(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 371 268**

(51) Int. Cl.:
B21B 37/28 (2006.01)
G01B 11/30 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Número de solicitud europea: **06747867 .7**
(96) Fecha de presentación: **08.06.2006**
(97) Número de publicación de la solicitud: **1899085**
(97) Fecha de publicación de la solicitud: **19.03.2008**

(54) Título: **MÉTODO Y DISPOSITIVO PARA OPTIMIZAR EL CONTROL DE LA PLANEIDAD EN LA LAMINACIÓN DE UNA BANDA.**

(30) Prioridad:
08.06.2005 SE 0501406

(45) Fecha de publicación de la mención BOPI:
29.12.2011

(45) Fecha de la publicación del folleto de la patente:
29.12.2011

(73) Titular/es:
ABB AB
KOPPARBERGSVÄGEN 2
721 83 VÄSTERAS, SE

(72) Inventor/es:
BERGSTEN, Pontus

(74) Agente: **No consta**

ES 2 371 268 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo para optimizar el control de la planeidad en la laminación de una banda.

CAMPO TÉCNICO

Esta invención se refiere a un método y a un dispositivo para el control de la planeidad para productos laminados usando cualquier número de actuadotes mecánicos o de otro tipo.

La planeidad de un producto laminado, una banda, se determina mediante el perfil de separación entre rodillos entre los rodillos de trabajo del laminador y el perfil de espesor de la banda laminada. Puede influirse entonces en la planeidad de la banda mediante la manipulación de diferentes dispositivos de control que afectan al perfil de separación entre rodillos de trabajo. Tales actuadores pueden ser dispositivos mecánicos tales como dispositivos de curvatura de rodillos de trabajo, de curvatura de rodillos intermedios, de inclinación o de basculamiento, desplazamiento de rodillos intermedios, actuadores de corona superior o dispositivos térmicos tales como de enfriamiento/calentamiento de rodillos de trabajo, etc.

La presente invención se refiere a un método y a un dispositivo para determinar los puntos de ajuste para los dispositivos de control (o actuadores) usando una estructura de control especial que consiste en cualquier controlador multivariable lineal junto con una parametrización especial de la desviación entre la planeidad medida real y la planeidad objetivo deseada, usando las propiedades de los actuadores, tales como efectos de planeidad y limitaciones físicas, en la parametrización, con el fin de influir en la planeidad de la banda de una manera óptima de modo que se obtenga la planeidad de banda deseada.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Los dispositivos de control o actuadores en un laminador influyen en la planeidad de la banda de diferentes formas afectando al perfil de separación entre rodillos de los rodillos de trabajo.

Una condición para un control de la planeidad de alto rendimiento es tener un acceso continuo a la planeidad real a través de la banda, es decir, un perfil de planeidad. Con un perfil de planeidad conocido, el laminador puede dotarse de un sistema de control de la planeidad que, basándose en el perfil de planeidad medido y en un perfil de planeidad de referencia u objetivo dado, calcula puntos de ajuste para los dispositivos de control disponibles, logrando un control de la planeidad en bucle cerrado, véase la figura 1. El control de la planeidad comprende varios dispositivos de ejecución, lo que significa que tiene que realizarse un procedimiento de evaluación relativamente complejo con el fin de decidir acerca de la magnitud de las diversas acciones de los dispositivos de control que proporcionan el mejor resultado.

Un dispositivo de medición podría diseñarse como un rodillo de medición de metal, con aproximadamente 16-64 puntos de medición ubicados a través de la banda, que en la mayoría de los casos puede colocarse entre el puesto de laminado y el carrete de bobinado sin el uso de rodillos deflectores. Un rodillo de medición de este tipo es el "*Stressometer*" producido por ABB. La medición tiene lugar con la ayuda de transductores de fuerza, basándose en, por ejemplo, el principio magnetoelástico, y principalmente proporciona la distribución de tensión de la banda a lo largo del rodillo de medición. Si la tensión es mayor que la tensión de combado para el material, la lámina se comba cuando se deja la banda libre sin influencia alguna de una fuerza de tracción. La distribución de tensión es un perfil de planeidad para la banda a través de la dirección de laminación. Dependiendo de la tecnología del dispositivo que mide la planeidad y de la velocidad de laminación actual, puede obtenerse una nueva medición del perfil de planeidad completa a través de la banda con una frecuencia de cada 4 ms (milisegundos).

Cuando se lamina una banda, es importante mantener el perfil de planeidad deseado en todo momento. La desviación con respecto a la planeidad deseada puede dar como resultado roturas de banda costosas. La tarea del sistema de control de la planeidad es por tanto llevar el perfil de planeidad real lo más próximo posible al perfil de planeidad deseado, lo que supone grandes exigencias en un sistema de este tipo, en lo que se refiere a la precisión y velocidad de cálculo.

TÉCNICA ANTERIOR

La técnica del control de la planeidad se describe en diferentes publicaciones, tales como:

M. J. Grimble, y J. Fotakis, "The Design of Strip Shape Control Systems for Sendzimir Mills", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-27, N.º 3, 1982.

J. V. Ringwood, "Shape Control Systems for Sendzimir Steel Mills", IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 8, N.º 1, 2000.

A. Wolff, F. Gorgels, M. Jelali, R. Lathe, G. Mücke, U. Müller, y W. Ungerer, “State of the Art and Future Trends in Metal Processing Control”, In Proceedings of the 3:rd European Rolling Conference, Düsseldorf, Alemania , 16-18 de junio de 2003.

M. Jelalu, U. Müller, A. Wolff, y W. Ungerer, “Advanced Control Strategies for Rolling Mills”, Metallurgical Plant and Technology International, N.º 3, 2001.

S. R. Duncan, J. M. Allwood, y S. S. Garimella, “The Analysis and Design of Spatial Control Systems in Strip Metal Rolling”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 6, N.º 2, 1988.

En el documento US 6.721.620 también se presenta un método para controlar la planeidad durante la laminación. El perfil de planeidad de la banda real se mide y se parametriza usando polinomios ortogonales. Se genera una desviación del error de planeidad usando un perfil de planeidad de referencia deseado parametrizado mediante los mismos polinomios ortogonales. Entonces se genera una variable controlable usando un esquema combinado de control predictivo basado en modelo / control de modo interno.

La presente invención difiere de esta técnica anterior mediante el uso de una arquitectura de control más clásica que trabaja el perfil de error de planeidad directamente (que no se expresa en términos de polinomios ortogonales). El perfil de desviación de la planeidad actual a través de la banda se parametriza usando la descomposición en valores singulares (SVD) de un modelo de laminado en línea (la matriz de laminado), de modo que los puntos de ajuste de los actuadores producidos por el siguiente controlador multivariable lineal (al que se proporciona el error parametrizado), no violan las limitaciones físicas de los actuadores. La presente invención permite el control de cualquier tipo de actuador.

El uso de métodos de control de la planeidad tradicionales basados en la inversión directa de la matriz de laminado para laminadores en frío de múltiples actuadores a menudo plantea los siguientes problemas:

1. La inversión directa del modelo de laminado (matriz de laminado) puede hacer que el sistema de control sea sensible a errores de modelo, lo que puede producir inestabilidad o movimientos innecesarios de varios actuadores.

2. Todos los actuadores se usan simultáneamente. Sin embargo, debido al desacoplamiento no perfecto, los actuadores no se controlan de manera independiente, lo que significa que pequeños movimientos de un actuador pueden producir grandes movimientos de otros actuadores y llevar a éstos a condiciones límite.

3. Los problemas anteriores pueden dar como resultado que los operarios del laminador tiendan a usar algunos actuadores en modo manual.

La presente invención parametriza el perfil de error de planeidad usando sólo los modos de curvatura significativa extraídos usando la SVD de la matriz de laminado, lo que da como resultado un comportamiento de control más estable y robusto, y que se resuelvan los problemas anteriores.

SUMARIO DE LA INVENCIÓN

La invención se refiere a un método y a un dispositivo que optimizan las acciones de cualquier número de dispositivos de control (o actuadores) para el control de la planeidad de una banda y comprende un método para la evaluación robusta de las acciones de control así como un dispositivo de evaluación/cálculo, que constituye una parte integral del equipo de control.

Los métodos de control de la planeidad tradicionales para laminadores en frío de múltiples actuadores a menudo dan como resultado diferentes problemas. El sistema puede ser sensible, por ejemplo, a errores de modelo que producen inestabilidad o movimientos innecesarios de varios actuadores. Aunque los actuadores se usen simultáneamente, los actuadores no son independientes, lo que significa que pequeños movimientos de un actuador pueden producir grandes movimientos de otros actuadores y llevar a éstos a condiciones límite. Tras algún tiempo, los operarios del laminador también tienden a usar algunos actuadores en modo manual, lo que no es deseable.

El objeto de la presente invención es resolver los problemas mencionados anteriormente, y crear un sistema de control de la planeidad mejorado, estable y robusto, que en cualquier momento dado use las combinaciones óptimas de los actuadores disponibles.

Los objetos de la presente invención se logran mediante un método para optimizar el control de la planeidad en la laminación de una banda usando cualquier número de actuadores, que comprende:

- usar un modelo de laminado representado por una matriz de laminado que contiene información del efecto de planeidad de cada actuador,

- traducir el efecto de planeidad de cada actuador en un sistema de coordenadas, cuya dimensión es menor o igual que el número de actuadores usados,

- monitorizar/muestrear los valores de planeidad reales a través de la banda,

- calcular un vector del error/desviación de planeidad como la diferencia entre la planeidad de la banda monitorizada/muestreada y un vector de planeidad de referencia,

- convertir el error de planeidad en un vector de error de planeidad parametrizado más pequeño,

- usar un controlador dinámico para calcular puntos de ajuste de los actuadores optimizados con el fin de minimizar el error de planeidad parametrizado,

logrando de ese modo la planeidad de banda deseada.

El método de la presente invención crea un sistema de control de la planeidad mejorado, estable y robusto, que en cualquier momento dado usa las combinaciones óptimas de los actuadores disponibles.

El método también reducirá el problema de control a un problema con menos bucles de control, pero que al mismo tiempo usa todos los actuadores simultáneamente. El número de bucles de control se determina por el número de efectos de planeidad significativos que pueden producir diferentes combinaciones de actuadores. El número de efectos significativos se deduce a su vez de la distribución de los valores singulares de la matriz de laminado.

Además, la invención permitirá que los operarios usen completamente el modo automático, lo que mejorará el rendimiento del laminador en lo que se refiere a menor cantidad de residuos producidos y una mayor velocidad de laminación manteniendo la misma calidad.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para entender mejor la presente invención, se hará referencia a los siguientes dibujos/figuras.

La figura 1 ilustra un esquema de un laminador con un puesto de laminado en el que se sitúan los dispositivos de control, actuadores, disponibles, un dispositivo de medición de la planeidad, y el sistema de control de la planeidad que calcula los puntos de ajuste para los actuadores.

La figura 2 ilustra la arquitectura de control de la presente invención y su relación con los otros componentes en el laminador.

La figura 3 ilustra un diagrama de flujo básico para las diferentes etapas del método en el presente sistema de control de la planeidad.

DESCRIPCIÓN DE LA REALIZACIÓN PREFERIDA

Tal como se da a conocer en la figura 1, un sistema 1 de control de la planeidad se integra en un sistema que comprende un puesto 2 de laminado que tiene varios actuadores 3 y rodillos 4. Una desbobinadora 5 alimenta una banda 6 hacia y a través del puesto 2 de laminado por lo que la banda 6 pasa por un dispositivo 7 de medición de la planeidad o medio de detección de la tensión, por ejemplo un "*Stressometer*", y se enrolla en una bobinadora 8. El puesto de laminado puede controlar la inclinación, curvatura y/o desplazamiento de los rodillos 4. El producto resultante del procedimiento de laminación es una banda 6 laminada con una planeidad deseada.

El sistema 1 de control de la planeidad se diseña en torno a varios bloques básicos avanzados, tal como puede observase en la figura 2, con todas las funcionalidades requeridas.

Se compara una referencia 9 de planeidad con la planeidad de la banda medida en un comparador 10. El error de planeidad e resultante se alimenta a una unidad 11 de parametrización del error de planeidad que también se alimenta con señales de una primera unidad 12 que representa las limitaciones del actuador actual y señales de una segunda unidad 13 que representa un modelo de la información de banda del actuador, la matriz de laminado G_M. El vector de error de planeidad

parametrizado e^p resultante se alimenta a un controlador 14 multivariable/dinámico que convierte la información en espacio de actuador y saturación de limitación de actuador. Al mismo tiempo, un modelo dinámico G del sensor de planeidad y transporte de banda de los actuadores se alimenta al controlador 14 multivariable desde una tercera unidad 15. El sistema de coordenadas u resultante se alimenta al puesto 2 de laminado y a los actuadores 3.

Diferentes condiciones de laminación pueden requerir que tengan que manejarse diferentes compensaciones y estrategias de control dependiendo de la banda laminada, por ejemplo, de su anchura, espesor y material. Es importante manejar las limitaciones físicas que tienen todos los actuadores. Éstas pueden ser la carrera, mín./máx., límites de velocidad de salto (velocidad) y límites de carrera relativos, por ejemplo, límites de escalón en laminadores en grupo. Todas estas limitaciones también pueden ser variables.

La figura 3 da a conocer un diagrama de flujo de las funciones del sistema de control de la planeidad. El método comprende:

A. usar un modelo de laminado representado por una matriz de laminado que contiene información del efecto de planeidad de cada actuador,

B. traducir el efecto de planeidad de cada actuador en un sistema de coordenadas, cuya dimensión es menor o igual que el número de actuadores usados,

C. monitorizar/muestrear los valores de planeidad reales a través de la banda,

D. calcular un vector del error/desviación de planeidad como la diferencia entre la planeidad de la banda monitorizada/muestreada y un vector de planeidad de referencia,

E. convertir el error de planeidad en un vector de error de planeidad parametrizado más pequeño,

F. usar un controlador dinámico para calcular puntos de ajuste de los actuadores optimizados con el fin de minimizar el error de planeidad parametrizado,

G. alimentar las señales de control a los actuadores y lograr de ese modo la planeidad de banda deseada.

La presente invención usa un método de parametrización de error de planeidad avanzado para manejar las diferentes limitaciones de los actuadores. Existen métodos en la bibliografía que se basan en la estructura del sistema de control de la planeidad básico: una etapa de parametrización del error de planeidad seguida por un controlador dinámico, no tiene en cuenta explícitamente las limitaciones de actuador en la etapa de parametrización del error de planeidad.

La presente invención resuelve este problema obteniendo la parametrización del error de planeidad de tal modo que no se viola ninguna limitación de actuador. Esta característica es crucial con el fin de obtener el máximo partido del actuador disponible para el control de la planeidad.

En la práctica, actuadores diferentes pueden ponerse en cualquier momento en modo auto o manual, por lo que el sistema de control de la planeidad debe poder enfrentarse a tales situaciones. La presente invención tiene en cuenta explícitamente el manejo del modo directamente en la etapa de parametrización.

Esta invención resuelve este problema realizando la parametrización del error de planeidad de tal forma que el control de la planeidad es óptimo aunque uno o más actuadores se dispongan en modo manual y no puedan usarse por el control de la planeidad.

La invención resuelve el problema del control de la planeidad usando las siguientes suposiciones:

1. El sistema de control puede controlarse por eventos, es decir, las muestras de planeidad llegan de una manera basada en eventos, o controlarse cíclicamente, es decir, las muestras de planeidad llegan de manera cíclica.

2. La parametrización del error de planeidad puede ser cualquier tipo de proyección lineal. Por tanto, se permite cualquier matriz de parametrización G_p, donde pueda usarse la descomposición en valores singulares, SVD, para obtener un tipo de tal matriz.

3. El controlador dinámico puede ser cualquier tipo de controlador lineal de tiempo discreto con un término directo. Cualquier controlador de este tipo puede escribirse de forma estado-espacio:

donde:

$x_c(k)$ es el vector de estado del controlador interno,

y_c (k) es el vector de entrada del controlador, que puede ser una concatenación del error de planeidad parametrizado e^p y cualquier otra variable de laminado, y

A(k), B(k), C(k), D(k) son matrices del controlador que pueden variar de la muestra. Esto es necesario con el fin de enfrentarse a los cambios en la dinámica del sistema, tales como dinámica de actuador variable y retraso en el transporte de la banda entre la separación entre rodillos y el dispositivo de medición de la planeidad.

Las siguientes dos etapas se llevan a cabo en cada nueva muestra de planeidad y(k):

1. Parametrización del error de planeidad usando cualquier matriz de parametrización G_p y un método de mínimos cuadrados limitado para calcular los parámetros del error de planeidad e^p de modo que no se violen los límites de actuador, y

2. El controlador dinámico se ejecuta con el e^p calculado con el fin de obtener las señales de control u que van a aplicarse a los actuadores mecánicos.

Las características más importantes de la invención son la construcción de la matriz de parametrización G_p y el mapeo relacionado de las salidas del controlador con respecto a las entradas del actuador en caso de que se use la parametrización del error de planeidad basada en SVD y la formulación de un problema de optimización convexo limitado que puede calcular el error de planeidad parametrizado e^p en tiempo real de modo que no se violen las limitaciones de actuador.

La presente invención obtiene una formulación de optimización limitada del problema de la parametrización del error de planeidad. Dado el siguiente controlador multivariable de tiempo discreto

donde

e $y_m(k)$ es cualquier variable del procedimiento de laminado, el problema de parametrización de la planeidad se formula, según la invención, como:

de manera que

donde $C_{ieq}(k)$ y $d_{ieq}(k)$ se construyen, usando los parámetros del controlador C(k), D(k) y $x_c(k)$, de modo que la señal de control u(k) no viola la amplitud, velocidad de salto y límites de actuador. También es posible especificar los límites relativos entre actuadores diferentes. La matriz $C_{eq}(k)$ se construye de modo que la cantidad de error de planeidad parametrizado $e^p(k)$ que va al actuador i a través del término directo D(k) sea cero si el actuador i no debe usarse para el control automático.

A continuación se presenta la formulación de las matrices de mapeo y parametrización para la parametrización del error de planeidad basada en SVD. Dada una matriz de laminado $G_M(k)$ y su descomposición en valores singulares $U(k)\cdot\Sigma(k)\cdot V^T(k)$, la matriz de parametrización viene dada por las primeras N_p columnas en U(k) lo que corresponde a los primeros N_p elementos diagonales en $\Sigma(k)$ que son significativamente mayores que cero, por tanto:

Si el controlador dinámico se escoge para que realice su control en el espacio de parámetro de error de planeidad, por ejemplo, un controlador de PI por cada parámetro de error de planeidad, las salidas del controlador deben mapearse con respecto al espacio de actuador. Este mapeo M se forma como

Por tanto, la salida del controlador mapeada viene dada como

La ventaja de la presente invención es la formulación general de un problema de optimización convexa que facilita el uso de métodos de parametrización del error de planeidad tanto sencillos como avanzados, siempre que puedan describirse por una matriz de parametrización G_p, junto con un controlador multivariable lineal, de modo que se tengan en cuenta el manejo del modo y las limitaciones de actuador.

La invención usa en cualquier momento dado las combinaciones óptimas de los actuadores disponibles. Matemáticamente significa que se usa una versión mejorada de la SVD (descomposición en valores singulares) para la parametrización del error de planeidad. La mejora consiste en usar las propiedades de actuador en la parametrización. Las propiedades de

actuador que se consideran son por ejemplo velocidad, efecto de planeidad y alcance de trabajo.

La invención reducirá el problema de control a un problema con menores bucles de control pero al mismo tiempo usará todos los actuadores simultáneamente. El número de bucles de control se determina por el número de valores de SVD usados. También permitirá que los operarios usen completamente el modo automático, lo que mejorará el rendimiento del laminador.

Se observa que aunque lo anterior describe realizaciones a modo de ejemplo de la invención, existen varias variaciones y modificaciones que pueden realizarse a la solución dada a conocer sin apartarse del alcance de la presente invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para optimizar el control de la planeidad en la laminación de una banda (6) usando cualquier número de puestos (2) de laminado y actuadores (3), **caracterizado por**,

- usar un modelo (13) de laminado representado por una matriz de laminado (G_M) que contiene información del efecto de planeidad de cada actuador,
- traducir el efecto de planeidad de cada actuador en un sistema de coordenadas (u), cuya dimensión es menor o igual que el número de actuadores (3) usados,
- monitorizar/muestrear los valores de planeidad reales a través de la banda (6),
- calcular un vector del error/desviación de planeidad (e) como la diferencia entre la planeidad de la banda monitorizada/muestreada y un vector (9) de planeidad de referencia,
- convertir el error de planeidad (e) en un vector de error de planeidad parametrizado (e^p) más pequeño,
- usar un controlador (14) dinámico para calcular puntos de ajuste de los actuadores optimizados con el fin de minimizar el error de planeidad parametrizado (e^p),

logrando de ese modo la planeidad de banda deseada.

2. Método según la reivindicación 1, **caracterizado porque**,
- el controlador dinámico usado es un controlador multivariable lineal.

3. Método según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado por**,
- calcular el error de planeidad parametrizado (e) usando las diferentes propiedades de actuador tales como velocidad, límites de posición relativa entre actuadores diferentes, límites de posición absoluta, los efectos de planeidad de actuador y/u otras limitaciones físicas de los actuadores.

4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por**
- calcular el error de planeidad parametrizado (e) usando el conocimiento del estado y/o parámetros del controlador multivariable lineal así como las diferentes propiedades de actuador.

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por**,
- usar una traducción de vuelta al sistema de coordenadas de actuador original si el controlador multivariable produce señales de control en un espacio de una dimensión distinta a del número de actuadores.

6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por**,
- usar descomposición en valores singulares SVD cuando se traduce el efecto de planeidad de cada actuador en el sistema de coordenadas.

7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por**,
- proyectar el error de planeidad al espacio abarcado por los vectores de base del sistema de coordenadas usado para describir el efecto de planeidad de los actuadores, cuando se convierte el error de planeidad (e) en un vector de error de planeidad parametrizado (e^p) más pequeño.

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por**,
- trabajar en tiempo real cuando se calcula el error de planeidad parametrizado (e^p).

9. Sistema (1) para optimizar el control de la planeidad en la laminación de una banda (6) usando cualquier número de puestos (2) de laminado y actuadores (3), **caracterizado por**,
- usar un modelo (13) de laminado representado por una matriz de laminado (G_M) que contiene información del efecto de planeidad de cada actuador (3),
- traducir el efecto de planeidad de cada actuador en un sistema de coordenadas (u), cuya dimensión es menor o igual que el número de actuadores (3) usados,
- monitorizar/muestrear los valores de planeidad reales a través de la banda (6),
- calcular un vector del error/desviación de planeidad (e) como la diferencia entre la planeidad de la banda monitorizada/muestreada y un vector (9) de planeidad de referencia,
- convertir el error de planeidad (e) en un vector de error de planeidad parametrizado (e^p) más pequeño,
- usar un controlador (14) dinámico para calcular puntos de ajuste de los actuadores optimizados con el fin de minimizar el error de planeidad parametrizado (e^p),
- logrando de ese modo la planeidad de banda deseada.

10- Sistema según la reivindicación 9, **caracterizado porque**,

- el controlador dinámico es un controlador multivariable lineal.

11. Sistema según la reivindicación 9 ó 10, **caracterizado por**,
- medios para calcular el error de planeidad parametrizado (e) usando las diferentes propiedades de actuador tales como velocidad, límites de posición relativa entre actuadores diferentes, límites de posición absoluta, los efectos de planeidad de actuador y/u otras limitaciones físicas de los actuadores.

12. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 9-11, **caracterizado por**,
- medios para calcular el error de planeidad parametrizado (e) usando el conocimiento del estado y/o parámetros del controlador multivariable lineal así como las diferentes propiedades de actuador.

13. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 9-12, **caracterizado por**,
- medios para traducir de vuelta al sistema de coordenadas de actuadores original si el controlador multivariable produce señales de control en un espacio de una dimensión distinta a la del número de actuadores.

14. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 9-13, **caracterizado por**,
- medios para usar descomposición en valores singulares SVD cuando se traduce el efecto de planeidad de cada actuador en el sistema de coordenadas.

15. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 9-14, **caracterizado por**,
- medios para proyectar el error de planeidad al espacio abarcado por los vectores de base del sistema de coordenadas usado para describir el efecto de planeidad de los actuadores, cuando se convierte el error de planeidad (e) en un vector de error de planeidad parametrizado (e^p) más pequeño.

16. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 9-15, **caracterizado por**,
- medios para trabajar en tiempo real cuando se calcula el error de planeidad parametrizado (e^p).

17. Programa informático que comprende códigos de programa informático para llevar a cabo las etapas de un método según cualquiera de las reivindicaciones 1-8.

18. Medio legible por ordenador que comprende un programa informático según la reivindicación 17.

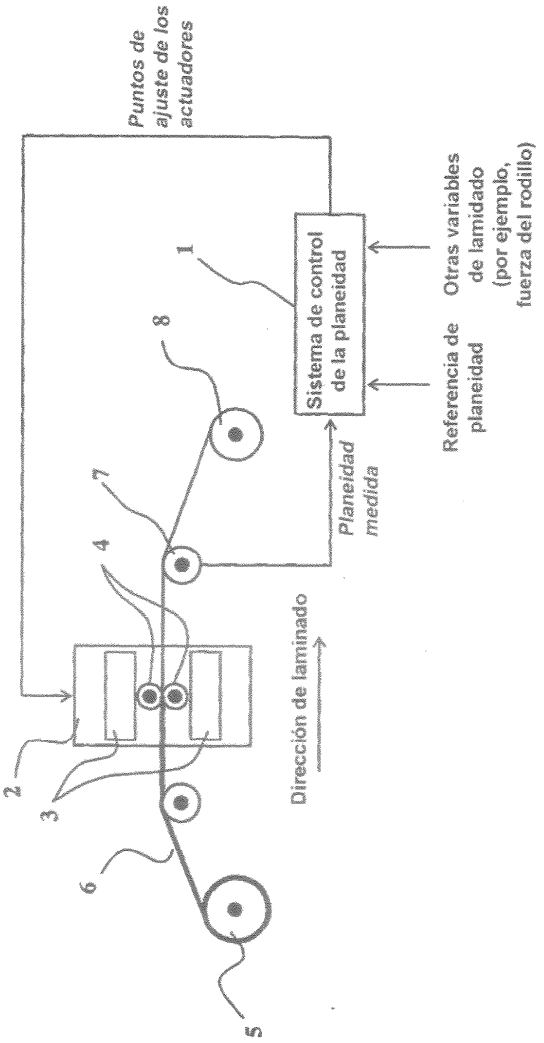
Puntos de ajuste de los actuadores
Sistema de control de la planeidad
Otras variables de laminado (por ejemplo, fuerza del rodillo)
Referencia de planeidad
Planeidad medida
Dirección de laminado
1
2
3
4
5
6
7
8

Figura 1

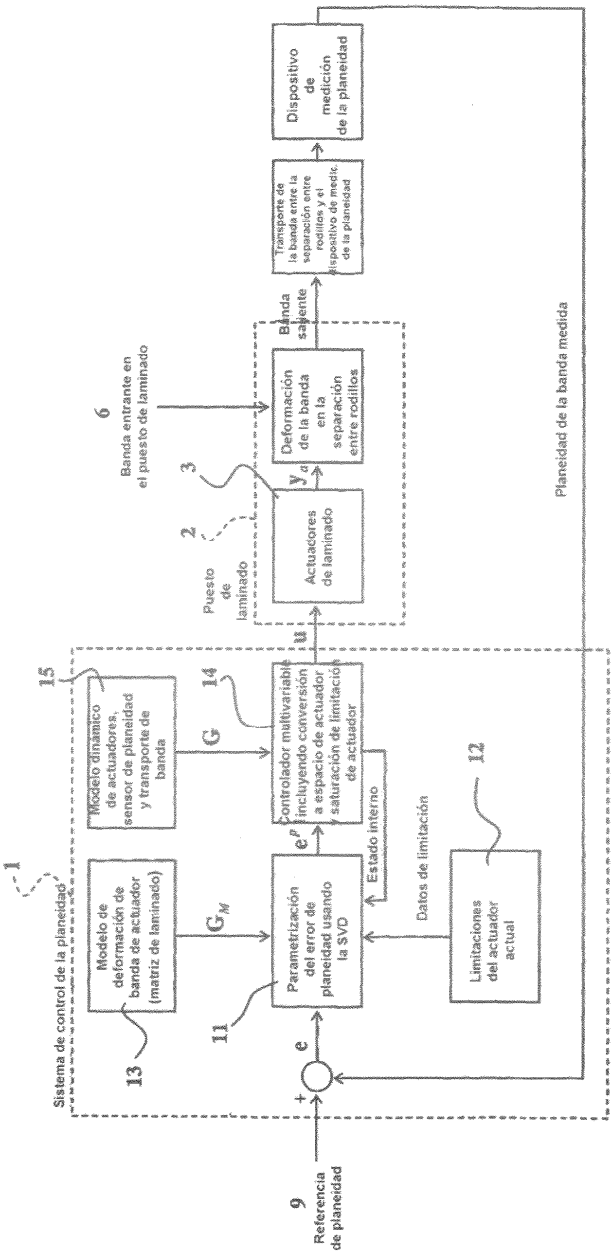

Figura 2

e – error de planeidad
e^P – error de planeidad parametrizado
u – puntos de ajuste de los actuadores
y_a – posiciones de los actuadores
G_M – matriz de laminado
G – matriz de modelo dinámico

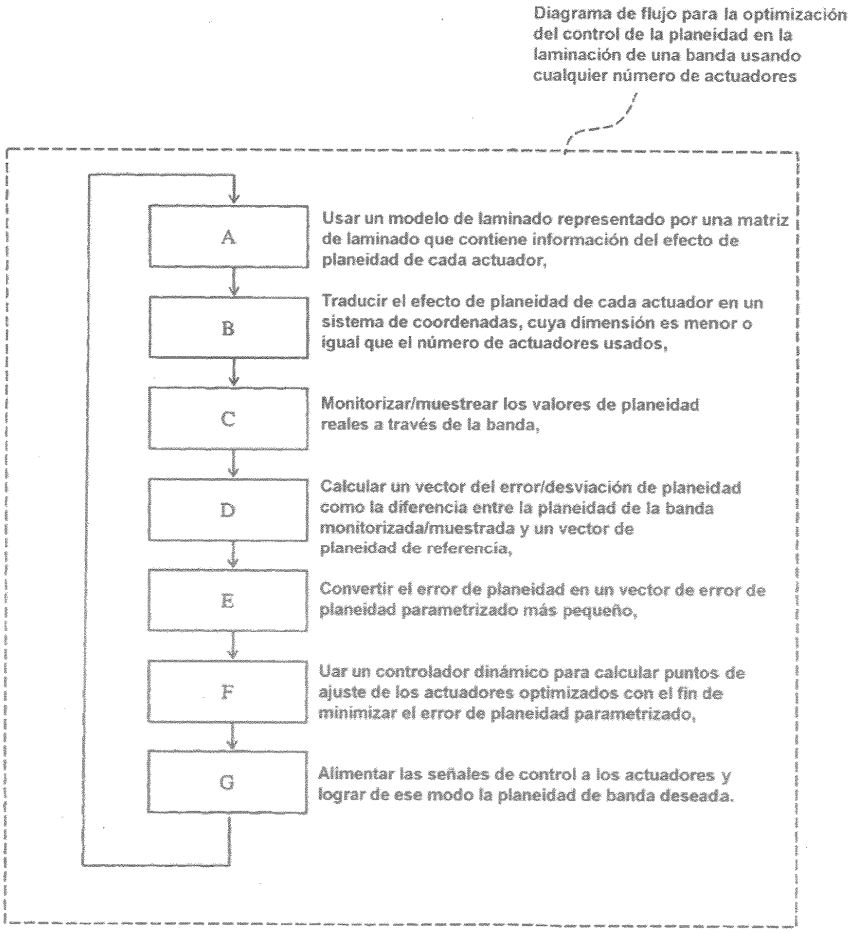
Diagrama de flujo para la optimización del control de la planeidad en la laminación de una banda usando cualquier número de actuadores
A
Usar un modelo de laminado representado por una matriz de laminado que contiene información del efecto de planeidad de cada actuador,
B
Traducir el efecto de planeidad de cada actuador en un sistema de coordenadas, cuya dimensión es menor o igual que el número de actuadores usados,
C
Monitorizar/muestrear los valores de planeidad reales a través de la banda,
D
Calcular un vector del error/desviación de planeidad como la diferencia entre la planeidad de la banda monitorizada/muestrada y un vector de planeidad de referencia,
E
Convertir el error de planeidad en un vector de error de planeidad parametrizado más pequeño,
F
Uar un controlador dinámico para calcular puntos de ajuste de los actuadores optimizados con el fin de minimizar el error de planeidad parametrizado,
G
Alimentar las señales de control a los actuadores y lograr de ese modo la planeidad de banda deseada.

Figura 3