas (finitas) de velocidad, aceleración y par.

Por lo tanto, es necesario que la instrucción de ejecución V_{trol} sea compatible con estas capacidades, de modo que los motores 7, 8 puedan ejecutar dicha instrucción de ejecución V_{trol} , y así generar, como resultado de la aplicación de dicha instrucción de ejecución V_{trol} a dichos motores 7, 8, movimientos del carro 5 y de la carga suspendida 1 sin oscilación, que sean conformes con los movimientos que se esperan con respecto a dicha instrucción de ejecución.

En otras palabras, es necesario procurar generar una instrucción de ejecución V_{trol} que sea factible, es decir, coherente y compatible con las capacidades de hardware reales de los motores de accionamiento 7, 8, de forma que no se intente solicitar el sistema de control más allá de sus capacidades, y para evitar cualquier situación en la que una deficiencia de un motor 7, 8 haga que el movimiento real difiera del movimiento ideal esperado, y cause, por ejemplo, la aparición o la acentuación de una oscilación.

Finalmente, con respecto a los criterios de estabilidad, velocidad de convergencia y cumplimiento de las capacidades de hardware de los motores de accionamiento 7, 8, se puede considerar que, en general, la instrucción de control filtrada (instrucción de control filtrada) V_f debe cumplir (simultáneamente) cuatro restricciones acumulativas:

- Restricción n.º 1: la instrucción de velocidad filtrada $V_f(t)$ debe ser tres veces derivable, y más particularmente de la clase C^3 ;

- Restricción n.º 2: el valor de la instrucción de velocidad filtrada V_f debe converger lo más rápidamente posible con la instrucción de control V_U (típicamente en respuesta a una instrucción de control V_U que forma un nivel constante);

- Restricción n.º 3: la aceleración del carro 5 nunca debe exceder la capacidad de aceleración intrínseca máxima del motor de accionamiento 7, 8 correspondiente, es decir que la tiene de manera permanente:

$$|\dot{V}_{trol}| \leq a_{MAX}$$

Es decir

$$|\dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f| \leq a_{MAX}$$

donde a_{MAX} es un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede dar al punto de unión H al que se suspende la carga 1 (es decir, aquí al carro 5);

- Restricción n.º 4: la referencia de velocidad del camión (instrucción de ejecución) V_{trol} nunca debe exceder la

velocidad máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede dar al carro 5, es decir que la tiene de manera permanente: $| \leq V_{MAX}$ es decir:

$$|V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f| \leq V_{MAX}$$

5 donde V_{MAX} es un valor representativo de la velocidad máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede dar al punto de unión H al que se suspende la carga 1 (es decir, aquí al carro 5).

10 La regularización C^3 , y más particularmente la aplicación del filtro de tercer orden F3, hace posible satisfacer la restricción n.º 1 (instrucción tres veces derivable, y más particularmente de la clase C^3).

15 La restricción n.º 2 (convergencia rápida) puede satisfacerse seleccionando adecuadamente los coeficientes c_1 , c_2 de dicho filtro de tercer orden F3, como se indicó anteriormente, y en segundo lugar adaptando la pulsación ω de dicho filtro de tercer orden F3, dependiendo de las circunstancias, como se detallará a continuación.

Finalmente podemos satisfacer las restricciones n.º 3 (límite de aceleración) y n.º 4 (límite de velocidad), es decir, asegurar que la instrucción de ejecución (instrucción de velocidad del carro) V_{trol} es factible, aplicando las funciones de saturación SAT1, SAT2, SAT3 apropiadas, que se detallarán a continuación.

20 Por lo tanto, según una característica preferida que puede constituir una invención completamente separada, durante la subetapa (b4) de regularización C^3 , es posible utilizar, para generar la instrucción de control filtrada V_f , un parámetro que es representativo de la aceleración máxima a_{MAX} que el motor de accionamiento 7, 8 puede proporcionar al punto de unión H al que se suspende la carga 1, de modo que la instrucción de ejecución V_{trol} que se deriva de dicha instrucción de control filtrada V_f depende de dicha aceleración máxima a fin de que sea factible por dicho motor de
25 accionamiento 7,8.

Más particularmente, dicho parámetro elegido como representativo de la aceleración máxima a_{MAX} admisible por el motor de accionamiento 7, 8 puede ser la pulsación ω del filtro de tercer orden F3, en la forma de un pulso denominado "pulsación calculada" ω_0 que se determinará en particular según dicho valor máximo de aceleración permitido en a_{MAX} .

30 Los inventores han establecido que existe un vínculo entre la pulsación y la aceleración máxima.

$$\dot{V}_{trol} = \dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

De hecho, hemos visto que la aceleración del carro vale

35 Supongamos que aplicamos en el tiempo $t = 0$ (momento inicial), a una carga suspendida 1 en reposo, es decir, a un sistema inicialmente en equilibrio, una instrucción V_u de tipo escalonado.

40 Al estar el sistema inicialmente en equilibrio, se puede considerar que la aceleración de la carga suspendida 1 es inicialmente cero, es decir que tenemos, en el tiempo $t = 0$: $V_f(0) \approx 0$, debido a la inercia, mientras que la aceleración V_{trol}

del carro 5 es máxima al mismo tiempo $t = 0$, y es entonces

$$\frac{L}{g} \ddot{V}_f(0) = \frac{L}{g} \omega^3 V_u$$

45 La restricción n.º 3 (límite de aceleración) por lo tanto impone:

$$\frac{L}{g} \omega^3 V_u \leq a_{MAX} \quad \text{es decir:} \quad \omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_u \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

50 Por lo tanto, la etapa de procesamiento (b) puede comprender preferiblemente una subetapa (b1) para ajustar la pulsación del filtro de tercer orden F3, durante el cual se calcula la pulsación ω , ω_0 de dicho filtro de tercer orden F3 a partir de un valor a_{MAX} que es representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H al que se suspende la carga 1.

55 Además, y en la medida en que la ecuación anterior también muestra, como consecuencia de la restricción n.º 3 (límite de aceleración), un enlace entre la pulsación ω y la referencia de velocidad V_u , la etapa (b) de procesamiento incluye preferiblemente una subetapa (b1) de ajuste de la frecuencia angular ω del filtro de tercer orden F3, durante la cual se adapta la pulsación ω del filtro de tercer orden, y más particularmente la pulsación calculada ω_0 , dependiendo del valor de la instrucción de control V_u , V_{JOY} aplicada por el conductor del equipo de elevación en el momento t considerado.

Más preferiblemente, el valor de la pulsación ω del filtro de tercer orden F3 se modifica según si la instrucción de control V_u , V_{JOY} es inferior o por el contrario superior a una velocidad de referencia V_{thresh} que se define a partir del valor de velocidad máxima V_{MAX} que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H al que se suspende la carga 1.

En la práctica, la pulsación ω variará para aumentar dicha pulsación ω y, por lo tanto, utilizar una pulsación considerada como alta, llamada "valor alto" ω_{high} , y, por lo tanto, un filtro más reactivo F3, cuando el valor absoluto de la instrucción de control (es decir, la amplitud de la referencia de velocidad) V_u , V_{JOY} es baja en comparación con la velocidad máxima permitida V_{MAX} y, por el contrario, disminuye dicha pulsación ω a favor de una pulsación más baja llamada "valor bajo" ω_{low} , cuando el valor absoluto de la instrucción de control V_u , V_{JOY} aumentará para acercarse a la velocidad máxima permitida V_{MAX} .

En particular, cuando la referencia de velocidad corresponde a la velocidad máxima permitida: $V_u = V_{MAX}$, la restricción n.º 3 (límite de aceleración) se impondrá efectivamente:

$$\omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

En la práctica, en vista de lo anterior, y como se ilustra en la figura 3, por lo tanto, será posible, por ejemplo, calcular la pulsación ω del filtro de tercer orden F3, durante la subetapa (b1) de ajuste de la pulsación del filtro de tercer orden, a partir de un pulso calculado ω_0 determinado de la siguiente manera:

se elige $V_{thresh} = k \times V_{MAX}$, con $0 < k < 1$, por ejemplo $k = 0,5$;

si $V_u \leq V_{thresh}$, entonces se define la pulsación calculada ω_0 como

$$\omega_0 = \omega_{high} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{thresh} \times L} \right)^{\frac{1}{3}},$$

que forma aquí un valor alto;

si $V_u > V_{thresh}$, entonces se define la pulsación calculada ω_0 como

$$\omega_0 = \omega_{low} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}},$$

que forma aquí un valor bajo, ya que $V_{MAX} > V_{thresh}$, aunque $\omega_{low} < \omega_{high}$; con

V_u la instrucción de control (aquí igual a la instrucción de control sin procesar V_{JOY}), k un factor de ajuste seleccionado, entre 0 y 1,

L la longitud del cable de suspensión 6 que conecta la carga suspendida 1 al punto de unión H,

g la gravedad (aceleración gravitacional),

V_{MAX} un valor arbitrario (de ajuste) que se considera representativo de la velocidad máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H al que se suspende la carga 1; en la práctica, V_{MAX} se elegirá arbitrariamente según las características del equipo de elevación 2, la carga 1 prevista y el motor de accionamiento 7, 8 en cuestión, y puede ser, por ejemplo, igual al valor de velocidad efectivo máximo que el motor de accionamiento 7, 8 es realmente capaz, según las pruebas, de conferir al carro 5, o, preferiblemente, ser igual a una fracción (estrictamente inferior al 100 %, pero no cero) de este valor de velocidad efectiva máxima;

a_{MAX} un valor arbitrario (de ajuste) que se considera representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H al que se suspende la carga 1; a_{MAX} podría, por ejemplo, ser igual al valor efectivo máximo de aceleración del motor, determinado por las pruebas, o, preferiblemente, ser igual a una fracción (estrictamente inferior al 100 %, pero no cero) de este valor efectivo máximo aceleración.

El doble propósito de esta adaptación (en tiempo real) de la pulsación ω es optimizar la reactividad del filtro de tercer orden 3 (restricción n.º 2) aumentando dicha pulsación ω cuando sea posible, porque el tiempo de respuesta del filtro

F3 es inversamente proporcional a dicha pulsación ω (con los coeficientes c_1, c_2 elegidos como se indicó anteriormente, el tiempo de respuesta al 5 % es del orden de $4/\omega$), respetando la restricción n.º 3 relacionada sin exceder la capacidad de aceleración máxima del motor de accionamiento 7, 8, que establece un límite superior permitido para dicha pulsación ω .

Se observará, además, que cualquiera que sea la ley adoptada para determinar la pulsación ω , el uso de una pulsación ajustable permite ajustar dinámicamente el filtro de tercer orden F3, e integrarse directa e intrínsecamente dentro de dicho filtro F3, de manera particularmente simple, una parte de las restricciones relacionadas en particular con las capacidades materiales de velocidad y aceleración de los motores de accionamiento 7, 8.

El ajuste de la pulsación ω del filtro de tercer orden F3 puede lograrse mediante cualquier módulo 14 de ajuste de pulsación apropiado, formando un ordenador que comprende, por ejemplo, un circuito electrónico o un programa informático adecuado.

Además, los inventores han descubierto empíricamente que, para evitar la desestabilización del filtro de tercer orden F3, especialmente durante las transiciones entre el valor alto ω_{high} y el valor bajo ω_{low} , la pulsación (calculado) ω, ω_0 debe ser dos veces derivable (en relación con el tiempo).

Como tal, los inventores han descubierto que era deseable suavizar la pulsación (calculada) ω, ω_0 , en particular para asegurar que su evolución a lo largo del tiempo, y en particular las transiciones de valor alto ω_{high} valor bajo ω_{low} mencionadas anteriormente, son continuas y dos veces derivables.

Por lo tanto, según una característica preferida que puede constituir una invención completa, durante la subetapa (b1) de ajustar la pulsación ω del filtro de tercer orden F3, se aplica durante la determinación de la pulsación ω y, más particularmente, se aplica a la pulsación calculada ω_0 , un filtro de segundo orden F2, de modo que el filtro de tercer orden F3 usa como pulsación ω una pulsación calculada filtrada ω_F .

Dicha pulsación calculada filtrada ω_F se define de manera preferente como:

$$\omega_F(p) = \frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_X} + \frac{p^2}{\omega_X^2}} \omega_0(p)$$

con:

ω_0 la pulsación calculada (también llamada "pulsación objetivo"), obtenida como se indicó anteriormente, antes del filtrado de segundo orden F2,

ω_X la pulsación adecuada del filtro de segundo orden F2, por ejemplo igual a 4 rad/s,

m el coeficiente de amortiguamiento del filtro de segundo orden F2, preferiblemente igual a 0,7 (esta elección de valor permite obtener un buen compromiso entre un tiempo de respuesta bajo y un desbordamiento del filtro de segundo orden limitado).

Por otro lado, se verá que si la pulsación ω del filtro de tercer orden F3, y más particularmente la pulsación filtrada $\omega = \omega_F$ de dicho filtro de tercer orden F3, calculada como se describe anteriormente, varía continuamente (es decir, regularmente, sin discontinuidad en el sentido matemático del término) para converger hacia la pulsación objetivo calculada ω_0 , y más particularmente para cambiar continuamente del valor alto ω_{high} al valor ω_{low} o viceversa,

entonces, en términos absolutos, puede haber situaciones en las que la desigualdad

$$\frac{L}{g} \omega^3 V_u \leq a_{MAX}, \quad \omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_u \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

es decir

que resulta de la restricción n.º 3 (capacidad limitada de aceleración) podría infringirse temporalmente.

De hecho, supongamos, por ejemplo, que inicialmente estamos en una situación en la que el conductor de la máquina no solicita poco o ningún movimiento de la carga suspendida 1, de modo que la instrucción de control (en velocidad) V_u es baja o cero, por lo que está por debajo de la velocidad de referencia: $V_u < V_{thresh}$, por ejemplo con $V_u = 0$ m/s.

La pulsación ω, ω_F del filtro de tercer orden F3 es entonces cercana o incluso igual a su valor alto ω_{high} .

Supongamos ahora que el conductor de la máquina aplica repentinamente una instrucción de velocidad V_u de gran amplitud, mayor que la velocidad de referencia V_{thresh} y, por ejemplo, cerca de la velocidad máxima permitida: $V_u = V_{MAX}$. En la práctica, esto equivale a aplicar al sistema de conducción un paso según el cual el conductor hace pasar casi instantáneamente la instrucción de control V_u desde su valor bajo inicial, o incluso cero (típicamente 0 m/s) hasta un valor alto, típicamente V_{MAX} .

Dado que la instrucción $V_u = V_{MAX}$ ahora supera la velocidad de referencia $V_{threshold}$, el ajuste automático de la pulsación del filtro de tercer orden, según la subetapa (b1), redefine el valor de pulsación objetivo ω_0 , y lo baja para fijarla al valor bajo: $\omega_0 = \omega_{low}$.

Sin embargo, debido al filtrado de segundo orden F2 que se aplica para obtener la pulsación filtrada ω_F , tal como la usa realmente el filtro de tercer orden F3, la transición de dicha pulsación filtrada ω_F desde su valor alto ω_{high} inicial a su (nuevo) valor objetivo bajo $\omega_0 = \omega_{low}$ no es instantánea, sino, por el contrario, relativamente progresiva, ya que dicha transición (en este caso, la disminución) de la pulsación, es decir la convergencia de la pulsación filtrada ω_F hacia el valor bajo ω_{low} puede tener lugar más lentamente que el cambio (aquí el aumento) de la instrucción de control V_u , es decir más lentamente que la convergencia de la instrucción de control V_u a su valor alto V_{MAX} .

Por lo tanto, se entenderá que, durante el corto tiempo requerido para adaptar la pulsación ω , ω_F del filtro de tercer orden F3 a la nueva instrucción de control V_u , por lo tanto, es posible encontrarse temporalmente en una situación en la que coexiste una instrucción de control cerca de su valor alto (V_u es sustancialmente igual a V_{MAX}) y una pulsación ω , ω_F también cerca de su valor alto ω_{high} , porque dicha pulsación "tarda" en disminuir para alcanzar su valor bajo ω_{low} .

En tal caso, la aceleración solicitada del carro 5 sería de manera provisional sustancialmente igual a

$$\frac{L}{g} \omega_{high}^3 V_{MAX},$$

y, por lo tanto, podría exceder temporalmente la capacidad máxima de aceleración

$$a_{MAX} = \frac{L}{g} \omega_{low}^3 V_{MAX}$$

del motor 7, 8, ya que $\omega_{high} > \omega_{low}$.

Por este motivo, para evitar tal situación, y más específicamente para asegurar que la desigualdad (impuesta por la restricción n.º 3) se satisfaga permanentemente:

$$|V_u| \leq \frac{g}{L\omega^3} a_{MAX},$$

la etapa (b) de tratamiento comprende preferiblemente, según una característica que puede constituir una invención completa, una subetapa (b2) de saturación preliminar, durante la cual se aplica la instrucción de control V_u , V_{JOY} una primera ley de saturación SAT1 que se calcula en función de la pulsación ω , ω_F del filtro de tercer orden F3 (es decir, en función del valor instantáneo tomado por la pulsación ω , ω_F del filtro del tercer orden en el momento considerado).

Como se ilustra en particular en las figuras 3 y 4, esta primera ley de saturación SAT1 puede implementarse mediante un primer módulo de saturación adecuado 15, formando un ordenador que comprende, por ejemplo, un circuito electrónico o un programa informático adecuado.

Preferiblemente, la primera ley de saturación SAT1 se expresará mediante:

$$SAT1 (V_u) = V_u \text{ si } -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \leq V_u \leq \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1 (V_u) = -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u < -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1 (V_u) = +\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u > \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

con

- 5 V_u la instrucción de control (aquí igual a la instrucción de control sin procesar V_{JOY}),
 ω_F la pulsación (y más particularmente la pulsación filtrada) del filtro de tercer orden F3,
 L la longitud del cable de suspensión 6,
 10 g la gravedad y

15 a_{MAX} representa un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H en el que se suspende la carga 1 (dicho valor de aceleración máxima se define preferiblemente como se indicó anteriormente).

20 Preferiblemente, como se ilustra en las figuras 3 y 4, la primera ley de saturación SAT1 se aplica a la instrucción en bruto (en velocidad) V_{JOY} , antes del filtro de tercer orden F3, para formar (en la salida del primer módulo de saturación 15) la instrucción de control V_u que luego se envía al filtro de tercer orden F3.

Además, en ciertas situaciones, cuando la longitud L del cable de suspensión 6 es grande, la instrucción de ejecución V_{trol} y, por lo tanto, la velocidad del carro 5, que viene dada por la fórmula de conversión

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f,$$

25 puede exceder la velocidad máxima permitida V_{MAX} , es decir infringir la restricción n.º 4 (que plantea: $|V_{trol}| \leq V_{MAX}$), en concreto la instrucción de control V_u , y, por lo tanto, la instrucción de control filtrada V_f que resulta de ello, se somete a variaciones rápidas, cercanas en el tiempo, y de amplia amplitud.

30 La solución propuesta por los inventores consiste en limitar la instrucción de ejecución V_{trol} cuando alcanza un límite permitido predefinido (típicamente $\pm V_{MAX}$), saturando adecuadamente la instrucción de control V_u .

35 El principio es volver a calcular la instrucción de control V_u cuando la instrucción de ejecución (y, por lo tanto, la velocidad del carro 5) V_{trol} alcanza la velocidad máxima permitida V_{MAX} , de modo que el valor absoluto de dicha instrucción de ejecución $|V_{trol}|$ permanece (como máximo) constante, incluso disminuye; en otras palabras, la instrucción de control V_u se modifica para limitar la instrucción de control V_{trol} a su valor máximo permitido V_{MAX} .

40 Por este motivo, la etapa (b) de procesamiento comprende preferiblemente un subpaso (b3) de saturación secundaria, que está destinado a mantener la instrucción de ejecución (es decir, la instrucción de velocidad del punto de conexión H) V_{trol} cuando dicha instrucción de ejecución V_{trol} alcanza sustancialmente la velocidad máxima V_{MAX} que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de conexión H (es decir, en la práctica al carro 5).

Matemáticamente, si queremos mantener la instrucción de ejecución V_{trol} constante, esto equivale a plantear V_{trol}

45 $= 0$, entonces $0 = \dot{V}_{trol} = \dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$, y por lo tanto $\ddot{V}_f = -\frac{g}{L} \dot{V}_f$.

Dado que, en aplicación del filtro de tercer orden F3, tenemos:

$$V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f + \frac{1}{\omega_F^3} \ddot{\ddot{V}}_f = V_u$$

$$\ddot{\ddot{V}}_f = \omega_F^3 (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

entonces

$$\dot{V}_{trol} = 0 \Leftrightarrow V_u = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

entonces

el segundo miembro de la

5 última ecuación se observa, por conveniencia,

$$E(t) : E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

10 Como se indicó anteriormente, se busca mantener la instrucción de ejecución V_{trol} constante o disminuirla cuando alcanza la velocidad máxima permitida V_{max} . Además, en la práctica, si la instrucción de control V_u es pequeña, esto indica en principio que se busca una velocidad de carro, por lo tanto, una instrucción de control V_{trol} baja, es decir que entonces no hay razón para mantener dicha instrucción de ejecución V_{trol} constante en su valor máximo V_{MAX} , sino más bien para disminuirla.

15 Por lo tanto, durante la subetapa (b3) de saturación secundaria, así aplicada preferentemente a la instrucción de control V_u , según una característica que puede constituir una invención en sí misma, una segunda ley de saturación SAT2 que se expresa por:

$$SAT2 (V_u) = MIN(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} > 0$$

20

y

$$SAT2 (V_u) = MAX(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} < 0,$$

25 con:

V_u la instrucción de control (que se deriva preferiblemente del primer módulo de saturación 15, después de haber experimentado la primera ley de saturación SAT1, como se indica en la figura 4),

30 V_{trol} la instrucción de ejecución (velocidad del carro), estimada aquí por la fórmula de conversión:

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

V_f la instrucción de control filtrada emitida por el filtro de tercer orden F3,

$$E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

35

y

con

c_1, c_2 los coeficientes, respectivamente del primer orden y del segundo orden, utilizados por dicho filtro de tercer orden F3 (típicamente, tendrá $c_1 = 2,15$ y $c_2 = 1,75$),

40

ω_F la pulsación (aquí más particularmente la pulsación filtrada) del filtro de tercer orden F3,

L la longitud del cable de suspensión 6 que conecta la carga suspendida 1 al punto de unión H, g la gravedad.

45 Como se ilustra en particular en la figura 4, esta segunda ley de saturación SAT2 puede implementarse mediante un segundo módulo de saturación adecuado 16, formando un ordenador que comprende, por ejemplo, un circuito electrónico o un programa informático adecuado.

Se observará que, en aras de la estabilidad, la activación y desactivación de esta segunda ley de saturación SAT2, en

las proximidades de la velocidad máxima permitida V_{MAX} , puede efectuarse preferiblemente mediante conmutación por histéresis.

5 Más particularmente, siendo la segunda ley de saturación SAT2 inicialmente inactiva, se activará cuando la instrucción de ejecución V_{troi} alcance y supere un umbral de activación, ligeramente superior a V_{MAX} , y por ejemplo se establezca en $1,04 \cdot V_{MAX}$ (lo que refuerza el interés de elegir V_{MAX} ligeramente por debajo del límite de velocidad física real del motor de accionamiento 7, 8 en cuestión, típicamente entre 95 % y 98 % de dicho límite físico), y ser nuevamente desactivado cuando la instrucción de ejecución V_{troi} cae por debajo de un umbral de extinción estrictamente por debajo del umbral establecido, y equivalente, por ejemplo, a $1,01 \cdot V_{MAX}$.

10 Además, los inventores han descubierto que, incluso si la implementación de la primera ley de saturación SAT1 descrita anteriormente en general permite satisfacer la restricción n.º 3 (la aceleración del carro tiene que permanecer por debajo de la aceleración máxima admisible a_{MAX}), algunas combinaciones muy particulares de instrucciones de control aún podrían tomar esta restricción n.º 3 por defecto.

15 Sin embargo, como se indicó anteriormente, la aplicación de una instrucción de ejecución rendimiento V_{troi} que no respeta los límites materiales, en particular la capacidad de aceleración de los motores de accionamiento 7, 8, podría conducir a la ejecución de un movimiento que no está según el movimiento esperado y, en consecuencia, podría dar lugar a una oscilación.

20 Esta es particularmente la razón por la cual, para asegurar el movimiento de la carga suspendida 1 y garantizar el control y la precisión de dicho movimiento, la etapa (b) de tratamiento comprende preferiblemente, según una característica que puede constituir una invención por derecho propio pero que preferiblemente se implementará además de la primera ley de saturación SAT1, un subpaso (b5) de saturación de la tercera derivada de la instrucción

25 de control filtrada durante el cual se aplica la tercera derivada (temporal) \ddot{V}_f de la instrucción de control filtrada V_f una tercera ley de saturación SAT3 cuyos umbrales de saturación dependen de la aceleración máxima a_{MAX} (típicamente como se definió anteriormente) que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H en el que se suspende la carga 1.

30 La implementación de esta tercera ley de saturación SAT3 puede agregar ventajosamente una precaución adicional a la provista por la primera ley de saturación SAT1, para optimizar la seguridad del control de bucle abierto según la invención.

35 Más preferiblemente, la tercera ley de saturación SAT3 se puede expresar por:

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \omega_F^3 \times (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

$$\text{si } \frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX}) \leq \ddot{V}_f \leq \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX}),$$

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f < \frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX})$$

y

$$40 \quad SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f > \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX})$$

con:

45 V_f la instrucción de control filtrada emitida por el filtro de tercer orden F3,

ω_F la pulsación (aquí más particularmente la pulsación filtrada) del filtro de tercer orden F3, c_1 , c_2 los coeficientes, respectivamente del primer orden y del segundo orden, utilizados por el filtro de tercer orden F3, L la longitud del cable suspensión 6 que conecta la carga suspendida 1 al punto de unión H, la gravedad y

50 a_{MAX} un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento 7, 8 puede conferir al punto de unión H en el que se suspende la carga 1, dicho valor de aceleración máxima se define preferiblemente como se indicó anteriormente.

Como se ilustra en particular en la figura 4, esta tercera ley de saturación SAT3 puede implementarse mediante un tercer módulo de saturación adecuado 17, formando un ordenador que comprende, por ejemplo, un circuito electrónico o un programa informático adecuado.

5 Se observará que, ventajosamente, el razonamiento y las ecuaciones propuestas anteriormente son aplicables si consideramos la situación real, en tres dimensiones.

De hecho, si consideramos la grúa en un sistema de coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z), donde Z representa el eje vertical, aquí confundido con el mástil 3, siempre podemos escribir la ley de Newton:

10
$$M\vec{a}_{load} = \vec{T} + M\vec{g}$$

Suponiendo los pequeños ángulos colgantes, se proyectan respectivamente el eje X y el eje Y:

15
$$\frac{P_{trol}^X - P_{load}^X}{L} = \frac{a_X}{g - a_z} \quad \frac{P_{trol}^Y - P_{load}^Y}{L} = \frac{a_Y}{g - a_z}$$

con a_x , a_y y a_z los componentes L $g - a_z$ L $g - a_z$ respectivos en X, en Y en Z de la aceleración de la carga suspendida 1.

Según una primera posibilidad de implementar el procedimiento según la invención, en términos absolutos, sería posible mantener, para el cálculo de la instrucción de ejecución V_{trol} , y más particularmente para el cálculo de los componentes cartesianos V_{trol}^X y V_{trol}^Y dicha instrucción de ejecución, expresiones que muestran la aceleración vertical a_z de la carga suspendida 1, para compensar también los posibles efectos de dicha aceleración vertical de la carga suspendida 1 en la generación de oscilaciones.

25 Sin embargo, según una segunda realización preferida del procedimiento según la invención, será posible en la práctica considerar, a través de una hipótesis simplificadora, que la aceleración de la carga suspendida a_z es insignificante con respecto a la gravedad g .

Al simplificar las expresiones anteriores en consecuencia, encontramos:

30
$$\frac{P_{trol}^X - P_{load}^X}{L} \approx \frac{a_X}{g} \quad \text{et} \quad \frac{P_{trol}^Y - P_{load}^Y}{L} \approx \frac{a_Y}{g}$$

Derivando (diferenciando) estas expresiones con respecto al tiempo, y considerando, para una simplificación realista, que la velocidad de variación dL/dt de la longitud L del cable de suspensión 6 es insignificante, obtenemos:

35
$$V_{trol}^X = V_{load}^X + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}^X \quad \text{et} \quad V_{trol}^Y = V_{load}^Y + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}^Y$$

Además, se observará que el procedimiento según la invención es particularmente versátil ya que puede aplicarse a cualquier tipo de equipo de elevación 2, cualquiera que sea la configuración de dicho equipo de elevación 2, en la medida en que dicho procedimiento lo permita ventajosamente en cualquier caso, para calcular la instrucción de ejecución V_{trol} de una manera simple en un sistema de coordenadas cartesianas, independientemente del sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico) específico del equipo de elevación 2, en el que en primer lugar se expresa la instrucción de ejecución V_u , V_{JOY} cuando es fijada por el conductor de la máquina, luego en la cual la instrucción de ejecución V_{trol} debe expresarse para que dicha instrucción de ejecución pueda aplicarse correctamente a motores de accionamiento 7, 8 en cuestión.

De hecho, es suficiente, en primer lugar, convertir en coordenadas cartesianas, por medio de una matriz de transformación geométrica (del tipo de matriz de rotación), característica del mecanismo de elevación 2 utilizado, y que se anotará $R\theta$, los componentes de la instrucción de control V_u , V_{JOY} expresados inicialmente en el sistema de coordenadas específico del equipo de elevación 2, después de calcular la instrucción de ejecución V_{trol} en dicho sistema de coordenadas cartesianas y finalmente se vuelve a convertir mediante una matriz de transformación inversa, que se denominará $R-\theta$, los componentes cartesianos de dicha instrucción de ejecución V_{trol} en componentes expresados en el sistema de coordenadas específico del equipo de elevación 2, aplicables a motores de accionamiento 7, 8 que gestionan respectivamente el desplazamiento de dicha máquina 2 (y más particularmente del carro 5) según cada uno de dichos componentes.

55

Por lo tanto, en el caso de un equipo de elevación 2 formado por una grúa de brazo horizontal (grúa torre con una pluma horizontal), el sistema de coordenadas más apropiado de la máquina 2 será un sistema de coordenadas cilíndricas en el que la posición del objeto en consideración se indica mediante un radio r (a lo largo de la pluma) y un ángulo de acimut θ (ángulo de encaje alrededor del eje de orientación), como se muestra en las figuras 1 y 5.

El control de la grúa se lleva a cabo, de manera bastante intuitiva para el conductor, en distribución (modificación del radio r) y en orientación (modificación del acimut θ), la instrucción de control V_u , V_{JOY} , así como la instrucción de ejecución V_{trol} , comprenderá cada una un componente de distribución, destinado a la distribución del motor 7 (que permite actuar sobre el radio) y un componente de orientación, para la orientación del motor 8 (que permite actuar sobre el acimut).

La primera conversión (de la instrucción de control V_u , V_{JOY}) del sistema cilíndrico al sistema cartesiano se puede realizar por medio de una matriz de rotación $R\theta$, mientras que la segunda conversión (de la instrucción de control V_{trol}) del sistema cartesiano al sistema cilíndrico se puede operar por medio de una matriz de rotación inversa $R-\theta$.

De manera similar, en el caso de un equipo de elevación 2 formado por una grúa de pluma abatible, el sistema de coordenadas más apropiado será el sistema de coordenadas esféricas, en el que la posición del carro 5 es ubicada (y se acciona) por su acimut (orientación de la pluma abatible en guiñada), su declinación (orientación de la pluma abatible en cabeceo) y por su radio (distancia desde el carro con respecto a la base articulada de la pluma abatible).

Una vez más, las conversiones hacia y desde el sistema cartesiano se realizarán mediante matrices de transformación geométrica apropiadas, para poder gestionar el motor impulsor de acimut (guiñada) de la pluma, el motor impulsor de declinación (inclinación) de la pluma y el motor de accionamiento en el radio (traducción a lo largo de la pluma).

En el caso de un equipo de elevación 2 del tipo de grúa móvil, diseñado para realizar movimientos lineales de traslación a lo largo de un eje (X), o a lo largo de dos ejes perpendiculares entre sí (X e Y), la instrucción de control puede expresarse directamente en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y) y, por lo tanto, no requerirá ninguna conversión de coordenadas.

En la práctica, y como se ilustra en la figura 6, el procedimiento según la invención puede comprender sucesivamente las siguientes operaciones:

- la posición de la carga suspendida 1 se da en un sistema de coordenadas adaptado al equipo de elevación 2, aquí preferiblemente en coordenadas cilíndricas: r_{load} , θ_{load} ;

- la instrucción de control (sin procesar) V_{JOY} es expresada por el conductor del vehículo (a través de la palanca de mando 11) en forma de una instrucción de velocidad de carga suspendida V_{load} , cuyos componentes corresponden al sistema de coordenadas considerado; aquí, dicha instrucción de velocidad de carga suspendida V_{load} comprende (se descompone en) un componente de velocidad de carga radial deseada V_{load}^r y un componente de velocidad de carga angular deseada V_{load}^θ ;

- los componentes de la instrucción de velocidad de carga suspendida V_{load} son entonces regularizados C^3 , y más específicamente se filtran para este propósito por el filtro de tercer orden F3;

- por lo tanto, el primer componente de la instrucción de velocidad de la carga suspendida, aquí el componente de velocidad de la carga radial deseada V_{load}^r es regularizado C^3 , y más particularmente es filtrado por el filtro de tercer orden F3 (módulo de filtro 12) para obtener una instrucción de velocidad de carga radial filtrada V_{load}^{rf} (es decir, el primer componente de la instrucción de control filtrada V_f);

- de manera similar, el segundo componente de la instrucción de velocidad de la carga suspendida, aquí el componente de velocidad de carga angular deseada V_{load}^θ es regularizado C^3 , y más particularmente es filtrado por el filtro de tercer orden F3 (módulo de filtrado 12), para obtener una instrucción de velocidad de carga angular filtrada; a continuación, se multiplica por el radio r_{load} , que corresponde a la distancia a la cual se encuentra la carga suspendida 1 desde el eje vertical de rotación (ZZ'), para obtener una instrucción de velocidad tangencial filtrada (ortorradiar) filtrada $V_{load}^{\theta f}$ (es decir, el segundo componente de la instrucción de control filtrada V_f);

- la instrucción de velocidad de carga filtrada (instrucción de control filtrada V_f), cuyos componentes, aquí radiales y tangenciales ahora se conocen, se expresa en un marco cartesiano aplicando una matriz de transformación geométrica, aquí la matriz de rotación $R_{\theta_{load}}$ que corresponde a la posición angular en guiñada θ_{load} de la carga suspendida 1: $(V_{load}^{Xf}, V_{load}^{Yf}) = R_{\theta_{load}} (V_{load}^{rf}, V_{load}^{\theta f})$;

- en cada X y el eje Y de dicho sistema de coordenadas cartesiano, a continuación, se puede determinar, a través de la conversión de la fórmula (módulo de conversión 13), el componente correspondiente de la instrucción de ejecución (instrucción de velocidad del carro) V_{trol} :

$$V_{trot}^X = V_{load}^{Xf} + \frac{L}{g} \ddot{V}_{load}^{Xf} \quad \text{et} \quad V_{trot}^Y = V_{load}^{Yf} + \frac{L}{g} \ddot{V}_{load}^{Yf} ;$$

- la instrucción de ejecución (referencia de velocidad del carro) V_{trot} , disponible en coordenadas cartesianas, se expresa en el sistema de coordenadas adaptado al equipo de elevación, en este caso en coordenadas cilíndricas, aplicando una matriz de transformación geométrica inversa, aquí una matriz de rotación inversa $R^{-\theta_{trot}}$ que corresponde a la posición angular en guiñada θ_{trot} del carro 5: $(V_{trot}^r \ V_{trot}^\theta) = R^{-\theta_{trot}}(V_{trot}^X \ V_{trot}^Y)$;

- los componentes de la instrucción de ejecución V_{trot} se aplican entonces cada uno a su motor de accionamiento 7, 8 respectivamente; así, el componente radial V_{trot}^r de la instrucción de ejecución V_{trot} se aplica luego al motor de distribución 7,

- mientras que el componente tangencial V_{trot}^θ de dicha instrucción de ejecución V_{trot} se convierte en instrucción de velocidad angular del carro mediante la multiplicación por $1/r_{trot}$, donde r_{trot} representa la distancia del carro 5 al eje de rotación vertical (ZZ'), que luego se aplica al motor de orientación (giro de guiñada) 8.

Tenga en cuenta también que las coordenadas cilíndricas del carro 5 (punto de unión H) pueden conocerse fácilmente (en tiempo real), por ejemplo, por medio de una parte de un sensor de posición angular que proporciona información sobre la posición angular en guiñada de la pluma 4 con respecto al mástil 3, es decir en la posición angular guiñada θ_{trot} del carro 5, y en segundo lugar por medio de un sensor de posición, por ejemplo asociado con el motor de formación en distribución 7, que hace posible conocer la posición del carro 5 (en traslación) a lo largo de la pluma 4 y, en consecuencia, la distancia radial r_{trot} a la que dicho carro 5 se encuentra en el eje vertical de rotación (ZZ').

De manera similar, la longitud L del cable de suspensión 6 se puede conocer en tiempo real por medio de un sensor que mide la rotación absoluta del cabrestante o el motor de elevación que genera el devanado de dicho cable de suspensión 6.

La posición angular en guiñada θ_{load} de la carga suspendida 1, así como la distancia (radial) r_{load} de dicha carga suspendida con respecto al eje de giro vertical (ZZ') se puede estimar mediante la integración (a lo largo del tiempo) del componentes de la instrucción de control filtrada V_f , ya que dichos componentes corresponden respectivamente a la velocidad radial de carga filtrada V_{load}^{rf} y a la velocidad angular de carga filtrada $V_{load}^{\theta f}$.

Por lo tanto, más particularmente, será posible evaluar una posición radial estimada r_{load_estima} de la carga suspendida 1 como:

$$r_{load_estim}(t) = \int_0^t V_{load}^{rf} dt + r_{load}(0)$$

Se observará a este respecto que, cuando el equipo de elevación 2, y más particularmente la carga suspendida 1, está en reposo, de modo que dicha carga suspendida 1 cuelga sustancialmente verticalmente del carro 5, la posición angular en guiñada y la distancia al eje de giro de la carga suspendida 1 son respectivamente idénticas a la posición angular en guiñada y la distancia al eje de giro del carro 5, ellas mismas medidas como se indicó anteriormente.

Por lo tanto, podemos establecer, como una condición inicial (y, por lo tanto, como un parámetro de calibración) de la computación integral mencionada anteriormente: $r_{load}(0) = r_{trot}(0)$, donde "0" corresponde a un momento inicial cuando el sistema está en reposo.

Si es necesario, para mejorar la precisión de la estimación de la posición radial de la carga suspendida 1, será posible utilizar un observador (matriz de observación) que implique una medición adicional de la posición radial del carro 5.

Además, se observará que la regularización C^3 , y más particularmente el filtrado de tercer orden F3, se puede aplicar a un movimiento característico (único) del equipo de elevación 2 (típicamente el movimiento de giro en orientación o el movimiento de traslación en distribución en el ejemplo preferido ilustrado en las figuras 1 y 6), es decir, solo a uno de los componentes de la instrucción de control V_u, V_{JOY} , o a varios de dichos movimientos característicos (es decir, a varios de dichos componentes) o, preferiblemente, a todos dichos movimientos característicos (es decir, a todos los componentes de la instrucción de control).

La invención además se refiere, por supuesto, como tal al uso de una regularización C^3 , y más particularmente al uso de un filtro de tercer orden F3, y cuando sea apropiado, el uso de una u otra ley de saturación SAT1, SAT2, SAT3, en la determinación de una instrucción de ejecución V_{trot} destinada a aplicarse a un motor de accionamiento 7, 8 para mover una carga suspendida 1 a una máquina de levantamiento 2, según uno u otro de los procedimientos descritos anteriormente.

Como tal, debe observarse que la invención como tal se refiere a la implementación de una regularización C^3 , y más particularmente a la implementación del filtro de tercer orden F3, respectivamente de todas o algunas de las leyes de saturación, independientemente del tipo de cálculo utilizado para determinar los componentes de la instrucción de ejecución V_{trol} .

5

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de desplazamiento de carga (1) suspendida en un punto de unión de unión (H) de un equipo de elevación (2), comprendiendo dicho procedimiento un paso (a) de adquisición de instrucciones de control en el transcurso del cual se adquiere una instrucción llamada "instrucción de control" (V_u) que es representativa de una velocidad de desplazamiento (V_{load}) que el conductor del equipo de elevación desea conferir a la carga (1) suspendida, luego un paso (b) de tratamiento durante el cual se desarrolla, a partir de dicha instrucción de control (V_u), la llamada "instrucción de ejecución" (V_{trol}) que está destinada a aplicarse al menos a un motor de accionamiento (7, 8) para desplazar la carga suspendida (1), y el procedimiento **se caracteriza porque** la etapa (b) de procesamiento comprende una subetapa (b4) de regularización C^3 durante la cual se procesa la instrucción de control (V_u) para conferir a dicha instrucción de control (V_u) propiedades de derivabilidad tercera con respecto al tiempo y la continuidad con respecto al tiempo, con el fin de generar, a partir de dicha instrucción de control (V_u), una denominada "instrucción de control filtrada" (V_f) que es de clase C^3 , y luego se define la instrucción de ejecución (V_{trol}) desde dicha instrucción de control filtrada (V_f).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la instrucción de ejecución (V_{trol}) expresa la instrucción de velocidad que debe alcanzar el punto de unión (H) y se define de la siguiente manera:

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

con:

V_f la instrucción de control filtrada,

L la longitud del cable de suspensión (6) que conecta la carga suspendida (1) al punto de unión (H), g la gravedad.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** durante la subetapa (b4) de regularización C^3 , es posible utilizar, para generar la instrucción de control filtrada (V_f), un parámetro (ω , ω_0) que es representativo de la aceleración máxima (a_{MAX}) que el motor de accionamiento (7, 8) puede proporcionar al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1), de modo que la instrucción de ejecución (V_{trol}) que se deriva de dicha instrucción de control filtrada (V_f) depende de dicha aceleración máxima a fin de que sea factible por dicho motor de accionamiento (7, 8).

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores **caracterizado porque**, durante la subetapa (b4) de regularización C^3 , se aplica a la instrucción de control (V_u) un filtro de tercer orden (F3) a fin de generar la instrucción de control filtrada (V_f) que es de clase C^3 .

5. Procedimiento según las reivindicaciones 3 y 4 **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento puede comprender una subetapa (b1) para ajustar la pulsación del filtro de tercer orden (F3), durante la cual se calcula la pulsación (ω , ω_0) de dicho filtro de tercer orden (F3) a partir de un valor (a_{MAX}) que es representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento (7, 8) puede conferir al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1).

6. Procedimiento según la reivindicación 4 o 5 **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento comprende una subetapa (b1) para ajustar la pulsación (ω , ω_0 , ω_p) del filtro de tercer orden (F3), durante la cual la pulsación (ω , ω_0 , ω_p) del filtro de tercer orden (F3) se adapta en función del valor de la instrucción de control (V_u) aplicada por el conductor del equipo de elevación en el momento considerado, y más preferiblemente modifica el valor de la pulsación (ω , ω_0 , ω_p) del filtro de tercer orden (F3) según si la instrucción de control (V_u) es más baja o por el contrario más alta que una velocidad de referencia (V_{thresh}) que se define a partir del valor de velocidad máxima (V_{MAX}) que el motor de accionamiento (7, 8) puede proporcionar al punto de unión (H) en el que se suspende la carga (1).

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 a 6 **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento comprende un subpaso (b1) para ajustar la pulsación del filtro de tercer orden, durante el cual se calcula la pulsación (ω) del filtro de tercer orden (F3) a partir de una pulsación calculada (ω_0) determinada de la siguiente manera:

se elige $V_{thresh} = k \cdot V_{MAX}$, con $0 < k < 1$, por ejemplo $k = 0,5$;

si $V_u \leq V_{thresh}$, entonces se define la pulsación calculada (ω_0) como un valor alto

$$\omega_0 = \omega_{high} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{thresh} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

si $V_u > V_{thresh}$, entonces se define la pulsación calculada (ω_0) como un valor bajo

$$\omega_0 = \omega_{low} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

con:

- 5 V_u la instrucción de control,
- 10 L la longitud del cable de suspensión (6) que conecta la carga suspendida (1) al punto de unión (H), g la gravedad
- 15 V_{MAX} un valor representativo de la velocidad máxima que el motor de accionamiento (7, 8) puede dar al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1) y
- a_{MAX} un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento (7, 8) puede dar al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1).

8. Procedimiento según la reivindicación 7 **caracterizado porque**, durante la subetapa (b1) para ajustar la pulsación del filtro de tercer orden (F3), se aplica un filtro de segundo orden (F2) a la pulsación calculada (ω , ω_0), de modo que el filtro de tercer orden utiliza una pulsación calculada filtrada (ω_F), y dicha pulsación calculada filtrada (ω_F) se define preferentemente como:

$$\omega_F(p) = \frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_x} + \frac{p^2}{\omega_x^2}} \omega_0(p)$$

con:

- 25 ω_0 la pulsación calculada, antes del filtrado de segundo orden (F2),
- ω_x la pulsación adecuada del filtro de segundo orden (F2), por ejemplo igual a 4 rad/s,
- 30 m el coeficiente de amortiguamiento del filtro de segundo orden (F2), preferiblemente igual a 0,7.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 a 8, **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento comprende un subpaso (b2) de saturación preliminar, durante el cual se aplica la instrucción de ejecución (V_u), una primera ley de saturación (SAT1) que se calcula según la pulsación (ω , ω_F) del filtro de tercer orden (F3).

10. Procedimiento según la reivindicación 9, **caracterizado porque** la primera ley de saturación (SAT1) se expresa por:

$$SAT1(V_u) = V_u \text{ si } -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \leq V_u \leq \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u < -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = +\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u > \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

con

V_u la instrucción de control,

ω_F la pulsación del filtro de tercer orden (F3),

L la longitud del cable de suspensión (6) que conecta la carga suspendida (1) al punto de unión (H), g la gravedad

a_{MAX} un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento (7, 8) puede dar al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1).

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento comprende una subetapa (b3) de saturación secundaria, que está destinada a mantener constante o disminuir la instrucción de ejecución (V_{trol}) cuando dicha instrucción de ejecución alcanza sustancialmente la velocidad máxima (V_{MAX}) que el motor de accionamiento (7, 8) puede dar al punto de unión (H).

12. Procedimiento según las reivindicaciones 11 y 4 **caracterizado porque**, durante la subetapa (b3) de saturación secundaria se aplica a la instrucción de control (V_u) una segunda ley de saturación (SAT2) expresada como:

$$SAT2(V_u) = MIN(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} > 0$$

y

$$SAT2(V_u) = MAX(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} < 0,$$

con:

V_u la instrucción de control,

V_{trol} la instrucción de ejecución, estimada

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

V_f la instrucción de control filtrada emitida por el filtro de tercer orden (F3),

$$E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

y

con

c_1, c_2 los coeficientes, respectivamente del primer orden y del segundo orden, utilizados por dicho filtro de tercer orden (F3),

ω_F la pulsación del filtro de tercer orden (F3),

L la longitud del cable de suspensión (6) que conecta la carga suspendida (1) al punto de unión (H), g la gravedad.

13. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la etapa (b) de procesamiento comprende una subetapa (b5) de saturación de la tercera derivada de la instrucción de control filtrada

durante la cual se aplica la tercera derivada (\ddot{V}_f) de la instrucción de control filtrada, una tercera ley de saturación (SAT3) cuyos umbrales de saturación dependen de la aceleración máxima (a_{MAX}) que el motor de accionamiento (7, 8) puede conferir al punto de unión (H) de la carga suspendida (1).

14. Procedimiento según la reivindicación 13 y 4, **caracterizado porque** la tercera ley de saturación (SAT3) se expresa por:

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \omega_F^3 \times (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

$$\text{si } \frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX}) \leq \ddot{V}_f \leq \frac{g}{L} (-\dot{V}_f + a_{MAX}),$$

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f < \frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX})$$

y

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f > \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX})$$

5 con

V_f la instrucción de control filtrada emitida por el filtro de tercer orden (F3),

10

ω_F la pulsación del filtro de tercer orden (F3),

c_1 , c_2 los coeficientes, respectivamente del primer orden y del segundo orden, utilizados por dicho filtro de tercer orden (F3),

15

L la longitud del cable de suspensión (6) que conecta la carga suspendida (1) al punto de unión (H), g la gravedad

a_{MAX} un valor representativo de la aceleración máxima que el motor de accionamiento (7, 8) puede dar al punto de unión (H) al que se suspende la carga (1).

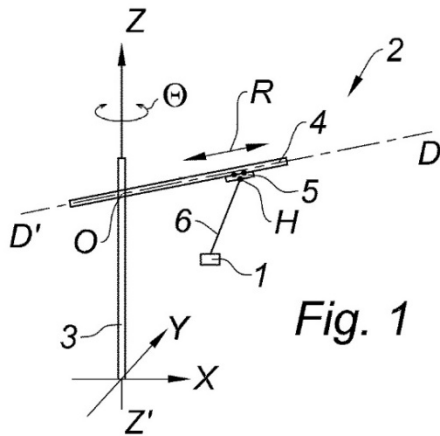


Fig. 1

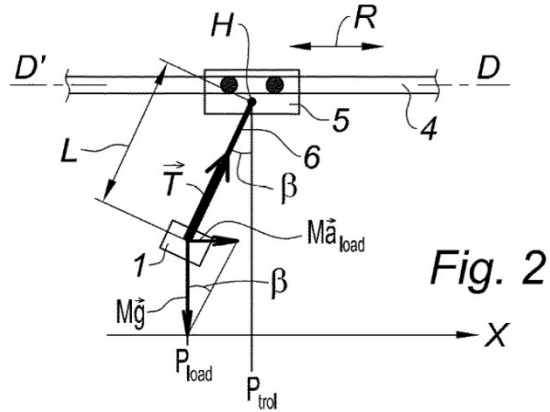


Fig. 2

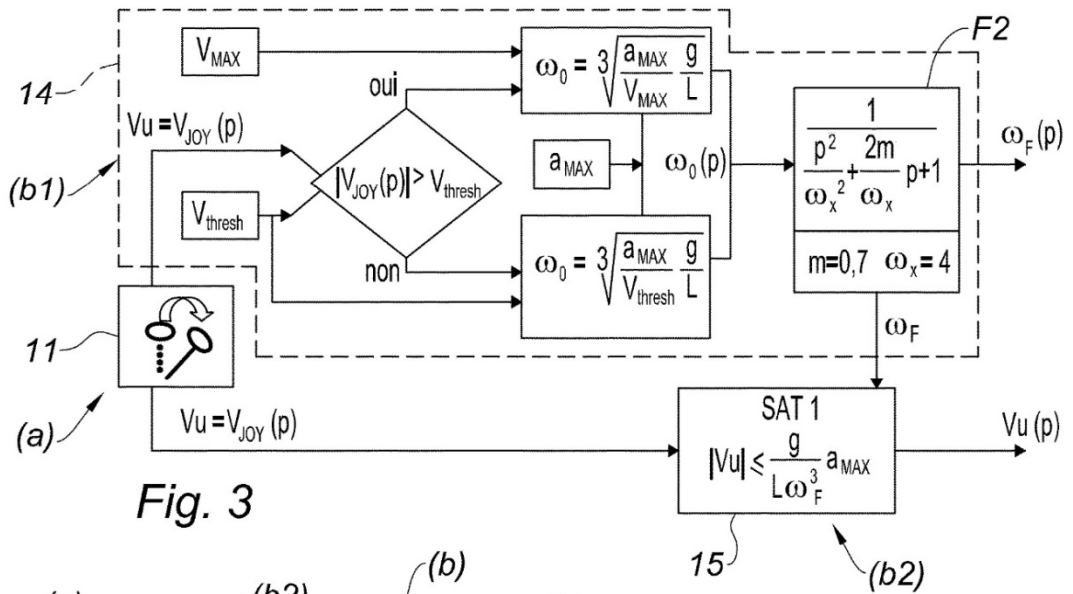


Fig. 3

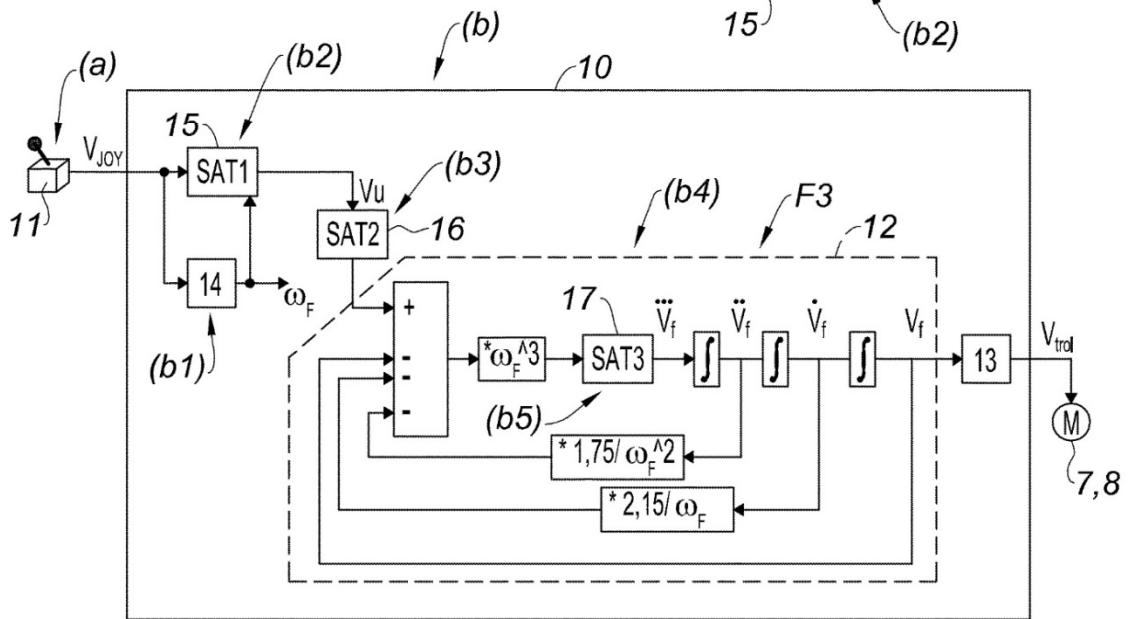


Fig. 4

