



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 347 899**

51 Int. Cl.:
G05B 13/04 (2006.01)
G05D 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08300040 .6**
96 Fecha de presentación : **21.01.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **1947534**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.07.2008**

54 Título: **Optimización de la respuesta frecuencial de un simulador de movimiento mediante seguimiento adaptativo de consignas sinusoidales.**

30 Prioridad: **22.01.2007 FR 07 52807**

73 Titular/es: **Ixmotion S.A.S.**
52, avenue de l'Europe
78160 Marly-le-Roi, FR

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
22.11.2010

72 Inventor/es: **Vau, Bernard**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
22.11.2010

74 Agente: **Curell Aguilá, Marcelino**

ES 2 347 899 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:

La invención pertenece al campo de los simuladores de movimiento condicionados en posición, en velocidad o en aceleración.

5 Los simuladores de movimiento se utilizan, entre otras cosas, para someter a prueba las características en función de la frecuencia de un componente colocado sobre la plataforma de un simulador de movimiento adecuado para generar movimientos tales como movimientos de rotación instantánea alrededor de un eje. Una categoría de movimientos particularmente interesante para llevar a cabo pruebas está constituida por
10 movimientos tales que la posición, la velocidad o la aceleración angular del eje sea una función sinusoidal caracterizada por una amplitud y una pulsación. Se aplica por tanto una señal de consigna con la forma $Ae^{j\omega t}$ (adoptando una notación compleja) y se procede a las mediciones características en el sensor que va a someterse a prueba. Sin embargo, esta prueba sólo tiene valor si el simulador de movimiento presenta efectivamente un
15 movimiento que sigue la señal de consigna. Se intenta por tanto que el movimiento real del simulador de movimiento sea lo más fiel posible con respecto a la consigna. Por cierto, la palabra componente define en este caso cualquier componente inercial o cualquier tipo de sensor que mida una posición, una velocidad o una aceleración.

Unos sistemas de condicionado para simulador de movimiento son conocidos por
20 la solicitud de patente WO2006/161664A o el artículo "Implementation of RST controllers for a flexible servo considering practical limitations" de CHAMPENOIS G. y AP. en Industrial Automation and Control, 1995, pág. 209-213 ISBN 0-7803-2081-6.

La estructura del bucle de condicionado en posición (en velocidad o en
25 aceleración) de un simulador de movimiento es generalmente conforme al esquema representado en la figura 1. El sistema físico que se debe condicionar 10 está constituido por un amplificador de corriente 11, por un motor 12 de corriente continua o de corriente alterna (por ejemplo, motor de corriente alterna sin escobillas: "AC brushless"), por el eje
13 de la máquina y por un sensor 14. El amplificador de corriente 11 recibe, por ejemplo, una orden en forma de una tensión $u(t)$ y aplica en consecuencia la intensidad $i(t)$
30 correspondiente a los bornes del motor eléctrico 12. Al estar el eje 13 del simulador de movimiento acoplado al rotor del motor eléctrico 12, la circulación de una corriente $i(t)$ adaptada en el estator pone en rotación el eje 13 alrededor de su eje de simetría. El sensor 14 mide una magnitud cinemática instantánea $y(t)$ relativa al movimiento del eje 13

del simulador de movimiento. Esta magnitud medida $y(t)$ puede ser o bien la posición del eje o bien la velocidad de éste, o bien incluso la aceleración de éste (magnitud medida angular o lineal).

5 El bucle de condicionado consiste en una ley de mando 20 que, a partir de las entradas constituidas a la vez por la señal de consigna $c(t)$ y la magnitud medida $y(t)$, determina el valor del de la orden $u(t)$ que va a aplicarse al sistema condicionado 10. Esta ley de mando se establece mediante un algoritmo de síntesis a partir de una modelización física del comportamiento del sistema que se debe condicionar.

10 El bucle de condicionado cerrado presentado en la figura 1 presenta la particularidad de presentar un comportamiento “de paso bajo” entre la consigna $c(t)$ y la medición $y(t)$. Lo que significa que la calidad del seguimiento de una consigna sinusoidal depende de la frecuencia de esta consigna. Para las bajas frecuencias (por ejemplo, del orden del hercio), no existe ninguna dificultad particular para garantizar un seguimiento de la consigna sin que aparezca un error significativo, denominado de “arrastre”, entre la
15 consigna $c(t)$ y la magnitud medida $y(t)$, por ejemplo la posición. En cambio, cuanto más aumenta la frecuencia de la consigna sinusoidal, más importante se vuelve el error de arrastre. Para estas frecuencias elevadas, la posición del eje sigue también un movimiento sinusoidal pero con una cierta atenuación de la amplitud que es cada vez más marcada a medida que la frecuencia aumenta. Se define la frecuencia de corte del condicionado
20 como la frecuencia para la que la amplitud de la consigna experimenta una atenuación de ± 3 dB.

Es deseable que la frecuencia de corte, que es un indicador de las prestaciones del condicionado, sea la más alta posible. No obstante, el valor máximo de la frecuencia de corte se limita a causa de las dinámicas de alta frecuencia que no pueden tenerse en
25 cuenta en la modelización de la máquina condicionada, modelización base de la síntesis del condicionado. Estas dinámicas de altas frecuencias sobre la modelización se deben, por ejemplo, a la dinámica eléctrica del motor o, incluso, a las resonancias de la estructura mecánica.

Por otro lado, para que el bucle de condicionado sea estable sea cual sea el
30 movimiento que se desee dar al simulador de movimiento, es necesario concebir un condicionado denominado robusto con respecto a estas dinámicas de alta frecuencia. A título indicativo, la propiedad de robustez de un condicionado garantiza la estabilidad del bucle de condicionado cuando el sistema que se va a controlar se aleja del modelo

nominal. Ahora bien, desde un punto de vista teórico, se muestra que la robustez y las prestaciones son dos nociones antagonistas. Es decir, la robustez necesaria en el bucle de condicionado genera unas limitaciones en las prestaciones de este condicionado, y en particular disminuye la frecuencia de corte de este condicionado. Todos los condicionados conocidos utilizados en los simuladores de movimiento actuales experimentan esta restricción.

Además, es necesario añadir que el movimiento sinusoidal del eje no solamente se atenúa con respecto a la señal de consigna sino que también se desfasa con respecto a ésta. Este desfase aumenta notablemente a medida que aumenta la frecuencia. El desfase comienza a ser significativo a frecuencias muy inferiores a la frecuencia de corte del condicionado.

Al ser los simuladores de movimientos unas máquinas con vocación metrológica, esta atenuación y este desfase generan grandes dificultades para una caracterización precisa de los componentes que van a someterse a prueba.

La invención tiene por tanto como objetivo responder a los inconvenientes mencionados anteriormente eliminando o por lo menos reduciendo en gran medida cualquier atenuación y cualquier desfase de la magnitud medida (posición, velocidad o aceleración) con respecto a la consigna sinusoidal.

Para ello, la invención se refiere a un dispositivo de condicionado de un simulador de movimiento, estando modelizado dicho simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ (posición, velocidad o aceleración del eje), por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector sintetizado a partir de dicha modelización del simulador de movimiento y equivalente a un corrector RST, comprendiendo el corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo entonces la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$. Según la invención, el dispositivo de retroacción se caracteriza porque comprende un filtro de consigna que toma en la entrada una señal de consigna sinusoidal $c(t)$ que presenta una pulsación ω_c y que aplica en la salida una señal de consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector (20); presentando dicho filtro de consigna una función de transferencia $Rr(z^{-1})/Fr(z^{-1})$ cuyo denominador $Fr(z^{-1})$ y numerador $Rr(z^{-1})$ se determinan con objeto de garantizar, a la

pulsación ω_c , un seguimiento efectivo por el simulador de movimiento de la consigna sinusoidal.

En un modo de realización, el numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia es tal que la expresión $Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})$ se factoriza en la forma:

$$5 \quad D(z^{-1})Lo(z^{-1}) = [1 - 2 \cos(\omega_c \cdot Te) \cdot z^{-1} + z^{-2}]Lo(z^{-1}) ;$$

y porque dicho numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia es la solución de una ecuación denominada de Bezout:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) + Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = Fr(z^{-1})W(z^{-1})$$

para la pulsación ω_c de la señal de consigna.

10 Preferentemente, el dispositivo comprende un medio para determinar $Rr(z^{-1})$ adecuado para resolver en línea la ecuación de Bezout en función del parámetro que constituye la pulsación ω_c de dicha señal de consigna, de modo que dicho dispositivo de condicionado permite un seguimiento adaptativo de dicha consigna sinusoidal.

Según otro modo de realización, el dispositivo comprende:

- 15
- un medio de simulación del conjunto formado por el corrector y por el sistema físico, que produce una magnitud medida ideal $y_m(t)$ y que presenta como función de transferencia $H(z^{-1})/W(z^{-1})$;
 - un medio de estimación de la atenuación y del desfase residuales adecuado para determinar, a partir de la magnitud medida real $y(t)$ y de la magnitud medida ideal $y_m(t)$, los valores de la atenuación residual At y del desfase residual φ , entre el movimiento real del simulador de movimiento y la magnitud medida ideal $y_m(t)$;
 - un medio de determinación de $Rr(z^{-1})$ adecuado para calcular, a la pulsación ω_c de la señal de consigna, dicho numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia del filtro de consigna, en función de la atenuación y del desfase residuales determinados por dicho medio de estimación, por resolución en línea del sistema de ecuación:
- 20
- 25

$$\frac{H(1) \cdot Rr(1)}{W(1) \cdot Fr(1)} = 1$$

$$\frac{H(e^{-j\omega_c Te})}{W(e^{-j\omega_c Te})} \cdot \frac{Rr(e^{-j\omega_c Te})}{Fr(e^{-j\omega_c Te})} = \frac{1}{At} e^{-j\varphi}$$

Preferentemente, el medio de estimación de la atenuación y del desfase residuales se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los mínimos cuadrados.

5 Preferentemente también, el medio de determinación de $Rr(z^{-1})$ toma asimismo como parámetro de entrada el valor de la pulsación de dicha señal de consigna, de modo que dicho dispositivo de condicionado presenta la función de seguimiento adaptativo de la consigna sinusoidal.

10 Ventajosamente, el dispositivo comprende un medio de estimación de la pulsación adecuado para determinar el valor de la pulsación de la consigna aplicado en la entrada de dicho filtro de consigna.

Preferentemente, el medio de estimación de la pulsación se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los mínimos cuadrados generalizados.

15 La invención tiene asimismo como objeto un procedimiento de condicionado de un simulador de movimiento, estando modelizado el simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ entre su posición, su velocidad y su aceleración, por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector sintetizado a partir de dicha modelización del simulador de movimiento y equivalente a un
 20 corrector RST, comprendiendo dicho corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo entonces la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$; caracterizado porque se filtra una señal de consigna sinusoidal que presenta una pulsación wc para aplicar una señal de
 25 consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector; realizándose la etapa de filtrado de la señal de consigna con objeto de garantizar un seguimiento efectivo por el simulador de movimiento de la consigna sinusoidal.

Según un modo de realización, el filtrado se realiza según una función de transferencia $Rr(z^{-1})/Fr(z^{-1})$ cuyo numerador $Rr(z^{-1})$ se determina para que la expresión
 30 $Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})$ se factorice en la forma:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) = [1 - 2 \cos(wc \cdot Te) \cdot z^{-1} + z^{-2}]Lo(z^{-1})$$

El numerador $Rr(z^{-1})$ se determina como la solución de una ecuación denominada

de Bezout:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) + Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = Fr(z^{-1})W(z^{-1})$$

a la pulsación ω_c de la señal de consigna.

5 Preferentemente, se determina $Rr(z^{-1})$ en línea resolviendo dicha ecuación de Bezout en función del parámetro que constituye la pulsación ω_c de dicha señal de consigna, de modo que dicho procedimiento de condicionado permite un seguimiento adaptativo de dicha consigna sinusoidal.

Según otro modo de realización:

- 10
- se simula el comportamiento del conjunto formado por el corrector y por el simulador de movimiento por medio de una función de transferencia $H(z^{-1})/W(z^{-1})$ con objeto de producir una magnitud medida ideal $y_m(t)$;
 - se estima la atenuación y el desfase residuales entre el movimiento real del simulador de movimiento y la magnitud medida ideal $y_m(t)$ a partir de la magnitud
- 15
- medida real $y(t)$ y de la magnitud medida ideal $y_m(t)$;
 - se determina dicho numerador $Rr(z^{-1})$ en función de la pulsación ω_c , de la atenuación y del desfase residuales determinados en la etapa de estimación, por resolución en línea del sistema de ecuación:

$$\frac{H(l)}{W(l)} \cdot \frac{Rr(l)}{Fr(l)} = 1$$

$$\frac{H(e^{-j\omega_c T_e})}{W(e^{-j\omega_c T_e})} \cdot \frac{Rr(e^{-j\omega_c T_e})}{Fr(e^{-j\omega_c T_e})} = \frac{1}{At} e^{-j\phi}$$

20

- se adapta el filtrado de la consigna con el valor determinado de $Rr(z^{-1})$.

Preferentemente la etapa de estimación de la atenuación y del desfase residuales se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los

25 mínimos cuadrados.

Preferentemente también, en la etapa de determinación del numerador $Rr(z^{-1})$ se tiene en cuenta asimismo como parámetro de entrada el valor de la pulsación de dicha señal de consigna, de modo que el procedimiento de condicionado garantiza un

seguimiento adaptativo al valor instantáneo de la consigna sinusoidal.

Ventajosamente, el procedimiento comprende una etapa inicial de estimación de la pulsación de dicha señal de consigna.

5 Preferentemente, la etapa de estimación de la pulsación se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los mínimos cuadrados generalizados.

10 La invención tiene asimismo como objeto un programa informático que comprende una serie de instrucciones adecuadas para ser cargadas en la memoria de un ordenador y para ser ejecutadas por el calculador de dicho ordenador. El programa según la invención permite poner en práctica el procedimiento de condicionado según la invención.

15 La invención se comprenderá mejor y otros objetivos, detalles, características y ventajas de la misma se pondrán de manifiesto más claramente en el transcurso de la descripción de un modo de realización particular de la invención dado únicamente a título ilustrativo y no limitativo en consigna a los dibujos adjuntos. En estos dibujos:

la figura 1 representa desde un punto de vista general un bucle cerrado de condicionado del estado de la técnica;

la figura 2 es una representación esquemática en forma de bloques funcionales del bucle de condicionado de la figura 1;

20 la figura 3 es una representación esquemática de puesta en práctica de un filtro de consigna para una señal de consigna dada;

25 la figura 4 es una representación esquemática según un modo de realización de la invención que permite seguir las evoluciones de la señal de consigna y que recoge esencialmente la figura 3 añadiéndole bloques de resolución en línea de la ecuación de Bezout; y,

la figura 5 es una representación esquemática en forma de bloques funcionales de un segundo modo de realización de la invención que permite la supresión de atenuaciones y de desfases residuales.

30 El esquema de bloques de un sistema en bucle se proporciona de una manera muy general mediante la figura 2. El sistema 10 que se debe condicionar se modeliza mediante una función de transferencia G discreta, muestreada en el periodo T_e :

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (1)$$

En la ecuación (1), $z = e^{j\omega T_e}$ representa el operador “avance de un periodo de muestreo”.

5 El corrector o ley de mando 20 se representa en forma RST (corrector con dos grados de libertad), que es la representación más general de un corrector monovariante. Se muestra que cualquier corrector monovariante lineal puede ponerse en forma RST. En particular los correctores de tipo PID, LQG-LTR monovariante, Hinfini, Crone, etc. pueden escribirse en forma RST. La presente invención no se limita por tanto a los correctores RST. La estructura del corrector RST se representa esquemáticamente en detalle en la
10 figura 2 mediante los bloques 21 a 23.

La función de transferencia entre la consigna $c(t)$ y la medición $y(t)$ se escribe entonces:

$$\frac{y(t)}{c(t)} = \frac{T(z^{-1})B(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1})} = \frac{H(z^{-1})}{W(z^{-1})} \quad (2)$$

15 Esta función de transferencia es de tipo “de paso bajo” como se ha indicado en la introducción, es decir que la atenuación y el desfase de la medición con respecto a la consigna aumentan a medida que aumenta la frecuencia de esta consigna.

La puesta en práctica de un filtro de consigna se describirá a continuación con mayor detalle con respecto a la figura 3, para el que se conoce la pulsación de la consigna sinusoidal.

20 En un primer momento, se supone que la modelización del sistema que va a controlarse se realiza perfectamente por la función de transferencia de la ecuación (1). Es decir, que la medición $y(t)$ del sistema real que va a controlarse se comporta, para una misma entrada, exactamente como el valor de salida de la función de transferencia de la ecuación (1).

25 Según la invención, para garantizar un seguimiento de la consigna sinusoidal $c(t)$ sin ningún error de arrastre, conociéndose la pulsación ω_c de esta consigna, se añade, aguas arriba del corrector 20, un filtro de consigna 30 como se representa en la figura 3. El filtro 30 toma en la entrada la consigna $c(t)$ y produce en la salida una consigna filtrada $c'(t)$ que se aplica como consigna en la entrada del corrector 20. El filtro de consigna 30
30 presenta una función de transferencia que se escribe:

$$\frac{Rr(z^{-1})}{Fr(z^{-1})} \quad (3)$$

El conjunto del bucle cerrado presenta por tanto como función de transferencia la ecuación:

$$\frac{y(t)}{c(t)} = \frac{Rr(z^{-1})}{Fr(z^{-1})} \cdot \frac{H(z^{-1})}{W(z^{-1})} \quad (4)$$

5 Se trata entonces de adaptar la función de transferencia del filtro 30 para garantizar un seguimiento de la consigna.

Una manera de actuar consiste en definir el error de seguimiento de consigna por $e(t)=c(t)-y(t)$. A partir de la ecuación (4) se obtiene:

$$e(t) = c(t) \cdot \left[1 - \frac{Rr(z^{-1})H(z^{-1})}{Fr(z^{-1})W(z^{-1})} \right] = c(t) \cdot \left[\frac{Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})}{Fr(z^{-1})W(z^{-1})} \right] \quad (5)$$

10 Se muestra que el seguimiento de consigna se efectúa sin error de arrastre cuando el numerador $Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})$ de la ecuación (5) se factoriza en la forma:

$$Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = D(z^{-1})Lo(z^{-1}) = [1 - 2\cos(\omega c \cdot Te) \cdot z^{-1} + z^{-2}]Lo(z^{-1})$$

15 Siendo $Fr(z^{-1})$ el denominador del filtro de consigna 30, puede elegirse arbitrariamente siempre que se trate de un polinomio estable de grado 2. Por tanto, las dos incógnitas del problema no son sino los polinomios $Rr(z^{-1})$ y $Lo(z^{-1})$ que pueden obtenerse por la resolución de la ecuación:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) + Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = Fr(z^{-1})W(z^{-1}) \quad (6)$$

La ecuación (6) es una ecuación polinómica denominada de Bézout, cuya resolución es clásica en matemáticas.

20 En general, también es deseable que el seguimiento de consignas estáticas esté garantizado. Asimismo se toma como polinomio D:

$$D(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) \cdot (1 - 2\cos(\omega c \cdot Te) \cdot z^{-1} + z^{-2}) \quad (7)$$

En este caso $Fr(z^{-1})$ debe ser un polinomio estable de orden 3.

Se debe observar que lo que acaba de desarrollarse sólo es válido para consignas

sinusoidales que presentan una pulsación ω_c dada.

El modo de realización de la invención que se describe ahora permite el seguimiento de consigna sea cual sea la pulsación ω_c de la consigna sinusoidal aplicada. Para ello, el filtro de consigna se modifica para que presente un carácter adaptativo en función de la pulsación de la consigna sinusoidal efectivamente aplicada. Para ello, la ecuación (6) de Bézout se resuelve en línea mediante el algoritmo representado esquemáticamente por el bloque 31 (véase la figura 4). La resolución de la ecuación (6) se realiza en función del parámetro que constituye la pulsación ω_c de la consigna.

Por otro lado, la consigna $c(t)$ de posición, de velocidad o de aceleración puede ser o bien una consigna externa generada por el usuario del simulador de movimiento, por medio, por ejemplo, de un generador de frecuencias, o bien una consigna interna. En este último caso, se trata por tanto de una consigna interna al calculador del simulador de movimiento que se genera mediante un algoritmo específico. Aunque en el segundo caso la pulsación se conoce y puede aplicarse fácilmente en la entrada del medio de determinación de $Rr(z^{-1})$, en el primer caso la pulsación de consigna no se conoce.

Para el caso de una pulsación desconocida, entonces es necesario determinar esta frecuencia estimándola por medio de un algoritmo específico. Este algoritmo, representado esquemáticamente por el bloque funcional 50 en la figura 4, es el que se describirá a continuación.

Sea $s(t)$ una señal de consigna sinusoidal centrada en 0, muestreada en el periodo T_e y de pulsación ω_c (en rad/s). Para dicha señal, existe una ecuación recursiva que permite relacionar $s(t+1)$ con $s(t)$ y $s(t-1)$. Se muestra que esta ecuación recursiva es de la forma:

$$s(t+1) = 2 \cdot \cos(\omega_c \cdot T_e) \cdot s(t) - s(t-1) \quad (8)$$

Ahora, planteando:

$$\begin{aligned} Ys(t+1) &= s(t+1) + s(t-1) \\ Us(t) &= s(t) \end{aligned} \quad (9)$$

Puede escribirse:

$$Ys(t+1) = 2 \cdot \cos(\omega_c \cdot T_e) \cdot Us(t) \quad (10)$$

O bien:

$$Y_s(t+1) = \Theta_s \cdot U_s(t) \quad (11)$$

En el caso general, $s(t)$ puede ser una consigna analógica viciada con un ruido $eb(t)$ que se supone en este caso que es un ruido blanco. Por tanto, se obtiene:

$$\begin{aligned} Y_s(t+1) &= s(t+1) + s(t-1) + eb(t+1) + eb(t-1) \\ U_s(t) &= s(t) + eb(t) \end{aligned} \quad (12)$$

5 Teniendo en cuenta (20), puede escribirse:

$$Y_s(t+1) = \Theta_s \cdot U_s(t) + eb(t+1) - \Theta_s \cdot eb(t) + eb(t-1) \quad (13)$$

Con el fin de identificar sin desviaciones Θ_s se puede utilizarse por ejemplo, entre otros algoritmos posibles, el algoritmo de los mínimos cuadrados generalizados recursivos con:

$$\Phi(t)^T = [U(t) \quad \varepsilon(t) \quad \varepsilon(t-1)] \quad (14)$$

10

$$\hat{\Theta}(t) = [\hat{\Theta}_s \quad \hat{c}_1 \quad \hat{c}_2]$$

El algoritmo de adaptación paramétrico se escribe:

$$\hat{\Theta}(t+1) = \hat{\Theta}(t) + F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \varepsilon(t+1) \quad (15)$$

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1 \cdot F(t)^{-1} + \lambda_2 \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \quad (16)$$

$$\varepsilon(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\Theta}(t)^T \cdot \Phi(t)}{1 + \Phi^T(t) \cdot F(t) \cdot \Phi(t)}$$

en la que F es una matriz 3x3 inicializada con la matriz 3x3 siguiente:

$$F(0) = 1000 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

15

Para más detalles con respecto a este algoritmo, es posible consultar la obra de Ioan Doré Landau "Identification des systèmes" (Ed Hermes 2001).

En el sistema de ecuaciones (16), las variables λ_1, λ_2 son escalares y se denominan

factores de omisión. Es necesario que se presenten las condiciones $0 < \lambda_1 \leq 1$ y $0 \leq \lambda_2 < 2$. Puede elegirse, por ejemplo λ_1 comprendido entre 0,95 y 0,99, y λ_2 que valga la unidad.

El procedimiento de condicionado según el modo de realización de la invención descrito anteriormente permite mejorar significativamente el seguimiento de las consignas sinusoidales con respecto a los procedimientos de condicionado conocidos. Sin embargo, este procedimiento es imperfecto puesto que la función de transferencia del sistema que va a controlarse $B(z^{-1})/A(z^{-1})$ sólo es una modelización y, por tanto, una aproximación del sistema físico real que se debe condicionar. Las diferencias de comportamiento entre el modelo y el sistema real son cada vez más elevadas cuando se consideran las frecuencias crecientes. Un último modo de realización de la invención que permite un seguimiento perfecto de la consigna se describirá a continuación con mayor detalle haciendo consigna a la figura 5.

Si se limita a una aproximación lineal, la verdadera función de transferencia del sistema real se indica como $\tilde{B}(z^{-1})/\tilde{A}(z^{-1})$ y sus coeficientes son desconocidos. Esta función de transferencia es de todas maneras de un orden más elevado que la función de transferencia de la modelización: $B(z^{-1})/A(z^{-1})$.

En consecuencia, la función de transferencia $H(z^{-1})/W(z^{-1})$ utilizada más arriba sólo es una aproximación de la función de transferencia real correspondiente $\tilde{H}(z^{-1})/\tilde{W}(z^{-1})$, que también es desconocida. Las divergencias entre estas dos funciones de transferencia crecen con la frecuencia.

Al resolver la ecuación (6) de Bézout descrita anteriormente a partir de $H(z^{-1})$ y de $W(z^{-1})$, la expresión calculada de $Rr(z^{-1})$ no permite el seguimiento perfecto de una consigna sinusoidal, y esto esencialmente a las frecuencias en las que existe divergencia entre $H(z^{-1})/W(z^{-1})$ y $\tilde{H}(z^{-1})/\tilde{W}(z^{-1})$, es decir a las altas frecuencias en las que aparecen de nuevo una atenuación y un desfase que se calificarán como atenuación y desfase residuales.

El procedimiento según el tercer modo de realización de la invención consiste, en paralelo al bucle de condicionado del sistema real caracterizado por la función $\tilde{H}(z^{-1})/\tilde{W}(z^{-1})$, en simular el bucle de regulación ideal basado en la modelización del sistema físico y caracterizado por la función $H(z^{-1})/W(z^{-1})$. La magnitud medida real es $y(t)$ mientras que la magnitud medida simulada es $y_m(t)$.

Por medio de un algoritmo recursivo representado de manera esquemática por el

bloque 40 de la figura 5, se identifica en línea la atenuación y el desfase entre el bucle real y el bucle simulado. At y φ son respectivamente la atenuación y el desfase residuales entre el modelo del bucle cerrado ideal y el bucle cerrado real.

5 El algoritmo de identificación recursivo se basa en el principio de que, para señales sinusoidales centradas en 0, puede expresarse $y(t)$ en función de $ym(t)$ a partir de la relación siguiente :

$$y(t) = (\alpha + \beta \cdot z^{-1}) \cdot ym(t) \quad (17)$$

Se debe observar que si la señal sinusoidal no está centrada en 0, se elimina la componente continua por medio de un filtro de paso alto.

10 Teniendo en cuenta el hecho de que $z^{-1} = e^{-j \cdot \omega_c \cdot T_e}$ y que la frecuencia de las señales sinusoidales se conoce y vale ω_c , puede escribirse:

$$\begin{aligned} y(t) &= (\alpha + \beta \cdot e^{-j \cdot \omega_c \cdot T_e}) \cdot ym(t) \\ y(t) &= \alpha + (\beta \cdot \cos(-\omega_c \cdot T_e)) + j \cdot \beta \cdot \text{sen}(-\omega_c \cdot T_e) \\ y(t) &= At \cdot e^{j \cdot \varphi} \end{aligned}$$

Es decir, que se obtiene:

$$At = \sqrt{(\alpha + \beta \cdot \cos(-\omega_c \cdot T_e))^2 + \beta^2 \cdot \text{sen}^2(-\omega_c \cdot T_e)} \quad (18)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\beta \cdot \text{sen}(-\omega_c \cdot T_e)}{\alpha + \beta \cdot \cos(-\omega_c \cdot T_e)}\right)$$

15 Así, para estimar At y φ , basta con identificar en línea de manera recursiva α y β . Los métodos de identificación recursivos son numerosos y puede tomarse por ejemplo el método de los mínimos cuadrados recursivos.

20 Este método se expondrá a continuación, aunque, para más detalles, podrá consultarse la obra de Ioan Doré Landau "Identification des systèmes" (Ed Hermes 2001).

Adoptando una notación matricial, se plantea $\Theta^T = [\alpha \beta]$ los parámetros del modelo que se deben identificar, $\Phi(t)^T = [ym(t) ym(t-1)]$ el vector de las observaciones, y $\hat{\Theta}^T(t) = [\hat{\alpha}(t) \hat{\beta}(t)]$ la estimación de Θ^T en el instante t. El algoritmo de los mínimos cuadrados recursivos se escribe entonces:

$$\hat{\Theta}(t+1) = \hat{\Theta}(t) + F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \varepsilon(t+1) \quad (19)$$

Y se obtiene:

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1 \cdot F(t)^{-1} + \lambda_2 \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \quad (20)$$

$$\varepsilon(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\Theta}(t)^T \cdot \Phi(t)}{1 + \Phi^T(t) \cdot F(t) \cdot \Phi(t)}$$

5 $F(t)$ que es una matriz 2x2 en este caso preciso se inicializa, por ejemplo, de la manera siguiente:

$$F(0) = 1000 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

10 En el sistema de ecuaciones (14), las variables λ_1, λ_2 son escalares y se denominan factores de omisión. Es necesario que se presenten las condiciones $0 < \lambda_1 \leq 1$ y $0 \leq \lambda_2 < 2$. Puede elegirse, por ejemplo, λ_1 comprendido entre 0,95 y 0,99, y λ_2 que valga la unidad.

En este caso el criterio J minimizado por el algoritmo es:

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \lambda_1^{(t-i)} \cdot \left(y(i) - \hat{\Theta}^T(t) \cdot \Phi(i-1) \right)^2 \quad (21)$$

15 A continuación, tras la etapa de estimación por identificación recursiva de A_t y de φ , el polinomio $Rr(z^{-1})$ se calcula en línea. $Rr(z^{-1})$ se determina, en cuanto al medio de determinación 31', de modo que garantiza el seguimiento de consignas estáticas y que, a la pulsación ω_c , el desfase y la atenuación residuales se compensen. Para ello, es necesario resolver, siempre en línea, el sistema de ecuaciones siguiente:

Restricción en régimen estático:

$$\frac{H(1)}{W(1)} \cdot \frac{Rr(1)}{Fr(1)} = 1 \quad (22)$$

20

Compensación de la atenuación y del desfase residuales a la pulsación ω_c :

$$\frac{H(e^{-j\omega_c T_e})}{W(e^{-j\omega_c T_e})} \cdot \frac{Rr(e^{-j\omega_c T_e})}{Fr(e^{-j\omega_c T_e})} = \frac{1}{At} e^{-j\varphi} \quad (23)$$

Siendo la ecuación (23) una ecuación compleja, se subdivide en dos ecuaciones (parte real y parte imaginaria). Se llega, por tanto, a tres ecuaciones que permiten hallar los tres coeficientes del polinomio $Rr(z^{-1})$. El valor así calculado de $Rr(z^{-1})$ sirve para adaptar la función de transferencia del filtro 30, entendiéndose que el denominador $Fr(z^{-1})$ puede elegirse libremente siempre que se trate de un polinomio de estabilidad de orden 3.

Ventajosamente, este último modo de realización permite un seguimiento adaptativo de la pulsación w_c . Basta para ello considerar el valor de la pulsación w_c que interviene en el sistema de ecuaciones que se deben resolver como un parámetro. Este parámetro w_c se aplica en la entrada del medio de determinación 31' como se representa en la figura 5. Además, un medio de determinación de la pulsación 50, tal como se ha descrito anteriormente en la figura 4, puede integrarse en este último modo de realización si la pulsación w_c de la consigna es un dato externo al calculador adecuado para poner en práctica el procedimiento de condicionado según la invención.

La presente descripción presenta unos modos de realización particulares de dispositivos y de procedimientos que permiten garantizar el seguimiento de consignas sinusoidales sin ningún error de arrastre por un simulador de movimiento. Aunque la descripción detallada se haya referido a un simulador de movimiento de rotación alrededor de un único eje, el experto en la materia comprenderá que la invención se aplica asimismo a los simuladores de movimiento que presentan varios ejes alrededor de los cuales pueden generarse unos movimientos de rotación instantánea y a los simuladores de movimiento de translación a lo largo de una o de varias direcciones de desplazamiento.

Reivindicaciones

1. Dispositivo de condicionado con retroacción de un simulador de movimiento (10) que permite un seguimiento efectivo por el simulador de una consigna, estando modelizado dicho simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ entre su velocidad, su posición o su aceleración, por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector (20) sintetizado a partir de dicha modelización del simulador de movimiento y que equivale a un corrector RST, comprendiendo dicho corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo entonces la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$, caracterizado porque comprende además un filtro de consigna (30) que toma en la entrada la consigna que es una señal de consigna sinusoidal $c(t)$ que presenta una pulsación ω_c y que aplica en la salida una señal de consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector (20); presentando dicho filtro de consigna una función de transferencia $Rr(z^{-1})/Fr(z^{-1})$, y siendo adaptativo,

y porque dicho numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia es tal que la expresión $Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})$ se factoriza en la forma:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) = [1 - 2 \cos(\omega_c \cdot T_e) \cdot z^{-1} + z^{-2}]Lo(z^{-1}) ;$$

y porque dicho numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia es la solución de una ecuación denominada de Bezout:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) + Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = Fr(z^{-1})W(z^{-1})$$

para la pulsación ω_c de la señal de consigna, y porque comprende un medio para determinar $Rr(z^{-1})$ adecuado para resolver en línea la ecuación de Bezout en función del parámetro que constituye la pulsación ω_c de dicha señal de consigna.

2. Dispositivo de condicionado con retroacción de un simulador de movimiento (10) que permite un seguimiento efectivo por el simulador de una consigna, estando modelizado dicho simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ entre su velocidad, su

posición o su aceleración, por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector (20) sintetizado a partir de dicha modelización del simulador de movimiento y equivalente a un corrector RST, comprendiendo dicho corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo por tanto la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$; caracterizado porque comprende además un filtro de consigna (30) que toma en la entrada la consigna que es una señal de consigna sinusoidal $c(t)$ que presenta una pulsación ω_c y que aplica en la salida una señal de consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector (20); presentando dicho filtro de consigna una función de transferencia $Rr(z^{-1})/Fr(z^{-1})$ y siendo adaptativo, y

porque comprende:

- un medio de simulación del conjunto formado por el corrector y por el sistema físico, que produce una magnitud medida ideal $y_m(t)$ y que presenta como función de transferencia $H(z^{-1})/W(z^{-1})$;
- un medio de estimación de la atenuación y del desfase residuales adecuado para determinar, a partir de la magnitud medida real $y(t)$ y de la magnitud medida ideal $y_m(t)$, los valores de la atenuación residual A_t y del desfase residual φ , entre el movimiento real $y(t)$ del simulador de movimiento y la magnitud medida ideal $y_m(t)$;
- un medio de determinación de $Rr(z^{-1})$ adecuado para calcular en línea, a la pulsación ω_c de la señal de consigna, dicho numerador $Rr(z^{-1})$ de la función de transferencia del filtro de consigna, en función de la atenuación y del desfase residuales determinados por dicho medio de estimación, por resolución en línea del sistema de ecuaciones:

$$\frac{H(1)}{W(1)} \cdot \frac{Rr(1)}{Fr(1)} = 1$$

$$\frac{H(e^{-j\omega_c T_e})}{W(e^{-j\omega_c T_e})} \cdot \frac{Rr(e^{-j\omega_c T_e})}{Fr(e^{-j\omega_c T_e})} = \frac{1}{A_t} e^{-j\varphi}$$

tomando el medio de determinación de $Rr(z^{-1})$ también como parámetro de entrada el valor de la pulsación de dicha señal de consigna.

3. Dispositivo de condicionado según la reivindicación 2, caracterizado porque dicho medio de estimación de la atenuación y del desfase residuales se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los mínimos cuadrados.

5 4. Dispositivo de condicionado según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende un medio de estimación de la pulsación adecuado para determinar dicho valor de la pulsación de la consigna aplicado en la entrada de dicho filtro de consigna.

10 5. Dispositivo de condicionado según la reivindicación 4, caracterizado porque dicho medio de estimación de la pulsación se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo un algoritmo de los mínimos cuadrados generalizados.

15 6. Procedimiento de condicionado con retroacción de un simulador de movimiento que permite un seguimiento efectivo por el simulador de una consigna, estando modelizado dicho simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ entre su posición, su velocidad y su aceleración, por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector (20) sintetizado a partir de
20 dicha modelización del simulador de movimiento y equivalente a un corrector RST, comprendiendo dicho corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo entonces la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$; caracterizado porque se filtra una señal de consigna sinusoidal (30) que presenta una pulsación ω_c para aplicar una señal de consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector (20); siendo el filtrado de la señal de consigna adaptativo, y

25 porque el filtrado se realiza según una función de transferencia $Rr(z^{-1})/Fr(z^{-1})$ cuyo numerador $Rr(z^{-1})$ se determina para que la expresión $Fr(z^{-1})W(z^{-1}) - Rr(z^{-1})H(z^{-1})$ se factorice en la forma:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) = [1 - 2 \cos(\omega_c \cdot Te) \cdot z^{-1} + z^{-2}]Lo(z^{-1}) ;$$

y cuyo numerador $Rr(z^{-1})$ se determina como la solución de una ecuación

denominada de Bezout:

$$D(z^{-1})Lo(z^{-1}) + Rr(z^{-1})H(z^{-1}) = Fr(z^{-1})W(z^{-1})$$

para la pulsación ω_c de la señal de consigna y porque se determina $Rr(z^{-1})$ en línea resolviendo dicha ecuación de Bezout en función del parámetro que constituye la pulsación ω_c de dicha señal de consigna.

7. Procedimiento de condicionado con retroacción de un simulador de movimiento que permite un seguimiento efectivo por el simulador de una consigna, estando modelizado dicho simulador de movimiento, entre su entrada constituida por una señal de mando $u(t)$ y su salida constituida por una magnitud medida $y(t)$ entre su posición, su velocidad y su aceleración, por una función de transferencia $B(z^{-1})/A(z^{-1})$, comprendiendo dicho dispositivo de condicionado un corrector (20) sintetizado a partir de dicha modelización del simulador de movimiento y equivalente a un corrector RST, comprendiendo dicho corrector una entrada de consigna, una entrada de retroacción a la que se aplica dicha magnitud medida $y(t)$ y una salida que produce dicha señal de mando $u(t)$, siendo entonces la función de transferencia entre la entrada de consigna del corrector y la magnitud medida $H(z^{-1})/W(z^{-1})$; caracterizado porque se filtra una señal de consigna sinusoidal (30) que presenta una pulsación ω_c para aplicar una señal de consigna filtrada $c'(t)$ a la entrada de consigna de dicho corrector (20); siendo el filtrado de la señal de consigna adaptativo, y

porque:

- se simula el comportamiento del conjunto formado por el corrector y por el simulador de movimiento por medio de una función de transferencia $H(z^{-1})/W(z^{-1})$ con objeto de producir una magnitud medida ideal $y_m(t)$;
- se estima la atenuación A_t y el desfase ϕ residuales entre el movimiento real $y(t)$ del simulador de movimiento y la magnitud medida ideal $y_m(t)$ a partir de la magnitud medida real $y(t)$ y de la magnitud medida ideal $y_m(t)$;
- se determina dicho numerador $Rr(z^{-1})$ en función de la pulsación ω_c tomada como parámetro, de la atenuación y del desfase residuales determinados en la etapa de estimación, por resolución en línea del sistema de ecuación:

$$\frac{H(1)}{W(1)} \cdot \frac{Rr(1)}{Fr(1)} = 1$$

$$\frac{H(e^{-j\omega_c T_e})}{W(e^{-j\omega_c T_e})} \cdot \frac{Rr(e^{-j\omega_c T_e})}{Fr(e^{-j\omega_c T_e})} = \frac{1}{At} e^{-j\varphi}$$

- se adapta el filtrado de la consigna con el valor determinado de $Rr(z^1)$.

5 8. Procedimiento de condicionado según la reivindicación 7, caracterizado porque dicha etapa de estimación de la atenuación y del desfase residuales se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo, un algoritmo de los mínimos cuadrados.

10 9. Procedimiento de condicionado según una de las reivindicaciones 6 a 8, caracterizado porque comprende una etapa inicial de estimación de la pulsación de dicha señal de consigna.

15 10. Procedimiento de condicionado según la reivindicación 9, caracterizado porque dicha etapa de estimación de la pulsación se basa en un algoritmo de identificación recursivo, por ejemplo, un algoritmo de los mínimos cuadrados generalizados.

20 11. Procedimiento de condicionado según una de las reivindicaciones 6 a 10, caracterizado porque se pone en práctica mediante un programa informático que comprende una serie de instrucciones adecuadas para ser cargadas en la memoria de un ordenador y para ser ejecutadas por el calculador de dicho ordenador para generar una señal de mando $u(t)$ del simulador de movimiento.

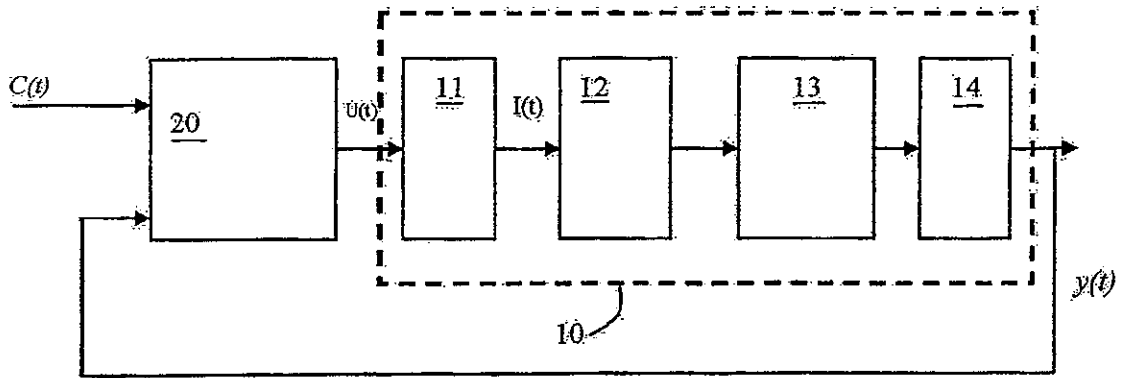


Fig. 1

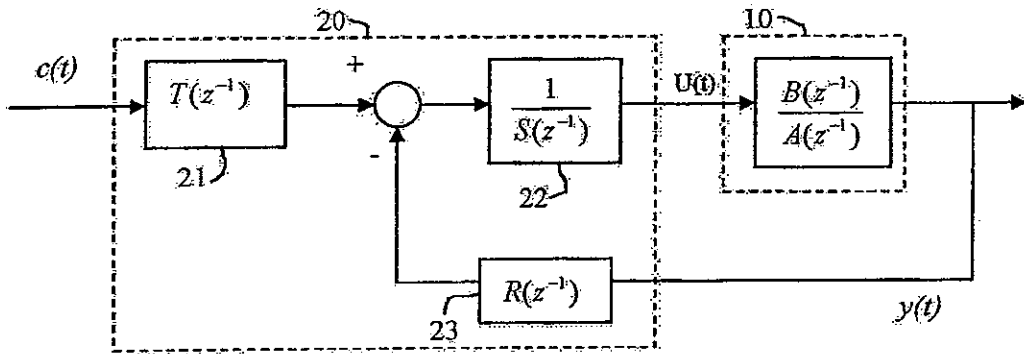


Fig. 2

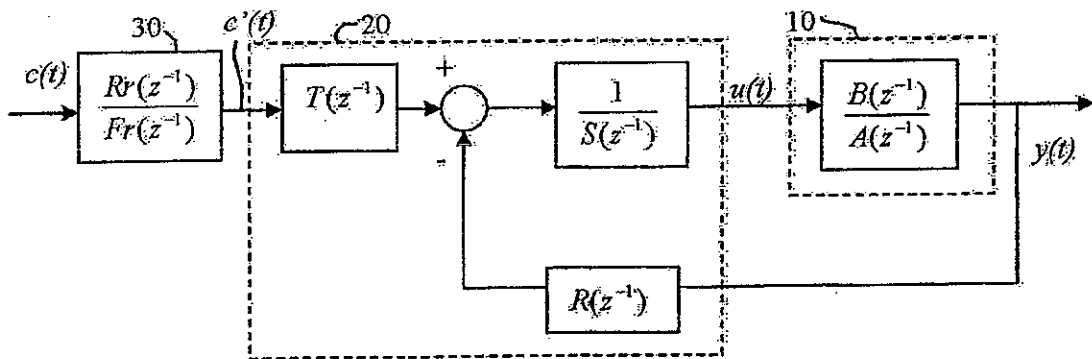


Fig. 3

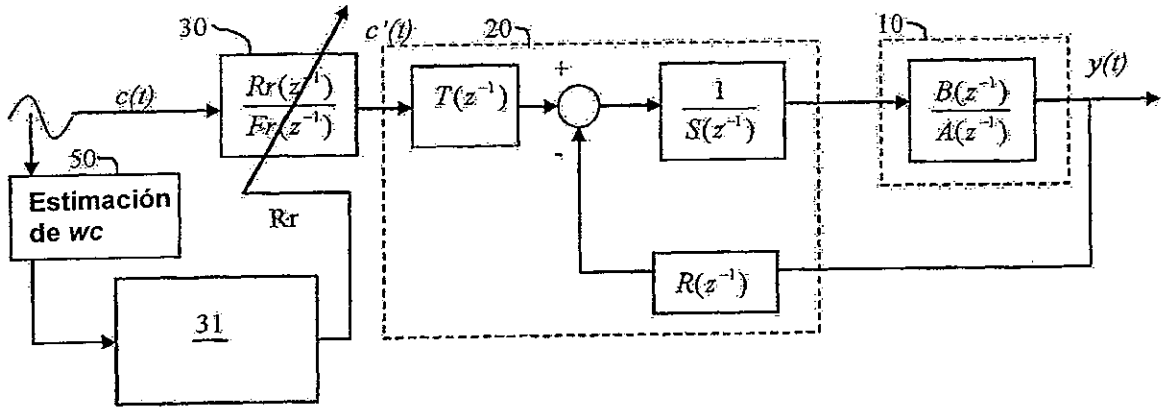


Fig. 4

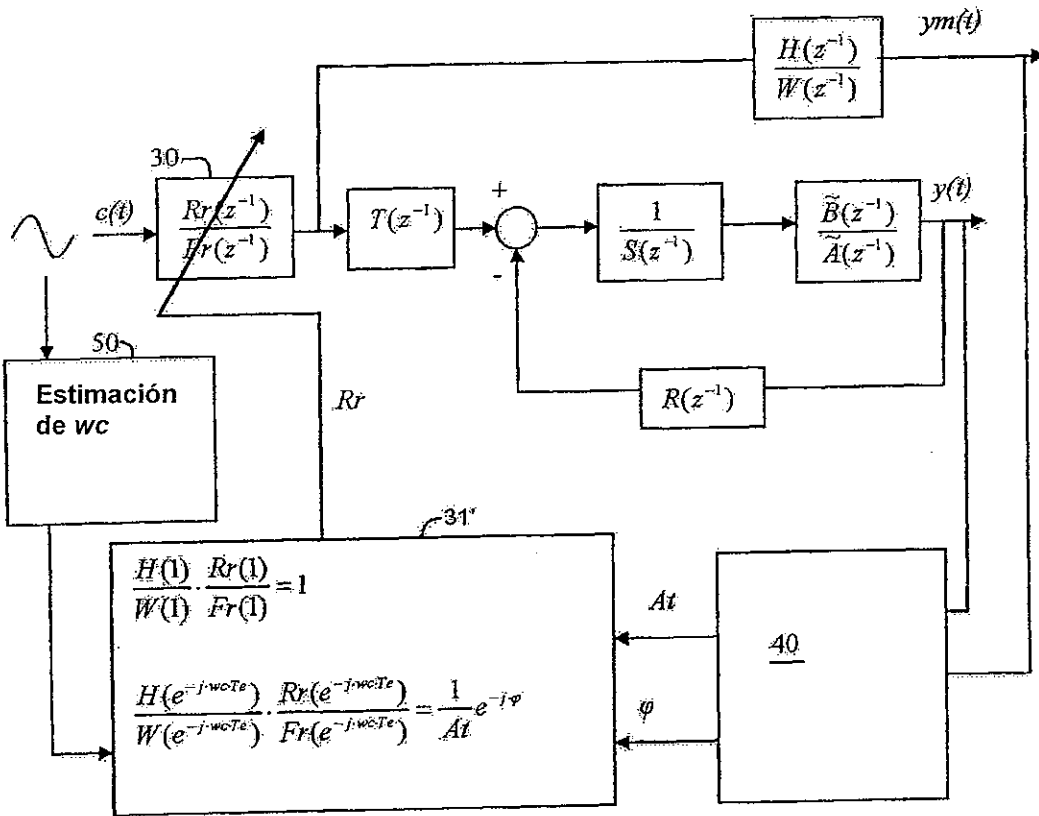


Fig. 5