

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 437 469**

51 Int. Cl.:

B21B 13/14 (2006.01)

B21B 37/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.03.2011** **E 11160050 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2013** **EP 2505276**

54 Título: **Método de control de la planeidad en el laminado de una banda y sistema de control correspondiente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.01.2014

73 Titular/es:

ABB RESEARCH LTD. (100.0%)
Affolternstrasse 44
8050 Zürich, CH

72 Inventor/es:

HOLM, MARKUS W y
MODÉN, PER-ERIK

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 437 469 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 de control de la planeidad en el laminado de una banda y sistema de control correspondiente

Campo técnico

5 La presente invención se refiere en general al control del laminado de una banda en un tren de laminación, y en particular a un método para el control de la planeidad del laminado de una banda, y a un sistema de control y a un paquete de programas informáticos para llevar a cabo el método.

Antecedentes

10 Bandas tales como bandas de acero, o bandas hechas de otros metales, pueden ser sometidas a un proceso de reducción de espesor, por ejemplo, por laminación en frío o laminación en caliente en un tren de laminación. La pieza de trabajo, es decir, la banda, se desenrolla de una desbobinadora, se procesa en el tren de laminación, y se enrollada en una bobinadora.

15 Un tren de laminación comprende rodillos con un conjunto de rodillos dispuesto por encima de la banda y otro conjunto de rodillos dispuesto por debajo de la banda cuando la banda pasa a través del tren de laminación. El tren de laminación está dispuesto para recibir la banda entre dos rodillos de trabajo que forman una separación entre rodillos. Los rodillos restantes proporcionan control adicional y presión a los rodillos de trabajo, controlando de este modo el perfil de la separación entre rodillos y de ahí la planeidad de la banda a medida que avanza a través de la separación entre rodillos.

20 Un tren de laminación múltiple comprende una pluralidad de rodillos apilados como capas por encima y por debajo de los rodillos de trabajo. Los rodillos de apoyo, es decir, los rodillos superiores de los rodillos dispuestos por encima de la separación entre rodillos y los rodillos inferiores de los rodillos dispuestos por debajo de la separación entre rodillos, pueden estar segmentados. Cada segmento de rodillo puede ser introducido y retirado del tren de laminación mediante accionadores de corona. Los movimientos de los rodillos segmentados se extienden a través del grupo de rodillos hacia los rodillos de trabajo para formar la banda en movimiento a través de la separación entre rodillos. El resto de los rodillos del tren de laminación múltiple también pueden ser accionados mediante sus respectivos accionadores. Accionadores de flexión pueden, por ejemplo, proporcionar efectos de flexión a un rodillo al que están asignados y cambiar por ello el perfil de la separación entre rodillos. Rodillos de desplazamiento lateral pueden tener forma no cilíndrica que altere el perfil de separación entre rodillos mediante desplazamiento axial de los rodillos de desplazamiento lateral a través de accionadores de desplazamiento lateral.

30 Una planeidad uniforme por toda la anchura de la banda es normalmente deseable ya que una planeidad no uniforme puede dar como resultado, por ejemplo, la fabricación de una banda con menor calidad que una banda que tenga un perfil de planeidad esencialmente uniforme. Una banda que tiene una planeidad no uniforme puede estar, por ejemplo, combada o parcialmente corrugada. Una planeidad no uniforme también puede producir roturas de banda debido a un aumento de tensión a nivel local. Por lo tanto, el perfil de planeidad de la banda se mide, por ejemplo, midiendo la fuerza aplicada por la banda a un rodillo de medición, antes de que la banda se enrolle en la bobinadora, en donde los datos de planeidad medidos se proporcionan a un sistema de control que controla los accionadores del tren de laminación para controlar la separación entre rodillos del tren de laminación de manera que se pueda obtener una planeidad uniforme de la banda.

40 El documento WO 2006/002784 A1 da a conocer un método y un dispositivo para medir y ajustar la planeidad y/o la tensión de una banda de acero inoxidable durante la laminación en frío en una caja de laminación de 4 rodillos provista de al menos un bucle de control que comprende varios accionadores, comprendiendo el método determinar el defecto de la planeidad mediante la comparación de un vector de tensión con una curva de referencia prescrita, descomponer la curva del defecto de la planeidad con respecto a la anchura de la banda en vectores de tensión proporcionales en un módulo analítico en una aproximación matemática y suministrar proporciones de defectos de la planeidad determinadas mediante valores numéricos reales a módulos de control asociados para activar los accionadores correspondientes.

45 Con el fin de controlar los accionadores, el tren de laminación se diseña generalmente mediante una función de respuesta de la planeidad para cada uno de los accionadores del tren de laminación. Éstas, por ejemplo se pueden reunir como columnas en una matriz, a veces denominada matriz de tren de laminación, G_m .

50 En un tren de laminación que tiene una pluralidad de accionadores, tal como un tren de laminación múltiple, uno de ellos puede tener dependencia lineal entre las respuestas de la planeidad. Esto significa que puede haber combinaciones de posiciones de accionadores que no afectan a la planeidad de la banda debido a que la respuesta

de la planeidad combinada proporcionada por los accionadores cancela los efectos de la planeidad proporcionados por cada accionador individual.

5 Para trenes de laminación en los que puede surgir la situación descrita anteriormente, se dice que la matriz de tren de laminación correspondiente es singular. En términos matemáticos, una matriz de tren de laminación singular no tiene rango completo, es decir, el espacio nulo de la matriz de tren de laminación tiene una dimensión mayor de cero.

10 Un proceso de control clásico implica un bucle de control por accionador, con el vector de error de la planeidad proyectado a un valor por bucle de control. Para trenes de laminación que tienen una matriz de tren de laminación singular esto deriva en un movimiento tal de los accionadores que en algunos casos la planeidad de la banda no se verá afectada, debido a que la proyección de error permite todas las combinaciones posibles de posiciones de accionadores. Esto se corresponde con el movimiento del accionador en el espacio nulo de la matriz de tren de laminación. Perturbaciones repetidas harán que los accionadores vaguen por las direcciones que no influyen directamente en la planeidad. También existe el riesgo de que estos movimientos de accionador lleguen demasiado lejos. Estos dos casos de comportamiento no deseado pueden hacer que los accionadores se saturen, aunque también le supone al accionador una carga y un desgaste innecesarios.

20 Para hacer frente a este problema, la matriz de tren de laminación G_m se puede representar en la forma de su descomposición de valores singulares $G_m = U\Sigma V^T$. Los valores singulares de G_m , que forman la diagonal de Σ obtenida a partir de la descomposición de valores singulares, proporcionan información de la magnitud de la respuesta de la planeidad proporcionada por cada una de las combinaciones de posiciones de accionadores, como se define mediante los vectores columna de la matriz ortonormal V para formas de planeidad según lo definido por las columnas de la matriz ortonormal U . Por otra parte, la descomposición de valores singulares proporciona información referente a las posiciones de los accionadores que no influyen directamente en el perfil de planeidad de la separación entre rodillos, es decir, el espacio nulo.

25 Si se parametriza el error de la planeidad utilizando la respuesta de planeidad en las direcciones que sí influyen en la planeidad, y se mapean las salidas del controlador utilizando sólo las direcciones que sí influyen en la planeidad, se puede bloquear el movimiento de los accionadores en direcciones que no influyan en la planeidad. De este modo, se evitarán las combinaciones de posiciones de accionadores que no afecten al perfil de planeidad de la separación entre rodillos.

30 La descomposición de valores singulares de la matriz de tren de laminación se ha descrito en, por ejemplo, "Shape Control Systems for Sendzimir Steel Mills" de John V. Ringwood y publicado en IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 8, nº 1, enero de 2000.

35 Si se utiliza descomposición de valores singulares como se describió anteriormente para evitar combinaciones de las posiciones de accionadores que no afecten a la planeidad de la banda, no todos los grados de libertad de control estarán disponibles para el control en el sentido de que algunas combinaciones de posiciones de accionadores no van a ser permitidas. Por lo tanto, el rendimiento del control puede verse afectado. Por otra parte, también puede ser difícil ajustar de manera satisfactoria los bucles de control separados, ya que cada bucle de control incluye varios accionadores y por tanto tiene una dinámica más compleja.

40 En vista de lo anterior, existe por tanto una necesidad de proporcionar un mejor control de la planeidad de una banda en trenes de laminación que tienen una configuración tal que el movimiento de varios accionadores en algunos casos no afecta a la planeidad de la banda.

Resumen

Un objeto general de la presente invención es mejorar el control de la planeidad al laminar una banda en un tren de laminación.

45 Otro objeto de la presente invención es mejorar el control de la planeidad al laminar una banda en un tren de laminación que tiene una matriz de tren de laminación singular.

En un primer aspecto de la presente invención, estos objetos se consiguen mediante un método que proporciona control de la planeidad al laminar una banda en un tren de laminación que comprende una pluralidad de rodillos controlables mediante accionadores, comprendiendo el método:

a) recibir datos de medición de la planeidad referentes a una planeidad de la banda,

b) determinar un error de planeidad como una diferencia entre una planeidad de referencia de la banda y los datos de medición de la planeidad,

5 c) determinar un error de planeidad ajustado en base al error de planeidad y a ponderaciones para las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de planeidad por debajo de un valor umbral, y

d) utilizar (S4) el error de planeidad ajustado para controlar los accionadores a fin de controlar con ello la planeidad de la banda.

Por accionador se entiende generalmente un conjunto de accionadores que controlan un rodillo o un segmento de rodillo de un rodillo segmentado, tal como un rodillo de apoyo.

10 Mediante la determinación de un error de planeidad ajustado en base al error de planeidad y a las ponderaciones para las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de planeidad por debajo de un valor umbral, el proceso de control por lo general no va a utilizar combinaciones de posiciones de accionadores que correspondan a vectores o direcciones en el espacio nulo del modelo, por ejemplo, el espacio nulo de la matriz de tren de laminación. Sin embargo, en algunas situaciones, las combinaciones de posiciones de accionadores, que corresponden a vectores en el espacio nulo del modelo pueden ser permitidas, es decir, el criterio de ecuación (2) en algunos casos va a ser minimizado permitiendo dichas combinaciones de posiciones de accionadores. De esta manera se pueden utilizar todas las combinaciones posibles de posiciones de accionadores, es decir, todos los grados de libertad del sistema de control que aplica el presente método. En particular, la invención utiliza un bucle de control por accionador. Por lo tanto, las limitaciones que afectan a un accionador no limitan el movimiento de los otros accionadores. Además, no hay necesidad de un ajuste independiente de accionadores virtuales, ya que no hay ninguno.

25 Una combinación de posiciones de accionadores se define aquí como un conjunto de posiciones de accionadores que incluye cada accionador del tren de laminación. Una combinación de posiciones de accionadores no proporciona un efecto de planeidad a una banda si la combinación de posiciones de accionadores corresponde a un vector en el espacio nulo de la matriz de tren de laminación. Todas las demás combinaciones de posiciones de accionadores proporcionan un efecto de planeidad a una banda.

El paso c) puede comprender proporcionar limitaciones para controlar salidas de unidades de control que controlan los accionadores.

El paso c) puede comprender otorgar ponderaciones al error de planeidad ajustado.

30 El paso c) puede comprender otorgar ponderaciones a las salidas de unidades de control.

La determinación en el paso c) puede comprender la utilización del error de planeidad para determinar una diferencia entre el error de planeidad y un mapeo del error de planeidad ajustado mediante un modelo que representa el tren de laminación.

La determinación del error de planeidad ajustado puede implicar una minimización.

35 Las ponderaciones pueden otorgar ponderaciones individuales para cada combinación de posiciones de accionadores.

De ese modo la cantidad del error de planeidad que se proyecta a las direcciones de baja ganancia puede reducirse selectivamente. Aquí direcciones de baja ganancia corresponden a las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de baja o ninguna planeidad.

40 La determinación en el paso c) puede comprender otorgar ponderaciones adicionales para las diferencias de posiciones de accionadores con el fin de optimizar la colocación entre los accionadores.

La determinación en el paso c) puede comprender otorgar ponderaciones adicionales para las desviaciones desde las posiciones preferidas de los accionadores.

45 Dado que están presentes todos los grados de libertad, es posible optimizar la colocación de los accionadores. Términos de criterios adicionales pueden, por ejemplo, proporcionar desventajas para diferencias entre accionadores adyacentes, si esto es desfavorable en lo que se refiere al desgaste para tenerlos colocados en lugares muy diferentes. A veces habrá una posición preferida para un accionador, o para una serie de accionadores. En tales casos, la optimización puede incluir un peso, es decir, una ponderación, para desviarlo de esa posición.

La determinación del error de planeidad ajustado puede implicar tener en cuenta todas las posibles combinaciones de posiciones de accionadores.

5 Un usuario puede ajustar las ponderaciones a través de una interfaz de usuario. De este modo los usuarios, por ejemplo, ingenieros encargados, pueden, de una manera simplificada, ser capaces de entender el control de las unidades de control y ajustar las mismas sin la necesidad de comprender el complicado problema de control multivariable.

En un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un paquete de programas informáticos que comprende un código de programa de almacenamiento de medio legible por ordenador que cuando se ejecuta lleva a cabo el método de acuerdo con el primer aspecto de la presente invención.

10 De acuerdo con un tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de control para proporcionar control de la planeidad al laminar una banda en un tren de laminación que comprende una pluralidad de rodillos controlables por medio de accionadores, en el que el sistema de control comprende:

una unidad de entrada dispuesta para recibir datos de medición referentes a una planeidad de la banda, y

15 un sistema de procesamiento dispuesto para determinar un error de planeidad como una diferencia entre una planeidad de referencia de la banda y los datos de medición; para determinar un error de planeidad ajustado en base al error de planeidad y a las ponderaciones para las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de planeidad por debajo de un valor umbral, y

una unidad de control,

20 en el que el sistema de procesamiento está dispuesto para proporcionar el error de planeidad ajustado a la unidad de control, la cual está dispuesta para controlar los accionadores en base al error de planeidad ajustado.

La unidad de control puede estar dispuesta para proporcionar salidas de control individuales a cada uno de los accionadores.

Una realización puede comprender un bucle de control por accionador.

Otras características y ventajas se describen a continuación.

25 Breve descripción de los dibujos

La invención y sus ventajas se describirán ahora a modo de ejemplos no limitativos, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

La figura 1 es una vista en perspectiva de un tren de laminación múltiple.

La figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control.

30 La figura 3 es un organigrama que ilustra un método para proporcionar control de la planeidad al laminar una banda en un tren de laminación que comprende una pluralidad de rodillos controlables por medio de accionadores.

Descripción detallada

35 La figura 1 muestra una vista en perspectiva de una disposición de rodillo 1. La disposición de rodillo comprende un tren de laminación múltiple 2, una desbobinadora 3 y una bobinadora 5. El tren de laminación múltiple 2, denominado en lo sucesivo tren de laminación 2, se puede utilizar para laminar materiales duros, por ejemplo, para laminar en frío una banda de metal.

Una banda 7 puede ser desenrollada de la desbobinadora 3 y enrollada en la bobinadora 5. La banda 7 se somete a un proceso de reducción de espesor mediante el tren de laminación 2 a medida que la banda 7 se desplaza de la desbobinadora 3 a la bobinadora 5.

40 El tren de laminación 2 comprende una pluralidad de rodillos 9-1 y 9-2, que incluye rodillos de trabajo 19-1 y 19-2, respectivamente. Los rodillos 9-1 forman un grupo de rodillos superiores por encima de la banda 7. Los rodillos 9-2 forman un grupo de rodillos inferiores por debajo de la banda 7. El tren de laminación 2 que se ejemplifica es un tren de laminación de 20 rodillos con los rodillos 9-1 y 9-2 dispuestos en una formación 1-2-3-4 por encima y por debajo de la banda 7, respectivamente. No obstante, debe observarse que la presente invención es igualmente aplicable a
45 otros tipos de trenes de laminación.

- 5 Cada rodillo puede ser accionado por medio de accionadores (no mostrados) con el fin de deformar los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2 y de ese modo ajustar una separación entre rodillos 21 que se forma entre los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2. El proceso de reducción del espesor de la banda 7 se obtiene cuando la banda pasa por la separación entre rodillos 21. Los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2 por tanto están en contacto con la banda 7 cuando la banda 7 se desplaza a través del tren de laminación 2.
- 10 Cada uno de la pluralidad de rodillos 9-1 y 9-2 comprende rodillos de apoyo, tales como rodillos de apoyo 11-1, 11-2, 11-3 y 11-4, que forman un conjunto exterior de rodillos del tren de laminación 2. Cada rodillo de apoyo está segmentado en una pluralidad de segmentos 13. Cada uno de los segmentos 13 puede ser controlado por accionadores. Los segmentos 13 pueden ser movidos, mediante accionadores, hacia o en dirección opuesta a los rodillos de trabajo 19-1, 19-2. El movimiento de los segmentos giratorios 13 se extiende a través del grupo de rodillos hacia el rodillo de trabajo 19-1 y/o el rodillo de trabajo 19-2 para formar la banda 7 que se desplaza a través de la separación entre rodillos 21.
- 15 Con el fin de proporcionar un control adicional del proceso de reducción del espesor de la banda 7, los rodillos 9-1 y 9-2 comprenden además rodillos intermedios 15 y 17 dispuestos entre los rodillos de trabajo 19-1, 19-2 y los rodillos de apoyo 11-1, 11-2, 11-3, 11-4. Los rodillos intermedios 15 y 17 pueden tener, por ejemplo, accionadores de flexión y/o accionadores de desplazamiento lateral, respectivamente.
- 20 La disposición de rodillo 1 comprende además un dispositivo de medición 23, ejemplificado aquí mediante un rodillo de medición. El dispositivo de medición 23 tiene una extensión axial más ancha que la anchura de la banda 7 para permitir la medición de la fuerza a lo largo de la anchura de la banda 7.
- 25 El dispositivo de medición 23 comprende una pluralidad de sensores. Los sensores pueden, por ejemplo, ser distribuidos en aberturas de la superficie periférica del dispositivo de medición para detectar las fuerzas aplicadas por la banda al dispositivo de medición. A medida que la banda 7 se desplaza sobre el dispositivo de medición 23, se puede obtener un perfil de tensión de banda mediante los sensores. Un perfil de tensión de banda que tiene una distribución de fuerzas uniforme, indica que la banda tiene un espesor uniforme a lo largo de su anchura. Un perfil de tensión de banda que no es uniforme indica que la banda tiene una planicidad no uniforme a lo largo de su anchura en la posición medida asociada de la banda.
- El perfil de tensión de banda medido, convertido en un perfil de planeidad deducido, se proporciona como datos de medición Y a un sistema de procesamiento 29 del sistema de control 25 en la figura 2 mediante el dispositivo de medición 23.
- 30 Los datos de medición son procesados por el sistema de control 25 para controlar los rodillos 9-1 y 9-2 mediante los accionadores del tren de laminación 2 a fin de proporcionar con ello una planeidad uniforme a lo largo de la anchura de la banda 7. Un método para proporcionar el control de la planeidad de acuerdo con el presente concepto inventivo se describirá a continuación con más detalle con referencia a las figuras 2 y 3.
- 35 La figura 2 muestra un diagrama de bloques esquemático del sistema de control 25. El sistema de control 25 comprende una unidad de entrada 27, un sistema de procesamiento 29, y una unidad de control 33. El sistema de procesamiento 29 puede comprender, en una realización, la unidad de control 33. Alternativamente, el sistema de procesamiento y la unidad de control pueden ser unidades separadas.
- El sistema de procesamiento 29 comprende software con el fin de ser capaz de llevar a cabo el presente método de control.
- 40 La unidad de control 33 está dispuesta para proporcionar una pluralidad de salidas de control u a los accionadores A para controlar con ello la separación entre rodillos. En una realización, la unidad de control 33 está dispuesta para proporcionar una salida de control individual u por accionador A. Preferiblemente, hay un bucle de control por accionador A.
- La unidad de control 33 puede comprender, por ejemplo, reguladores PI que pueden ser aplicados al software.
- 45 En el paso S1, la unidad de entrada 27 está dispuesta para recibir datos de medición Y del dispositivo de medición 23. Los datos de medición Y comprenden mediciones de la pluralidad de sensores del dispositivo de medición 23. Se puede considerar que los datos de medición Y son un vector, con cada elemento representando un valor de medición de un sensor.
- 50 La unidad de entrada 27 está dispuesta para recibir datos de planeidad de referencia r referentes a una planeidad de referencia deseada de la banda 7. Los datos de planeidad de referencia r son típicamente un vector que comprende el mismo número de valores de referencia que el número de los valores de medición de los datos de medición Y.

Un error de planeidad e puede ser determinado por el sistema de procesamiento 29 en un paso S2 por la diferencia entre la planeidad de referencia de la banda y los datos de medición Y.

5 El error de planeidad e se ajusta para obtener un error de planeidad ajustado e_p . El error de planeidad ajustado e_p debe ser interpretado como un error de planeidad parametrizado, es decir, el error de planeidad ajustado e_p es una parametrización del error de planeidad e.

Con el fin de determinar el error de planeidad ajustado e_p , una matriz de tren de laminación G_m , utilizada en el control de los accionadores, y que describe la respuesta de planeidad de estado estacionario del tren de laminación, se descompone en su forma de descomposición en valores singulares, como se muestra en la ecuación (1).

$$G_m = U\Sigma V^T = [U_1 U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \approx U_1 \Sigma_1 V_1^T \quad (1)$$

10 Mediante la descomposición en valores singulares de la matriz de tren de laminación, el criterio de la ecuación (2) incluye términos que proporcionan cargas, es decir, ponderaciones, al error de planeidad ajustado e_p , y a las salidas de control u para los accionadores en direcciones correspondientes para separar valores singulares de la matriz de tren de laminación. De este modo, el control puede llegar a ser más efectivo a pesar de una matriz de tren de laminación singular.

15 La matriz Σ es una diagonal con los valores singulares de G_m en su diagonal. La matriz U_1 está asociada a los efectos de planeidad proporcionados por combinaciones específicas de posiciones de accionadores, es decir, configuraciones de accionadores, que proporcionan un efecto de planeidad a la separación entre rodillos y que están definidas por los vectores de alineación de la matriz V_1^T . Cada dirección de la matriz V_1^T , es decir, cada vector de alineación, representa así una combinación específica de las posiciones de accionadores. Los valores singulares que forman la diagonal de la matriz Σ_1 representan la magnitud del efecto de planeidad para las combinaciones de posiciones de accionadores de la matriz V_1^T .

20 La matriz V_2 está asociada a esas combinaciones de posiciones de accionadores que no proporcionan ningún efecto de planeidad y los valores singulares que forman la diagonal de la matriz Σ_2 son cercanos a cero o son igual a cero. En particular, los vectores columna de la matriz V_2 abarcan el espacio nulo de la matriz de tren de laminación G_m . En la práctica, los valores singulares que se ven como cero para fines de control pueden ser los valores singulares que están por debajo de un valor umbral de efecto de planeidad predeterminado. Como ejemplo, valores singulares que son un factor de 10^{-3} menor que el mayor valor singular pueden configurarse como cero. Los vectores columna de V que corresponden a estos valores singulares se definen por tanto para abarcar el espacio nulo de la matriz de tren de laminación G_m .

25 El error de planeidad ajustado e_p se determina en un paso S3 en base a la minimización de la ecuación (2) que se indica a continuación. La determinación del error de planeidad ajustado e_p se basa en la diferencia entre un mapeo del error de planeidad ajustado e_p mediante la matriz de tren de laminación G_m , y el error de planeidad e, añadiéndose al mismo tiempo cargas, es decir, ponderaciones, al error de planeidad ajustado y a las salidas u de unidades de control y respetando las limitaciones a las salidas de unidades de control. Tales limitaciones pueden ser, por ejemplo limitaciones extremas, es decir, posiciones mínimas y máximas permitidas o posiciones posibles de los accionadores. Las limitaciones también pueden referirse a limitaciones de velocidad, es decir, a qué velocidad se permite que se muevan los accionadores, o a qué velocidad se pueden mover. Por otra parte, las limitaciones pueden referirse a diferencias entre las posiciones de accionadores.

30 La parametrización de error puede ser vista como una proyección de las muchas mediciones originales sobre exactamente una medición por accionador, que es normalmente un número mucho menor.

$$e_p(t) = \arg \left(\min_{\substack{u(t) \in \\ \text{permitido}}} \left(\|G_m e_p(t) - e(t)\|^2 + e_p(t)^T V Q_e V^T e_p(t) + u(t)^T V Q_u V^T u(t) \right) \right) \quad (2)$$

La variable t en la ecuación (2) indica la dependencia temporal del error de planeidad e, el error de planeidad ajustado e_p , y las salidas u de unidades de control.

35 Las matrices Q_e y Q_u proporcionan ponderaciones a todas las direcciones de valores singulares de V para el error de planeidad ajustado e_p y a las salidas u de las unidades de control. Es decir, todas las direcciones de valores

singulares se tienen en cuenta para las ponderaciones, en particular, en las direcciones que están asociadas a valores singulares que son efectivamente igual a cero. Por lo tanto, también las direcciones del espacio nulo de la matriz de tren de laminación G_m se tienen en cuenta cuando se determina el error de planeidad ajustado e_p . De este modo, se pueden utilizar, si es necesario, todos los grados de libertad, es decir, todas las posibles combinaciones de posiciones de accionadores del tren de laminación. Normalmente, sin embargo, se evitan las combinaciones de posiciones de accionadores que no proporcionen ningún efecto de planeidad. Tales combinaciones normalmente no van a minimizar la ecuación (1), aunque esto pueda ocurrir, por ejemplo, en caso de saturación de accionador.

Las matrices Q_e y Q_u pueden ser matrices diagonales. Cada combinación de posiciones de accionadores puede ser ponderada de forma individual mediante Q_e y Q_u .

Los elementos de la diagonal de Q_e y Q_u pueden ser seleccionados por un usuario, por ejemplo, un ingeniero encargado, del tren de laminación 2 mediante un proceso de ajuste a través de una interfaz de usuario cuando se ajusta el sistema de control 25.

Cabe señalar que el presente método puede ser utilizado también en trenes de laminación que no tengan una matriz de tren de laminación singular, definiendo Q_e y Q_u para que sean igual a cero en el proceso de ajuste.

Los elementos de la diagonal de la matriz Q_e influyen en la retroalimentación de las perturbaciones en direcciones ortogonales diferentes de acuerdo con los valores singulares. El primer elemento está relacionado con el mayor valor singular, lo que implica la dirección en la que el proceso tiene la ganancia más alta y por lo tanto es más fácil de controlar, en el sentido de que requiere la menor ganancia de retroalimentación. Los siguientes elementos de la diagonal de la matriz Q_e corresponden a disminuir gradualmente valores singulares, requiriendo así la mayor ganancia de retroalimentación para alcanzar el mismo grado de corrección. Una efectividad inadecuada puede ser la consecuencia cuando se aplica una ganancia de retroalimentación demasiado alta. Por lo tanto, la elección de Q_e tiene gran influencia en la efectividad del bucle cerrado, ya que un elemento positivo reducirá la ganancia. Por lo tanto, los elementos de la matriz Q_e son preferiblemente positivos, es decir, mayores de cero o iguales a cero. De esta manera, se pueden atribuir cargas a direcciones de valores singulares, es decir, para combinaciones de posiciones de accionadores que no proporcionen ningún efecto de planeidad, o un efecto de planeidad por debajo del valor umbral del efecto de planeidad en el criterio de la ecuación (2) o (3) que se va a minimizar.

La matriz Q_e puede ser determinada mediante iteración en base a parámetros proporcionados por el usuario. Un primer parámetro puede referirse a un valor de pico máximo permitido de los valores singulares de la función de sensibilidad. La función de sensibilidad proporciona una medida de la efectividad del sistema de control, es decir, la sensibilidad del sistema de control para determinar errores.

El primer parámetro puede darse en la gama de 1,2 a 2,0. Los valores más bajos de la gama significan una demanda de mayor efectividad, mientras que los valores más altos de la gama permiten algún sacrificio en favor de un mayor ancho de banda para rechazar perturbaciones.

Un segundo parámetro puede estar relacionado con una interferencia cruzada máxima permitida, en tantos por ciento, desde una perturbación en una dirección de valor singular hasta errores de planeidad transitorios en otras direcciones de valores singulares.

Cada elemento de la diagonal de la matriz Q_u determina la ganancia de bucle cerrado de estado estacionario desde una perturbación de planeidad a lo largo de una dirección de valor singular para mover los accionadores a lo largo de su correspondiente dirección de valor singular.

La matriz Q_u puede determinarse mediante el uso de iteración en base a los parámetros proporcionados por el usuario.

Un primer parámetro puede referirse a la máxima ganancia de bucle cerrado de estado estacionario permitida desde perturbaciones de planeidad hasta accionadores en cualquier dirección. Un segundo parámetro puede referirse a una reducción requerida de perturbaciones de estado estacionario, en tantos por ciento, con ganancia limitada a la máxima ganancia de bucle cerrado de estado estacionario permitida desde perturbaciones de planeidad hasta accionadores en cualquier dirección, antes de que se abandone el control en esa dirección.

Generalmente, un valor por defecto puede ser proporcionado al segundo de los parámetros anteriores para determinar tanto Q_e como Q_u . El primer parámetro en ambos casos proporciona al usuario la posibilidad de poder influir de manera adecuada en el equilibrio entre el movimiento permitido del accionador y el rendimiento requerido.

Una realización implica determinar el error de planeidad ajustado minimizando la siguiente expresión.

$$e_p(t) = \arg \left(\min_{u(t) \in \text{perm. tid.}} \left((G_m e_p(t) - e(t))^T Z (G_m e_p(t) - e(t)) + e_p(t)^T V Q_e V^T e_p(t) + u(t)^T V Q_u V^T u(t) + u(t)^T Q_d u(t) \right) \right) \quad (3)$$

Además de la expresión de la ecuación (2), una matriz Z ha sido añadida, así como el término carga adicional a las salidas u de unidades de control.

5 La matriz Z otorga una ponderación a los diferentes sensores del dispositivo de medición 23 en su diagonal. La ponderación puede, por ejemplo, depender de diferentes anchuras de los sensores. En particular, los sensores colocados lateralmente del dispositivo de medición 23, es decir, los sensores en el borde de la banda, pueden no quedar plenamente cubiertos por la banda. Por lo tanto, es el ancho cubierto el que cuenta. Estos factores se tienen en cuenta por medio de la matriz Z.

10 Cabe señalar que en una realización, la matriz Z se puede utilizar en la minimización de la ecuación (2). En particular, la expresión anterior puede ser utilizada para determinar el error de planeidad ajustado aunque sin incluir el término $u^T Q_d u$.

15 La matriz Q_d puede no ser diagonal. Q_d es normalmente una matriz dispersa. La matriz Q_d optimiza las posiciones de los accionadores. Una relación entre algunos accionadores puede por ejemplo ser más favorable que otras. Es posible mediante el término Q_d otorgar una carga de, por ejemplo, tener una diferencia entre accionadores de corona adyacentes para los rodillos de apoyo segmentados.

En un paso S4, el error de planeidad ajustado determinado e_p puede ser utilizado por la unidad de control 33 para controlar los accionadores A con el fin de lograr una planeidad deseada de la banda 7 que se enrolla en el tren de laminación 2.

20 También se prevén otras aplicaciones del método presentado en este documento para procesos de control multivariantes que tienen una matriz singular o casi singular.

La persona experta en la técnica se da cuenta de que la presente invención de ninguna manera se limita a los ejemplos descritos aquí. Por el contrario, muchas modificaciones y variaciones son posibles dentro del ámbito de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para el control de la planeidad al laminar una banda (7) en un tren de laminación (2) que comprende una pluralidad de rodillos (9-1, 9-2) controlables mediante accionadores (A), comprendiendo el método:
- a) recibir (S1) datos de medición de planeidad (Y) referentes a una planeidad de la banda (7),
- 5 b) determinar (S2) un error de planeidad (e) como una diferencia entre una planeidad de referencia (r) de la banda (7) y los datos de medición de planeidad (Y),
- caracterizado por que el método comprende además
- c) determinar (S3) un error de planeidad ajustado (e_p) en base al error de planeidad (e) y a las ponderaciones para las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de planeidad por debajo de un valor
- 10 umbral, y
- d) utilizar (S4) el error de planeidad ajustado (e_p) para controlar los accionadores (A) a fin de controlar con ello la planeidad de la banda (7).
2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el paso c) comprende proporcionar limitaciones a salidas (u) de unidades de control que controlan los accionadores (A).
- 15 3. Método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que el paso c) comprende otorgar ponderaciones al error de planeidad ajustado (e_p).
4. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el paso c) comprende otorgar ponderaciones a las salidas de unidades de control.
5. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la determinación en el paso c) comprende utilizar el error de
- 20 planeidad (e) para determinar una diferencia entre el error de planeidad (e) y un mapeo del error de planeidad ajustado mediante un modelo que representa el tren de laminación.
6. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la determinación del error de planeidad ajustado en el paso c) implica una minimización.
7. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que las ponderaciones otorgan
- 25 ponderaciones individuales a cada combinación de posiciones de accionadores.
8. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la determinación en el paso c) comprende otorgar ponderaciones adicionales a las diferencias de posición de accionadores para optimizar la colocación entre los accionadores (A).
9. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que la determinación en el paso c) comprende otorgar ponderaciones adicionales a las desviaciones desde las posiciones preferidas de accionadores.
- 30 10. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la determinación del error de planeidad ajustado en el paso c) implica tener en cuenta todas las posibles combinaciones de posiciones de accionadores.
11. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que un usuario puede ajustar las
- 35 ponderaciones a través de una interfaz de usuario.
12. Paquete de programas informáticos que comprende un soporte legible por ordenador que almacena un código de programa que cuando se ejecuta, lleva a cabo el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.
13. Sistema de control (25) para el control de la planeidad al laminar una banda (7) en un tren de laminación (2) que
- 40 comprende una pluralidad de rodillos (9-1, 9-2) controlables mediante accionadores (A), en el que el sistema de control (25) comprende:
- una unidad de entrada (27) dispuesta para recibir datos de medición (Y) referentes a una planeidad de la banda (7), y

un sistema de procesamiento (29) dispuesto para determinar un error de planeidad (e) como una diferencia entre una planeidad de referencia (r) de la banda (7) y los datos de medición (Y); y

una unidad de control (33),

5 en el que el sistema de procesamiento (29) está dispuesto para proporcionar el error de planeidad ajustado a la unidad de control (33),

caracterizado por que

el sistema de procesamiento (29) está dispuesto además para determinar un error de planeidad ajustado (e_p) en base al error de planeidad (e) y a las ponderaciones para las combinaciones de posiciones de accionadores que proporcionan un efecto de planeidad por debajo de un valor umbral, y

10 la unidad de control (33) está dispuesta para controlar los accionadores (A) en base al error de planeidad ajustado (e_p).

14. Sistema de control (25) de acuerdo con la reivindicación 13, en el que la unidad de control (33) está dispuesta para proporcionar salidas de control individuales a cada uno de los accionadores (A).

15 15. Sistema de control (25) de acuerdo con la reivindicación 13 o 14, que comprende un bucle de control por accionador (A).

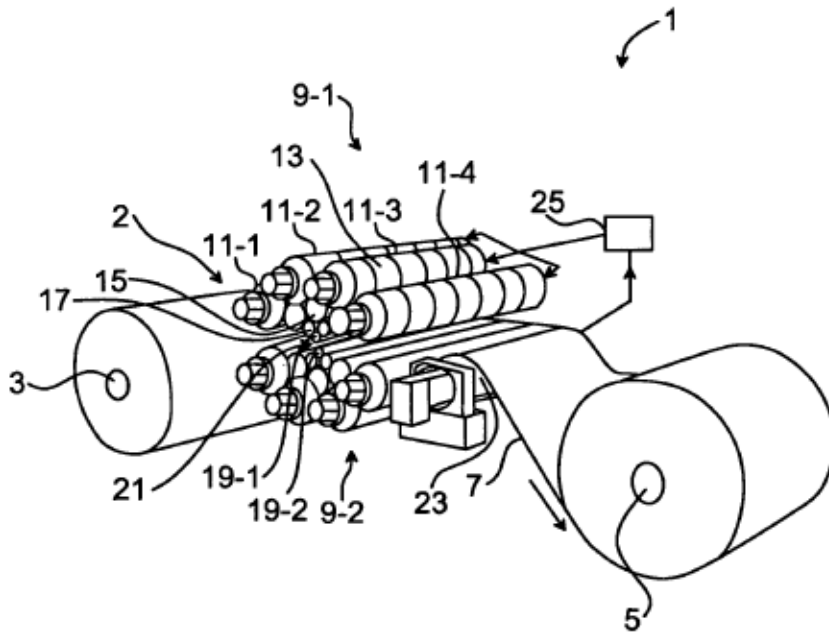


Fig. 1

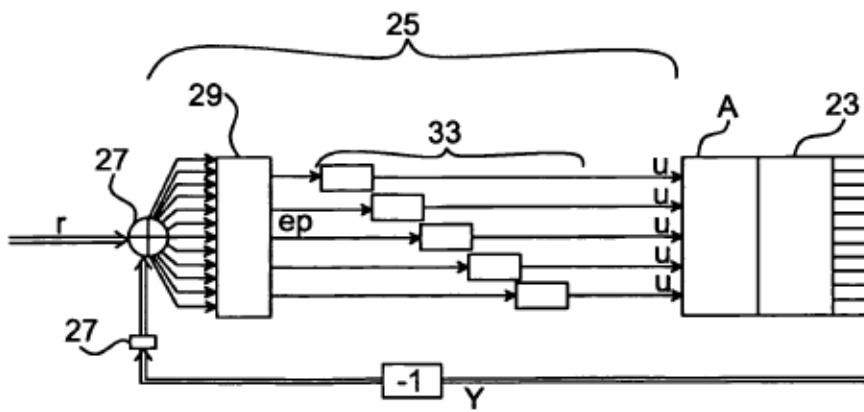


Fig. 2

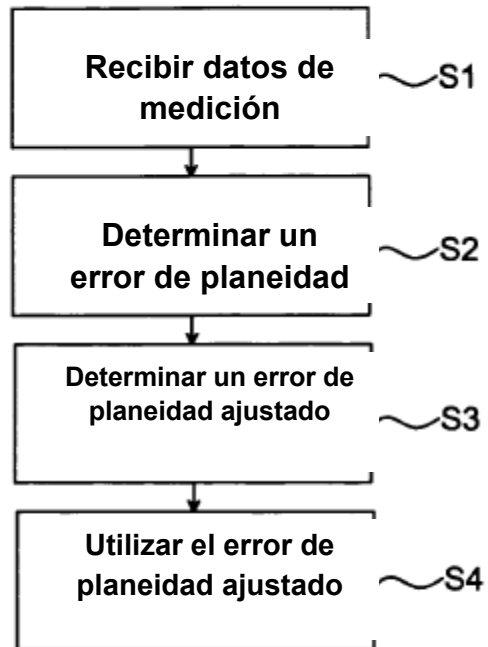


Fig. 3