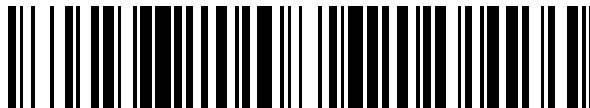


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 587 682**

51 Int. Cl.:

**G06T 13/20** (2011.01)

**G06T 17/00** (2006.01)

**G06F 17/50** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2003 E 03291682 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.05.2016 EP 1439476**

54 Título: **Técnicas gráficas por ordenador para modelar tela**

30 Prioridad:

**10.01.2003 KR 2003001614**

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

**26.10.2016**

73 Titular/es:

**FXGEAR INC. (100.0%)  
3F Samwon B/D, 592-11 Sinsa-dong, Gangnam-gu  
135-893 Seoul, KR**

72 Inventor/es:

**KO, HYEONG-SEOK**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

**ES 2 587 682 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

Técnicas gráficas por ordenador para modelar tela.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método para simular el movimiento de la tela y a unos soportes legibles por ordenador que almacenan un programa el cual ejecuta el método, y se refiere más particularmente a un modelo de pandeo inmediato, a un modelo de histéresis, y a un método de simulación de tela basado en los modelos inventados, y a soportes legibles por ordenador que almacenan el programa que ejecuta el método de simulación inventado. La deformación por fuerza de compresión aplicada en dos extremidades de la unidad de deformación que modela la tela se simula a través de un modelo de pandeo inmediato que flexa inmediatamente sin contracción. La deformación por fuerzas de estiramiento se simula mediante un modelo de resorte, mientras que las características de histéresis de la tela se modelan utilizando nuevos modelos de histéresis denominados "Modelo de histéresis discreto de Kwang-Jin Choi y Hyeong-Seok Ko" (al que en lo sucesivo en la presente se hace referencia como Modelo de histéresis discreto de Choi Ko) y "Modelo de histéresis continuo de Kwang-Jin Choi y Hyeong-Seok Ko" (al que en lo sucesivo en la presente se hace referencia como Modelo de histéresis continuo de Choi-Ko), mejorando así la simulación del movimiento de la tela y resolviendo el problema de inestabilidad del pandeo.

20 **Antecedentes de la invención**

En general, una estructura delgada se caracteriza por presentar una resistencia débil a la fuerza de flexión y una resistencia elevada a la fuerza de estiramiento, de tal manera que el movimiento de una estructura delgada se resuelve por medio de una ecuación rígida (un tipo de ecuación diferencial). Cuando se aplica una fuerza de compresión a una estructura delgada, se produce una contracción. A medida que se incrementa la fuerza de compresión de manera que supera un punto crítico, la estructura delgada flexa verticalmente, lo cual se conoce también como pandeo. El pandeo es una deformación que se produce bruscamente de modo que es una reacción muy inestable. Por lo tanto, la simulación de ese tipo de pandeo da como resultado un problema de divergencia en ecuaciones diferenciales para simular el movimiento de la tela.

La inestabilidad del pandeo hace referencia al contraste de la reducción de la fuerza de compresión y el aumento de la deformación por flexión. Esta inestabilidad estructural hace que la matriz del sistema resulte extremadamente mal condicionada o indefinida, y en un caso en el que se incrementa el periodo de tiempo de las fases de simulación, la matriz del sistema resulta divergente. En simulaciones convencionales del movimiento de la tela, se utiliza un modelo en el cual existe una inestabilidad de pandeo, de tal manera que resulta muy difícil simular un fenómeno de arrugas (pandeo) que se forman en la superficie de la tela.

El problema de inestabilidad del pandeo surge, no por la propia ecuación rígida, sino por la inestabilidad estructural de la tela. Por lo tanto, el simple uso de un método implícito no puede resolver el problema. La resolución del problema de inestabilidad del pandeo se buscó convencionalmente añadiendo un término de amortiguamiento a una matriz del sistema. No obstante, aunque la adición del término de amortiguamiento puede estabilizar el sistema, la misma es un impedimento para la naturalidad del movimiento de la tela. En otras palabras, la fuerza de amortiguamiento evita la formación de arrugas en la superficie de la tela, y evita la desaparición de las mismas. Por ello, para simular el movimiento de la tela no es deseable una simple adición de un término de amortiguamiento.

Además, un modelo de cuerpo continuo que se ha usado en el pasado producía un resultado no deseable debido a los siguientes motivos. Para garantizar un rendimiento razonable en las aplicaciones gráficas por ordenador debe permitirse una discretización gruesa. No obstante, un modelo de cuerpo continuo requiere una malla muy fina para simular una deformación grande de la tela. Por lo tanto, no puede obtenerse una velocidad de procesado razonable. Otro inconveniente es que el modelo de cuerpo continuo no puede hacer frente apropiadamente a la divergencia derivada del pandeo, requiriéndose así cálculos adicionales. [Eischen et al. 1996] usa un modelo de revestimiento no lineal para la simulación de la tela y lleva a cabo un análisis de elementos finitos para simular el pandeo. No obstante, se debe ser muy cuidadoso y adoptar medidas prudentes, tales como un control de las longitudes de los arcos, para evitar la divergencia debida a la no linealidad de la curva de carga-deformación o la singularidad de la matriz de rigidez instantánea provocada por el pandeo.

En [Baraff y Witkin 1998], se propuso como modelo un sistema de triángulos conectados. La energía de deformación en el plano, de cada triángulo, se obtiene a partir del mecanismo continuo. La deformación de flexión se basa en el ángulo entre triángulos adyacentes. Por tanto, la deformación de flexión y la deformación en el plano se modelan independientemente, lo cual permite una gran deformación de flexión entre los triángulos con independencia de la rigidez de cada triángulo en el plano, resolviéndose así el inconveniente del modelo de cuerpo continuo. No obstante, en este modelo sigue quedando la inestabilidad del pandeo ya que cada triángulo se modela como un material prácticamente incompresible y la rigidez de flexión entre triángulos es muy débil.

Todavía adicionalmente, para simular las características de histéresis del movimiento de la tela, se han usado directamente los resultados de medir las características de histéresis de dicha tela. No obstante, una curva de

5 respuesta histerética obtenida a través de la medición puede aplicarse únicamente cuando el cambio de la curva durante la medición y el cambio de la curva durante la simulación son iguales, de tal manera que en general no resulta apropiada para la simulación dinámica. En otras palabras, una curva de respuesta histerética es una función del historial de curvatura completo, de tal manera que no resulta razonable llevar a cabo la simulación midiendo la curva en lugar de construyendo un modelo físico para las características de histéresis.

10 [Choi y Ko, "Stable but Responsive Cloth" en *ACM Transactions on Graphics, 2002*] presentan técnicas de simulación de tela, y especialmente un análisis de deformación de flexión que hace uso de una unidad de deformación de una tela modelada en forma de una viga recta. El preámbulo de la reivindicación 1 está basado en este documento.

**Sumario de la invención**

15 Es un objetivo de la presente invención proporcionar un método para simular el movimiento de tela de manera realista, sin el requisito de mallas muy finas e intervalos de simulación cortos, utilizando un modelo sin la inestabilidad del pandeo.

20 Es otro objetivo de la presente invención proporcionar un método para simular el movimiento de la tela y soportes legibles por ordenador que almacenan un programa el cual ejecuta el método para expresar de forma precisa las características del movimiento de la tela y lograr una velocidad de simulación alta resolviendo la inestabilidad del pandeo.

25 Estos objetivos se logran a través de un método de simulación de acuerdo con la reivindicación 1 y un soporte legible por ordenador de acuerdo con la reivindicación 2.

**Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 es un dibujo para ilustrar el fenómeno de pandeo de un material rígido;

30 la figura 2 es un dibujo que representa una aproximación de la deformación de flexión de la tela de acuerdo con un modelo de pandeo inmediato;

35 la figura 3 es otro dibujo que representa una aproximación de la deformación de flexión de la tela de acuerdo con un modelo de pandeo inmediato;

la figura 4 es un ejemplo de deformación de tela en un estado de equilibrio;

40 la figura 5 es un gráfico para ilustrar la distancia entre partículas posicionadas en dos extremidades de una unidad de deformación con respecto a la fuerza de compresión en un modelo de pandeo inmediato;

la figura 6 es un gráfico aproximado para ilustrar la distancia entre partículas posicionadas en dos extremidades de una unidad de deformación con respecto a la fuerza de compresión en un modelo de pandeo inmediato;

45 la figura 7 es un gráfico para ilustrar una curva de respuesta de histéresis real medida sobre algodón puro;

la figura 8 es un gráfico para ilustrar la construcción de una unidad de deslizamiento y una respuesta de la misma;

50 la figura 9 es un dibujo esquemático para ilustrar una construcción que combina dos resortes y una unidad de deslizamiento, y su respuesta;

55 la figura 10 es un dibujo esquemático de una forma de realización de una construcción que combina unidades de deslizamiento y resortes para modelar características de histéresis de la tela de acuerdo con la presente invención, y su respuesta; y

la figura 11 es un dibujo esquemático de una forma de realización de una construcción que combina un número infinito de resortes y unidades de deslizamiento para modelar características de histéresis de la tela de acuerdo con la presente invención, y su respuesta.

**Descripción detallada de la invención**

60 Para alcanzar los objetivos antes mencionados, la presente invención propone utilizar el modelo de pandeo inmediato, el "Modelo de histéresis discreto de Choi-Ko" y el "Modelo de histéresis continuo de Choi-Ko". El modelo de pandeo inmediato comprende unidades de deformación las cuales modelan la tela, en donde la unidad de deformación flexa inmediatamente sin contracción cuando se aplica una fuerza de compresión a dos extremidades de la unidad de deformación.

El fenómeno de histéresis de la tela se modela utilizando números finitos de unidades de deslizamiento-resortes en el “Modelo de histéresis discreto de Choi-Ko” el cual se usa para simular las características de histéresis entre la curvatura y el momento. El fenómeno de histéresis de la tela se modela también utilizando números infinitos de unidades de deslizamiento-resortes en el “Modelo de histéresis continuo de Choi-Ko” que se usa para simular el fenómeno de histéresis entre la curvatura y el momento de manera más realista.

El modelo de resortes simula la información de la tela cuando se aplica una fuerza de estiramiento en ambas extremidades de la unidad de deformación (cuando se aplica una fuerza de estiramiento a la tela). Por lo tanto, el movimiento de la tela en relación con la compresión y el estiramiento que actúan sobre la tela se analizará utilizando modelos apropiados respectivamente para ello.

**(Análisis de la deformación de flexión por el modelo de pandeo inmediato)**

En la presente invención, cuando se aplica una fuerza de compresión a la tela, se utiliza un modelo de pandeo inmediato (el cual no ofrece resistencia a la fuerza de compresión y no se encoge sino que flexa inmediatamente justo después de la aplicación de la fuerza) para simular la deformación de flexión de la tela. La energía de deformación de flexión acumulada en la tela se puede calcular estimando la forma de la tela deformada.

En referencia a la figura 2, la cual ilustra una forma de realización conocida, se describirá a continuación el proceso de obtención de energía de deformación con respecto a la deformación de tela provocada por la fuerza de compresión. Según el modelo de pandeo inmediato que se ilustra en la figura 2, la región de una unidad de deformación predeterminada de tela se modela como una viga recta que no tiene área superficial.

Según se ilustra en la figura 2, de manera previa al pandeo antes de que se aplique la fuerza de compresión, la unidad de deformación predeterminada es una viga recta de longitud L1. Después del pandeo, la viga alcanza finalmente un estado de equilibrio estable (estado de flexión). Por ejemplo, la forma en equilibrio se obtiene como aproximación de un arco circular con longitud de arco L1. En otras palabras, en este modelo de pandeo inmediato no existe deformación de contracción. Es decir, únicamente se produce una deformación de flexión. La energía de la deformación de flexión se puede calcular estimando la forma de la unidad de deformación con el uso de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} MK dx \dots\dots\dots (1)$$

Donde, M es el momento flector y K es la curvatura. Si se supone que la relación entre la curvatura y el momento flector es lineal (M=k<sub>b</sub>K), la energía de deformación de flexión se puede obtener mediante la siguiente ecuación. Posteriormente se describirá un caso no lineal.

$$E = \frac{1}{2} K_b L_1 K^2 \dots\dots\dots (2)$$

Donde, K<sub>b</sub> es la rigidez flexural.

Puesto que la longitud de arco de la viga es la misma que la correspondiente de la longitud recta inicial L1 de la viga, la curvatura K se puede expresar meramente en términos de la distancia (|x<sub>ij1</sub>|) entre las dos extremidades de la viga de la manera siguiente:

$$K = \frac{2}{L_1} \text{sen } c^{-1} \left( \frac{|x_{ij1}|}{L_1} \right), \quad \text{sen } c(x) = \frac{\text{sen } x}{x} \dots\dots\dots (3)$$

El vector de fuerza se obtiene como,

$$f_i = -\frac{dE}{dx_i} = k_b K L_1 \frac{dK}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} = k_b K L_1 \left( \frac{d|x_{ij1}|}{dK} \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots (4)$$

$$= k_b K^2 \left( \cos \frac{KL_1}{2} - \text{sen } c \left( \frac{KL_1}{2} \right) \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots\dots (5)$$

$$= f_b(|x_{ij1}|) \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots\dots (6)$$

La figura 5 representa una relación entre el vector de fuerza (fuerza de compresión) y la distancia entre las dos

extremidades de la unidad de deformación. Tal como se ilustra en la figura 5, puesto que en la presente invención se utiliza el modelo de pandeo inmediato, cuando se aplica la fuerza de compresión a la tela, esta última comienza a pandearse con el inicio de aplicación de la fuerza (flexa inmediatamente sin deformación de contracción). A continuación, cuando se aplica una fuerza de compresión que supera un valor crítico (Pcr), se produce una cantidad considerable de deformación (pandeo). No obstante, para simplificar la relación, la deformación que se produce por debajo del valor crítico se representa aproximada a una línea recta según se muestra en la figura 6. En otras palabras,

$$f_b^* = \begin{cases} c_b(|x_{ij1}| - L_1) & , f_b < c_b(|x_{ij1}| - L_1) \\ f_b & , \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Donde,  $c_b$  es una constante seleccionada arbitrariamente. Aunque la curvatura se obtiene de forma aproximada según se descrito anteriormente, no se produce ninguna diferencia significativa en los resultados. La matriz jacobiana del vector de fuerza así descrito se obtiene de la manera siguiente:

$$\frac{df_i}{dx_i} = \frac{df_b^*}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1} x_{ij1}^T}{x_{ij1}^T x_{ij1}} + \frac{f_b^*}{|x_{ij1}|} \left( I - \frac{x_{ij1} x_{ij1}^T}{x_{ij1}^T x_{ij1}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

En la ecuación anterior,  $\frac{df_b^*}{d|x_{ij1}|}$  es siempre positiva, pero  $\frac{f_b^*}{|x_{ij1}|}$  es siempre negativa, de tal manera que existe una posibilidad de que el segundo término de la ecuación pudiera provocar una singularidad en la matriz del sistema. Por lo tanto, el segundo término se descarta. La matriz jacobiana sin el término negativo, obtenida a través de los procedimientos antes mencionados, es el resultado final para analizar la deformación de flexión de la tela utilizando el modelo de pandeo inmediato.

En la forma de realización antes mencionada, la cual es conocida, la región en las dos extremidades de una unidad de deformación predeterminada de la tela se modela en forma de una viga que no tiene área superficial. En la invención, la región se puede modelar en forma de una placa que tiene un área superficial. Si la región se modela como una placa triangular tal como se muestra en la figura 3, la energía de deformación de flexión se puede calcular de la manera siguiente:

$$E = \frac{1}{2} \int_{A_i \cup A_j} MK da = \frac{1}{2} k_b (A_i + A_j) K^2 \dots\dots\dots (8)$$

Donde  $A_i$  y  $A_j$  definen respectivamente áreas de triángulos.

En este caso, el vector de fuerza se puede obtener en forma de las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} f_i &= -\frac{dE}{dx_i} = k_b K (A_i + A_j) \frac{dK}{d|x_{ij1}|} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \\ &= k_b K (A_i + A_j) \left( \frac{d|x_{ij1}|}{dK} \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \\ &= \frac{k_b}{L_1} (A_i + A_j) K^2 \left( \cos \frac{KL_1}{2} - \text{sen } c \left( \frac{KL_1}{2} \right) \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

Los procedimientos presentados en lo sucesivo son iguales a los de la viga, excepto que en este caso, la forma geométrica de la unidad en un estado de equilibrio es igual que un cilindro. En la anterior forma de realización, aunque se supone que una estructura estable en el estado de equilibrio tiene forma de arco o cilíndrica, pueden utilizarse otras formas, puesto que los resultados de simulación se ven poco afectados por la forma de la unidad en equilibrio.

**(Análisis de la deformación de flexión de la tela por modelo de histéresis)**

Cuando en el modelo de pandeo inmediato antes mencionado se obtiene la energía de deformación, se supone que la curvatura y los momentos flectores de las unidades de deformación son lineales. Aunque esta suposición puede aplicarse bien a una tela como la seda, otros materiales para la tela, tales como el algodón, pueden no resultar pertinentes debido a que presentan un fenómeno de histéresis. La figura 7 ilustra algodón puro que tiene características de histéresis en relación con el momento flector y la curvatura.

Convencionalmente, las curvas histeréticas obtenidas por medición se utilizaron directamente para simular las características de histéresis de la tela. No obstante, las curvas histeréticas obtenidas mediante la medición pueden aplicarse únicamente a un caso en el que los cambios de la curva durante la medición son idénticos a los cambios de la curva durante la simulación, de tal manera que en general no resultan apropiadas para su aplicación a una simulación dinámica. Por lo tanto, resulta deseable realizar un modelo físico con el fin de simular características de histéresis de la tela.

Al mismo tiempo, en general el fenómeno de histéresis está interrelacionado profundamente con la plasticidad. Para analizar el fenómeno de histéresis, se conoce ampliamente el uso de modelos de histéresis tales como los que se muestran en las figuras 8 y 9. La figura 8 ilustra una unidad de deslizamiento que presenta una plasticidad ideal para representar una relación entre la curvatura (X) y el momento (F). La figura 9 ilustra un modelo en el que se usan resortes y una unidad de deslizamiento para modelar una característica de histéresis básica. No obstante, el modelo que presenta las características de histéresis básica mostradas en la figura 9, resulta bastante inapropiado para simular una característica de histéresis real de tela según se muestra en la figura 7.

Por lo tanto, para simular una característica de histéresis intrínseca de la tela (diferente con respecto a la característica de histéresis básica), resulta necesario utilizar un modelo de histéresis que resulte apropiado para la tela. En la presente invención, se proporciona un modelo de histéresis nuevo para simular las características de histéresis reales de la tela que se muestran en la figura 7.

Como forma de realización de la presente invención, en la figura 10 se ilustra un modelo en el que están conectados 4 resortes y 3 unidades de deslizamiento. La curva de respuesta completa que se obtiene a partir del modelo está compuesta por líneas rectas finitas, y las pendientes de cada una de las líneas rectas finitas son  $K_0+K_1+K_2+K_3$ ,  $K_0+K_2+K_3$ ,  $K_0+K_3$ , y  $K_0$  respectivamente. Un modelo de histéresis más generalizado está compuesto por  $n + 1$  resortes y  $n$  unidades de deslizamiento.

Tal como se ilustra en la figura 10, cuando se reduce el momento, la curva sigue las líneas de  $A_4A_5$ ,  $A_5A_6$ ,  $A_6A_7$ ,  $A_7A_8$ . Las líneas de  $A_4A_5$ ,  $A_5A_6$ ,  $A_6A_7$ , y  $A_7A_8$  son paralelas, respectivamente, a  $OA_1$ ,  $A_1A_2$ ,  $A_2A_3$  y  $A_3A_4$ , pero las longitudes de las líneas  $A_4A_5$ ,  $A_5A_6$ ,  $A_6A_7$ , y  $A_7A_8$  son dos veces la longitud de las líneas  $OA_1$ ,  $A_1A_2$ ,  $A_2A_3$  y  $A_3A_4$ , respectivamente. Por lo tanto, existe una asimetría.

En la presente invención, cualquier característica de histéresis de una tela particular se puede expresar ajustando los números de las unidades de deslizamiento y de los resortes, los momentos críticos de cada unidad de deslizamiento y valores constantes de cada resorte. Como resultado, la característica de histéresis de una tela particular puede venir dada en función del momento M (K) con respecto a la curvatura K.

Para aplicar el modelo de histéresis nuevo antes mencionado al análisis de deformación de flexión de la tela, es suficiente con sustituir M en la ecuación 8 por la función M (K). En lo sucesivo en la presente, al modelo de histéresis antes identificado se le hace referencia como "Modelo de histéresis discreto de Choi-Ko".

En la figura 11, se ilustra otra forma de realización de la presente invención que es idéntica al modelo de histéresis finito excepto en que "n" es infinito. La curva obtenida a partir de este modelo es lisa tal como se muestra en el lado derecho de la figura 11.

Este modelo se utiliza en el análisis de las características de histéresis de tela desde un punto en el que se produce la deformación de plasticidad hasta un punto en el que finaliza la deformación de plasticidad (por ejemplo, entre  $A_1$ ,  $A_3$  y  $A_5$ ,  $A_7$  como se muestra en la figura 10) según se ilustra en la figura 11.

En este caso, cuando el límite de elasticidad de la unidad de deslizamiento que alcanza en primer lugar el límite de elasticidad viene dado por  $\sigma_{min}$ , y el límite de elasticidad de la unidad de deslizamiento que alcanza el límite de elasticidad en último lugar viene dado por  $\sigma_{max}$ , los límites de elasticidad de los infinitos números de las unidades de deslizamiento están distribuidos entre  $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$ . Adicionalmente, se supone que las constantes (infinitesimales) de todos los resortes conectados en serie con las unidades de deslizamiento son iguales.

En este momento, de acuerdo con las descripciones de la figura 10, cuando K viene dada como una suma total de las constantes de los resortes dividida por la longitud de la parte en la que se produce la deformación de plasticidad, puesto que la velocidad de cambio de la pendiente en la curva es constante,  $\frac{d}{dx} \left( \frac{dF}{dX} \right) = K$ . En este caso, si se dan dos condiciones, la derivada de segundo orden correspondiente a la parte curvada en la curva de histéresis se puede determinar de forma única. Considerando que la longitud de la parte inferior de la curva es dos veces la longitud de la superior, la misma se puede modelar como  $\frac{d}{dx} \left( \frac{dF}{dX} \right) = 0.5K$ .

Debe indicarse que solamente el valor absoluto de la derivada de segundo orden correspondiente a unidades de deslizamiento que superan los valores críticos llega a ser  $0.5K$ , y para las unidades de deslizamiento que no superan

todavía los valores críticos, el valor absoluto de la derivada de segundo orden debería ser K.

La curva ilustrada en el lado derecho de la figura 11 es una forma de realización de una curva de histéresis obtenida a partir del modelo de histéresis infinito de la presente invención.

Uno de los puntos fuertes del modelo de histéresis infinito es que puede reducir el almacenamiento destinado a almacenar cada condición de las unidades de deslizamiento y puede simular las características de histéresis de manera más realista, en comparación con el modelo de histéresis finito. Al modelo de histéresis infinito así descrito se le hace referencia como "Modelo de histéresis continuo de Choi-Ko".

**(Análisis de deformación por estiramiento de la tela mediante el modelo de resorte)**

Cuando se aplica una fuerza de estiramiento a la tela, el movimiento de la tela se puede simular con modelos de resortes instalados en dos extremidades de una unidad de deformación predeterminada de tela. Para simular el movimiento de la tela con relación al estiramiento se obtiene la energía de deformación por estiramiento acumulada en la unidad de deformación predeterminada por la fuerza de estiramiento. La energía de deformación por estiramiento se puede obtener a partir de la siguiente ecuación.

$$E = \begin{cases} \frac{1}{2} k_s (|x_{ij2}| - L_2)^2, & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

donde  $x_{ij2}$  es la distancia entre las extremidades de la unidad de deformación predeterminada,  $L_2$  es la distancia en la que no se aplica la fuerza de estiramiento, y  $K_s$  es una constante de resorte. En caso de  $|x_{ij2}| < L_2$ , la energía de deformación es 0, de tal manera que debe indicarse que el modelo anterior se puede aplicar a casos en los que se aplican fuerzas de estiramiento entre las extremidades. En la ecuación anterior, la fuerza que actúa sobre una cierta posición entre las dos extremidades de la unidad de deformación predeterminada se puede expresar de la manera siguiente en la Ecuación 11:

$$f_i = \begin{cases} -\frac{dE}{dx_i} = k_s (|x_{ij2}| - L_2) \frac{x_{ij2}}{|x_{ij2}|}, & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

Donde, el vector de fuerza de la matriz jacobiana viene dado por la Ecuación 12.

$$\frac{df_i}{dx_j} = \begin{cases} k_s \frac{x_{ij2} x_{ij2}^T}{|x_{ij2}|} + k_s (1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|}) (I - \frac{x_{ij2} x_{ij2}^T}{|x_{ij2}|^2}), & |x_{ij2}| \geq L_2 \\ 0, & |x_{ij2}| < L_2 \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

El primer término de la matriz jacobiana se obtiene a partir de modelar la interacción como un resorte lineal e indica que la rigidez según la dirección de interacción por estiramiento es constante. El segundo término de la matriz jacobiana indica que la rigidez según la dirección perpendicular de la interacción es proporcional a la dirección  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$ . Puesto que la tela se constituye en una forma plana, la dirección perpendicular de la interacción se corresponde con una dirección perpendicular al plano.

Puesto que el modelo de resorte se aplica únicamente a un caso en el que se aplica fuerza de estiramiento,  $|x_{ij2}|$  es mayor que  $L_2$ , y  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$  es positivo aunque menor que 1, haciendo así que el sistema sea estable. Si se usa el modelo de resorte en el caso de la compresión, a medida que  $|x_{ij2}|$  se aproxima a 0,  $(1 - \frac{L_2}{|x_{ij2}|})$  diverge hacia el infinito.

Por lo tanto, la matriz del sistema completa  $(I - \alpha \frac{df}{dv} + \beta \frac{df}{dx})$  puede generar un problema de singularidad con independencia de la magnitud de la fase de simulación. Por lo tanto, en la presente invención el modelo de resorte no se usa para la compresión.

A título de referencia, en la técnica anterior [Volino y Magnenat-Thalmann 2000], se usan los mismos modelos de

5 resorte tanto en el estiramiento como en la compresión, y el segundo término de la matriz jacobiana de la Ecuación 13 se descarta tanto en el estiramiento como en la compresión. Además, para evitar que valores propios en la dirección ortogonal de la interacción resulten nulos debido al descarte del segundo término, se añade un término de amortiguamiento ficticio. Aunque el término de amortiguamiento añadido puede estabilizar la matriz del sistema, el mismo puede generar de manera innecesaria una alta resistencia al movimiento de la tela.

10 En cuanto a la compresión en la presente invención, se utiliza un modelo de pandeo inmediato que provoca una deformación de flexión instantánea sin contracción, mientras que para el estiramiento, se utiliza un modelo de resortes, de tal manera que se puede obtener estabilidad de la matriz del sistema sin añadir un término de amortiguamiento imaginario. Por lo tanto, la presente invención puede simular el movimiento de la tela de manera más realista.

15 Tal como se pone de manifiesto a partir de lo anterior, existe una ventaja en el modelo de pandeo inmediato, el modelo de histéresis, y el método de simulación basado en los modelos inventados y en los soportes legibles por ordenador que almacenan el programa que ejecuta el método de simulación inventado así descrito de acuerdo con la presente invención, por cuanto el modelo de pandeo inmediato se utiliza para simular deformación provocada por fuerzas de compresión, resolviendo de esta manera la inestabilidad estructural del fenómeno de pandeo. Adicionalmente, se incrementa la velocidad de simulación. Se produce otra ventaja en que se utiliza el "Modelo de histéresis discreto de Choi-Ko" y el "Modelo de histéresis continuo de Choi-Ko" para simular el movimiento de la tela, 20 simulando así de manera más realista las características de la histéresis.



**REIVINDICACIONES**

1. Método implementado por ordenador para simular el movimiento de una tela modelada como un modelo de partículas, que comprende las etapas de:

5 fijar unidades de deformación que representan partes de interés de la tela con partículas del modelo de partículas posicionadas en dos extremidades (Xi, Xj) de una unidad de deformación,

10 analizar el movimiento de la tela en relación con la compresión aplicando un modelo de pandeo inmediato a las unidades de deformación, con lo cual tras la aplicación de una fuerza de compresión entre las dos extremidades de una unidad de deformación, se genera inmediatamente deformación de flexión de la unidad de deformación sin que se genere deformación de contracción de la unidad de deformación, de manera que una unidad de deformación experimenta inmediatamente deformación de flexión cuando se aplica dicha fuerza de compresión,

15 en el que la etapa de análisis comprende la estimación de la forma de la unidad de deformación después de que se produzca la deformación de flexión, calculando una curvatura de la unidad de deformación deformada, calculándose la curvatura de acuerdo meramente con una distancia entre los vértices que no son compartidos,

20 en el que la fuerza de compresión se obtiene diferenciando una energía de deformación de flexión que se acumula durante la aplicación del modelo de pandeo inmediato, expresándose dicha energía de deformación de flexión en función de la distancia entre las dos partículas posicionadas en las extremidades de la unidad de deformación,

25 en el que, cuando la fuerza de compresión está por debajo de un valor crítico (Pcr), dicha fuerza de compresión se aproxima linealmente en relación con la distancia entre las dos partículas posicionadas en las extremidades de la unidad de deformación,

30 caracterizado por que una unidad de deformación se modela con dos placas triangulares (Ai, Aj), teniendo cada placa triangular una partícula como uno de sus vértices, y compartiendo sus otros dos vértices con la otra placa triangular, y

en el que el vector de la fuerza de compresión  $f_i$  se obtiene con:

$$f_i = \frac{k_b}{L_1} (A_i + A_j) K^2 \left( \cos \frac{KL_1}{2} - \operatorname{sen} c \left( \frac{KL_1}{2} \right) \right)^{-1} \frac{x_{ij1}}{|x_{ij1}|}$$

35 en donde  $k_b$  define una constante,

$A_i$  y  $A_j$  definen respectivamente áreas de las placas triangulares,

40  $K$  define la curvatura de la unidad de deformación deformada,

$x_{ij1}$  define la distancia entre las dos partículas posicionadas en las extremidades de la unidad de deformación después de que se produzca la deformación de flexión,

45  $L_1$  define la distancia entre las dos partículas posicionadas en las extremidades de la unidad de deformación antes de que se produzca la deformación de flexión, y

$$\operatorname{sen} c(x) \approx \frac{\operatorname{sen} x}{x} .$$

50 2. Soporte legible por ordenador que almacena un programa para ejecutar el método que se define en la reivindicación 1.

FIG.1

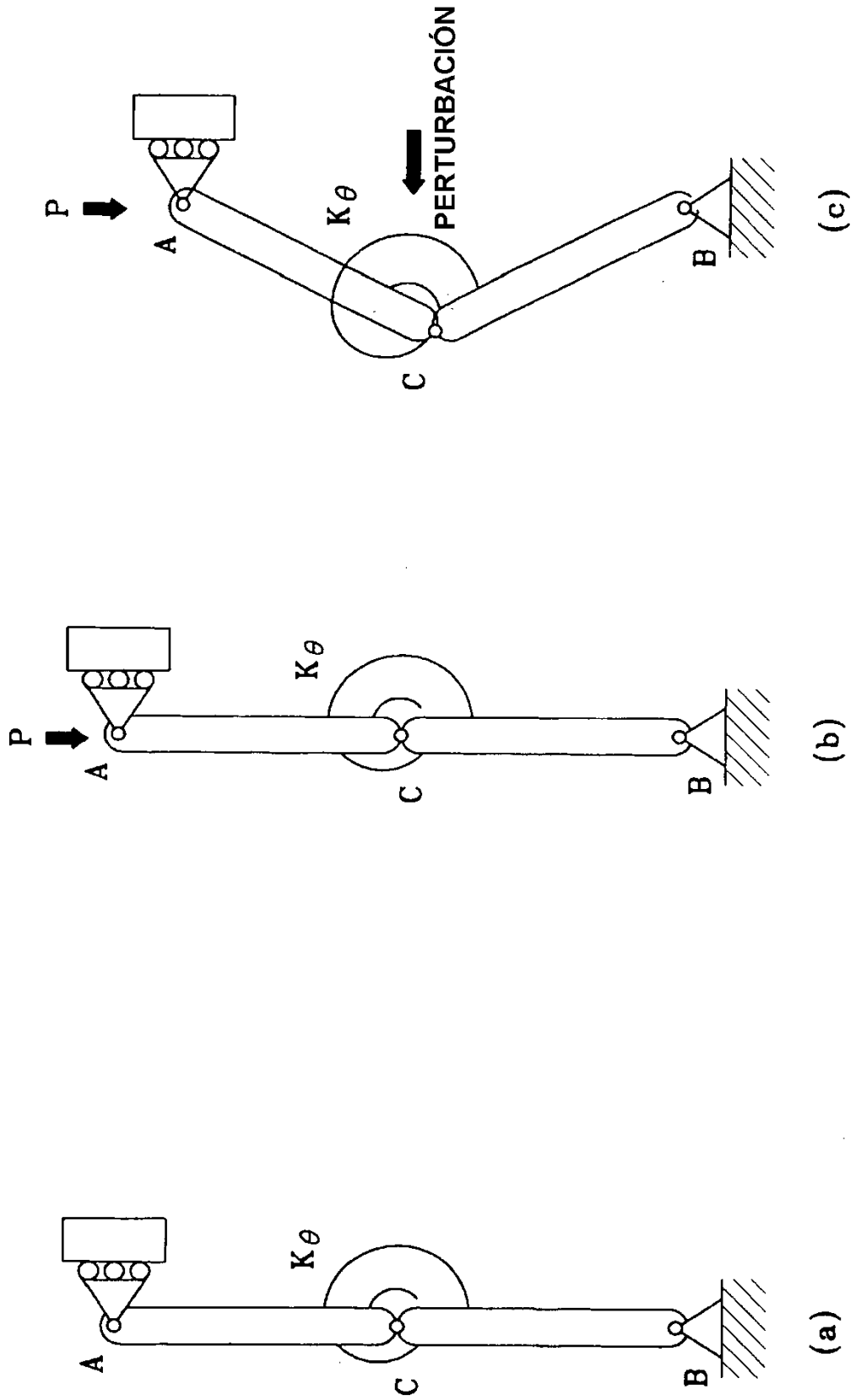


FIG.2

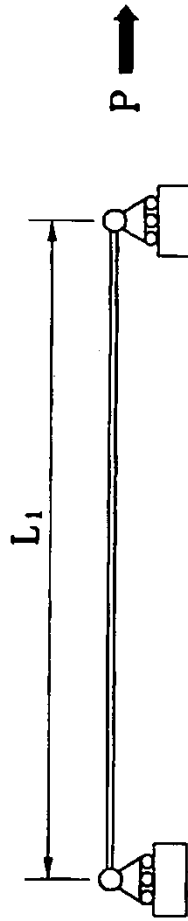
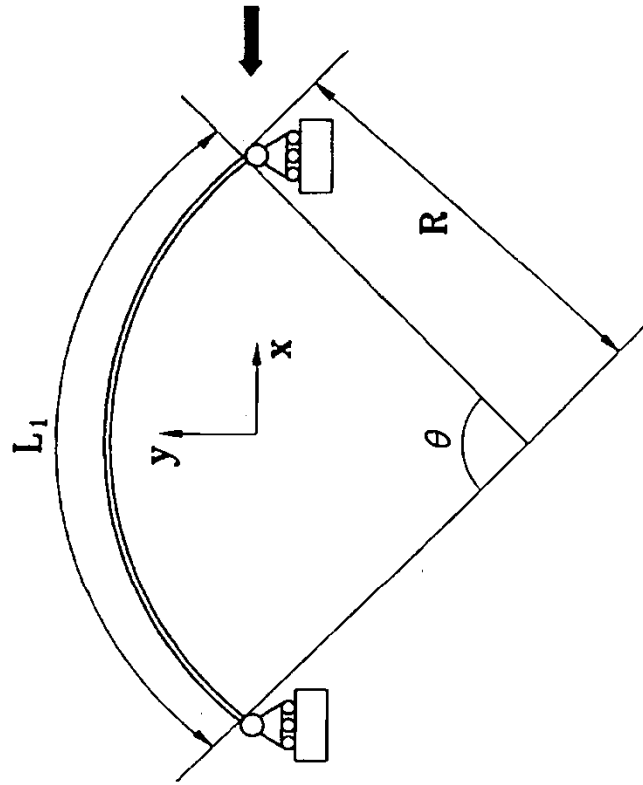


FIG.3

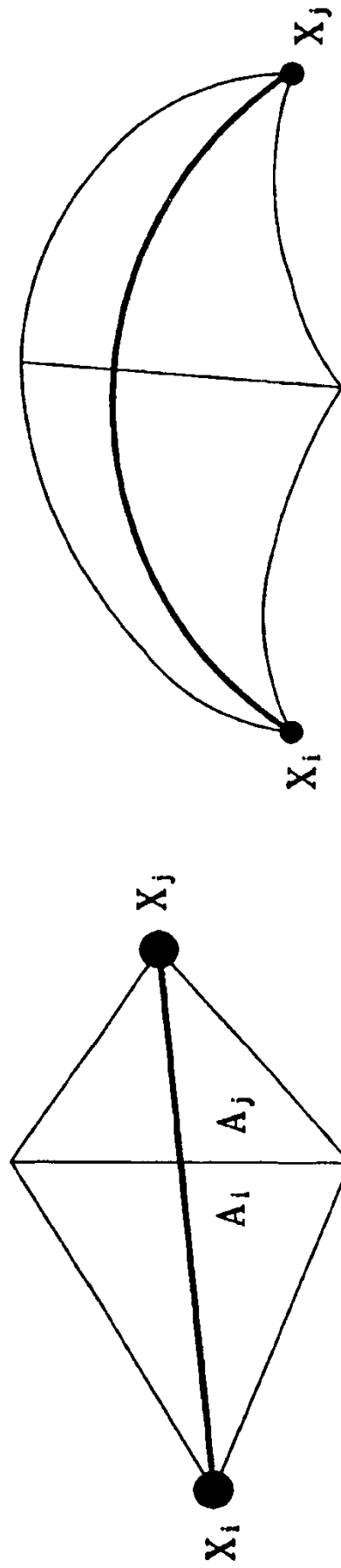
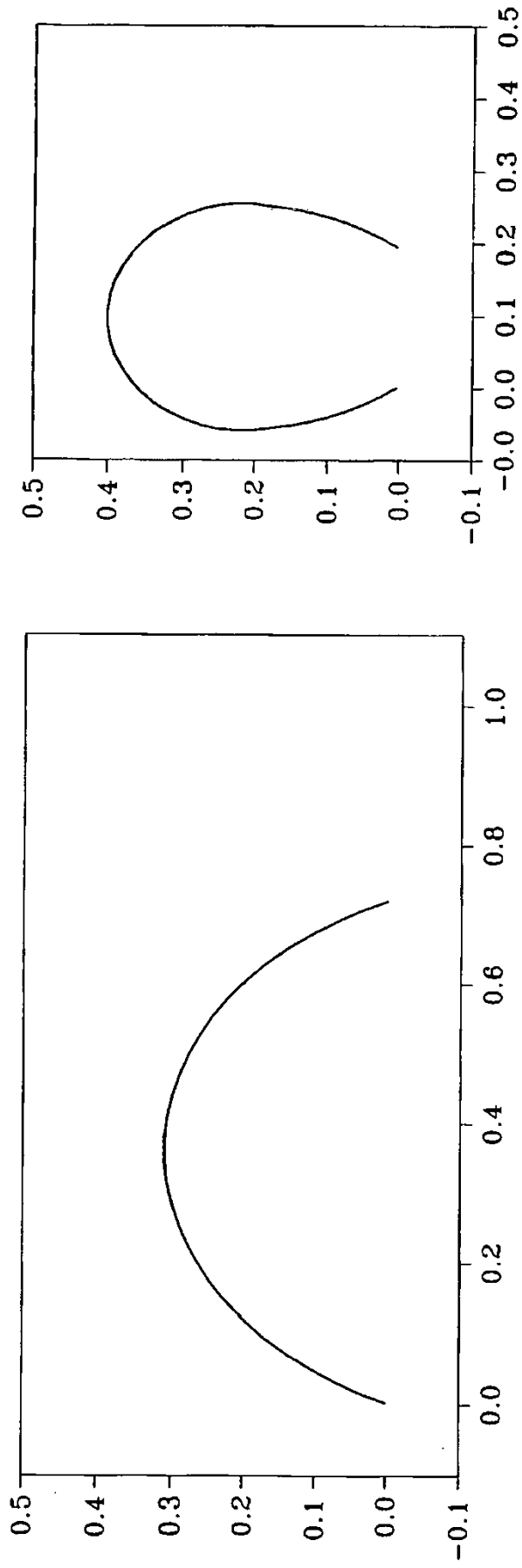


FIG.4



(a)  $P/k_b = 23.50$

(b)  $P/k_b = 35.25$

FIG.5

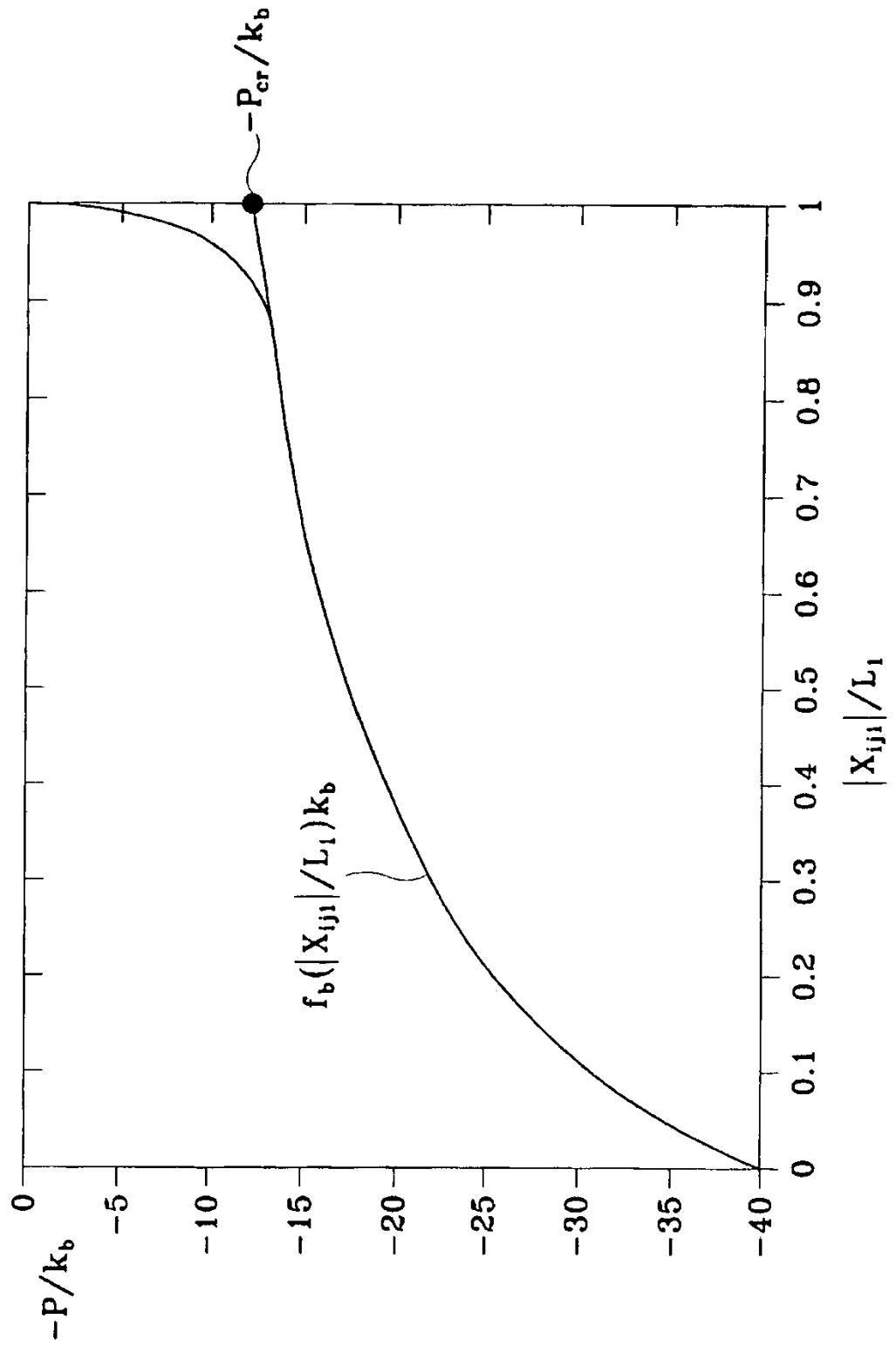


FIG.6

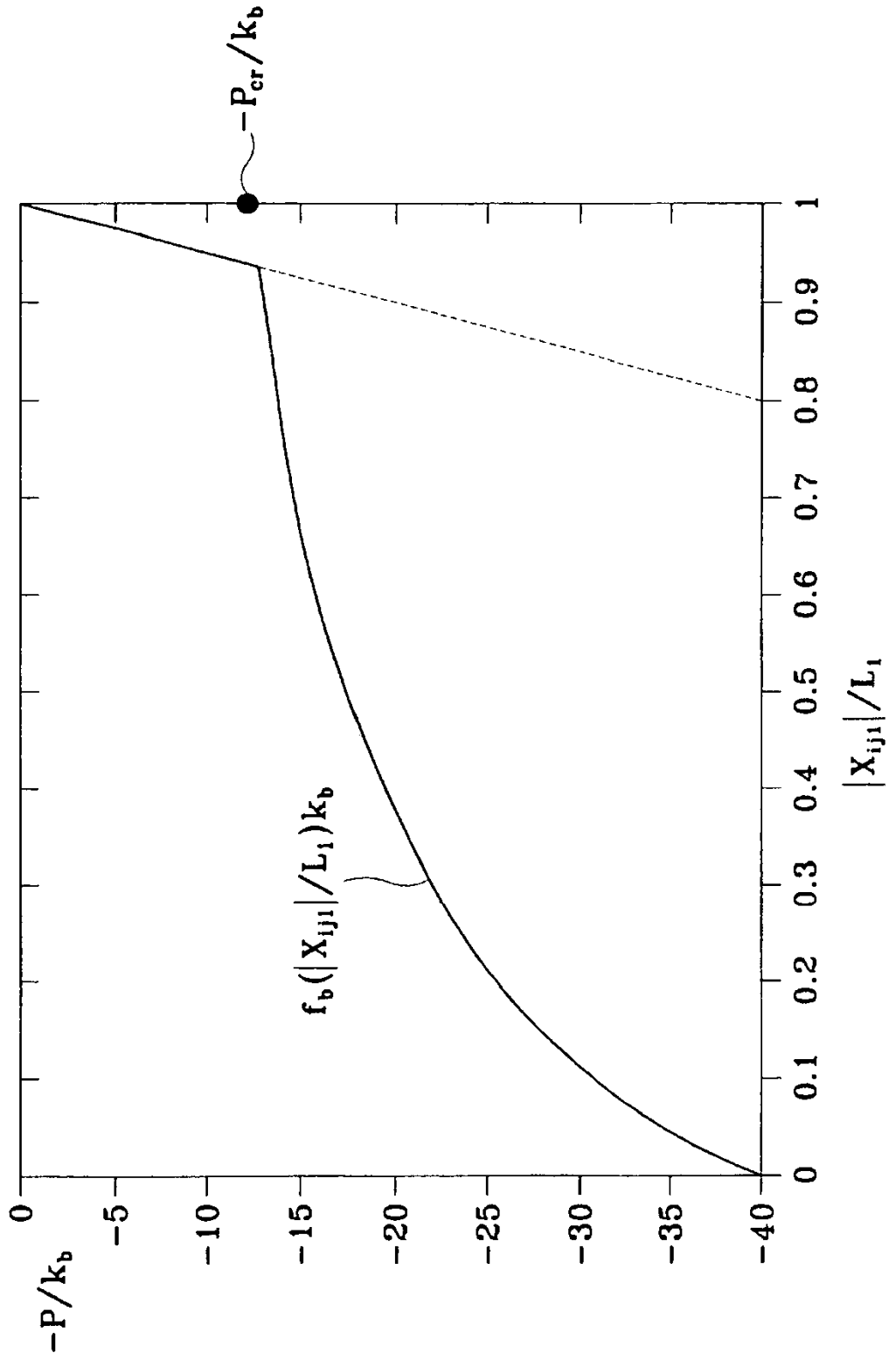


FIG.7

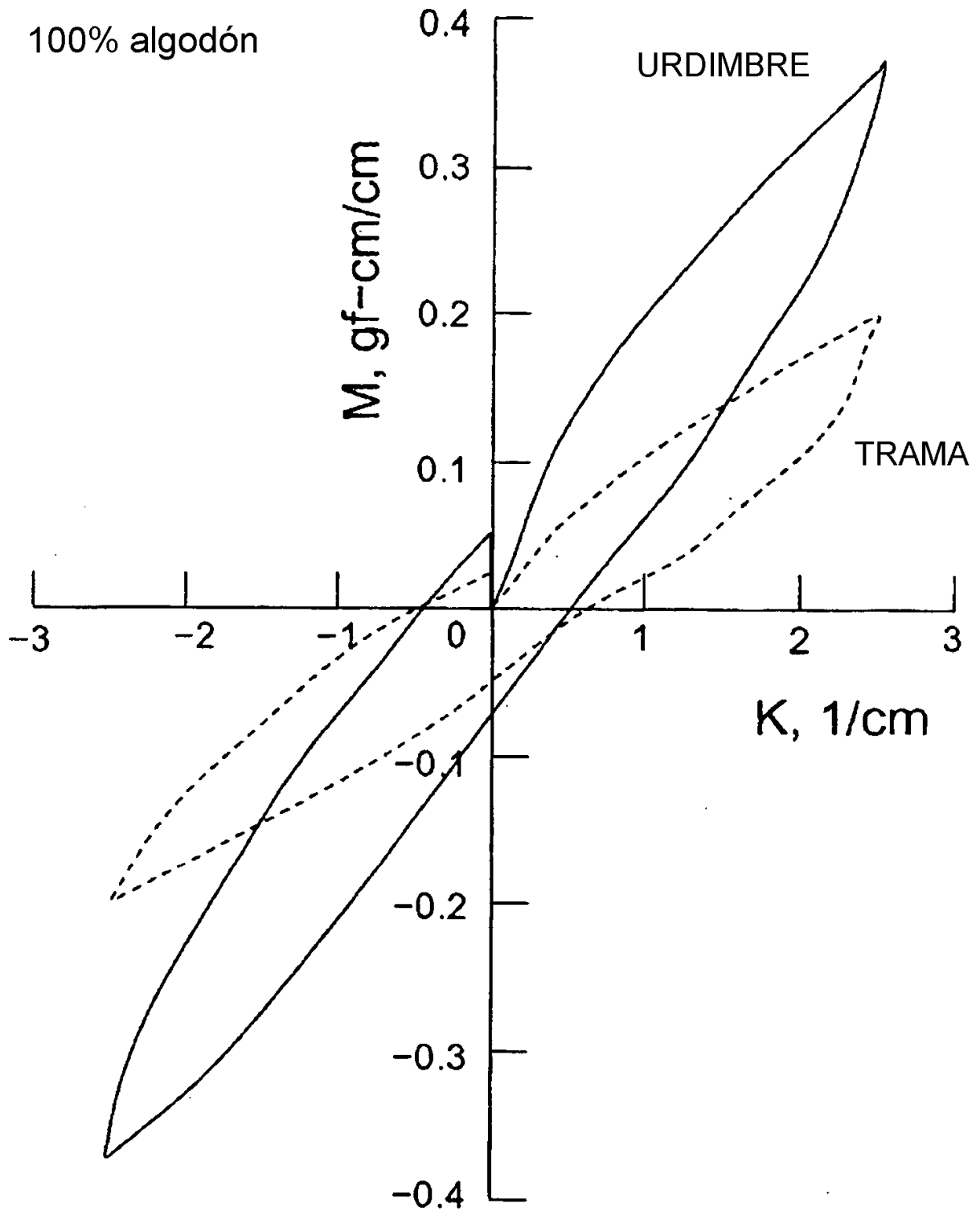




FIG.8

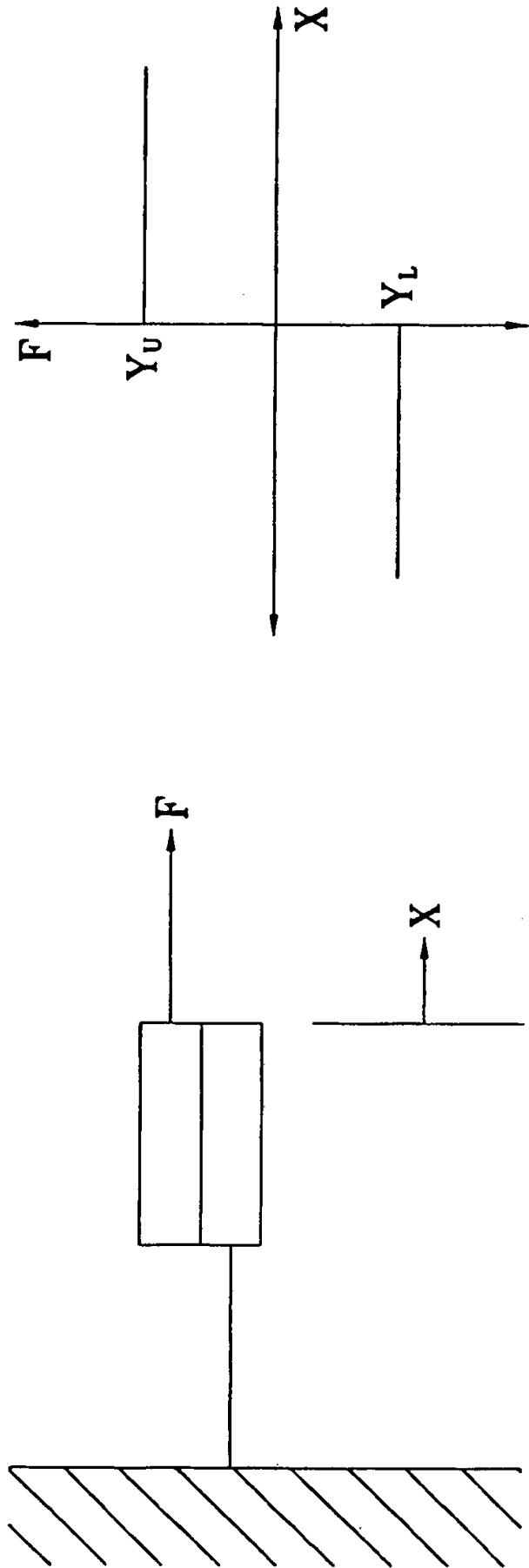


FIG.9

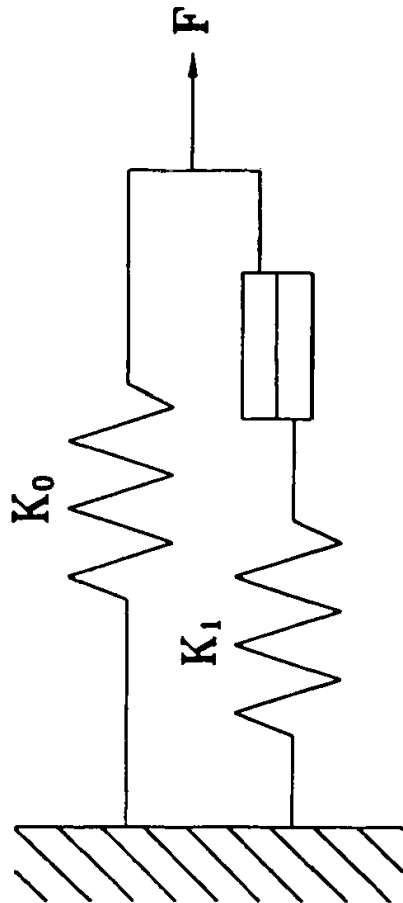
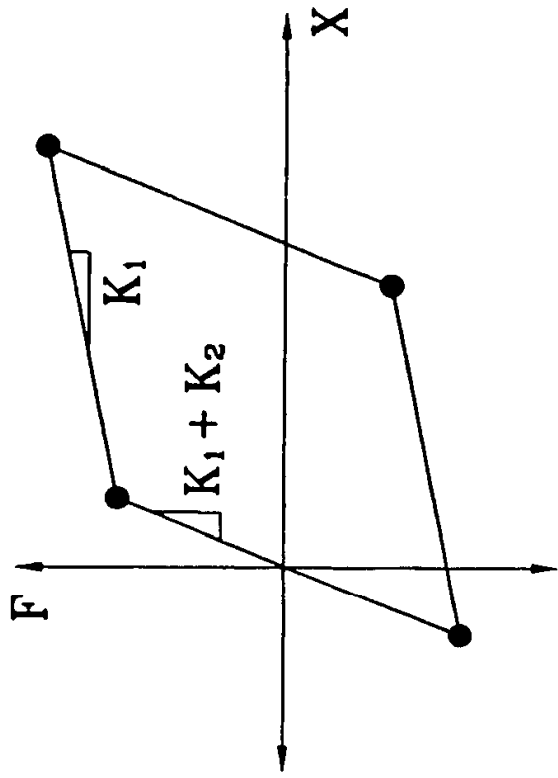


FIG. 10

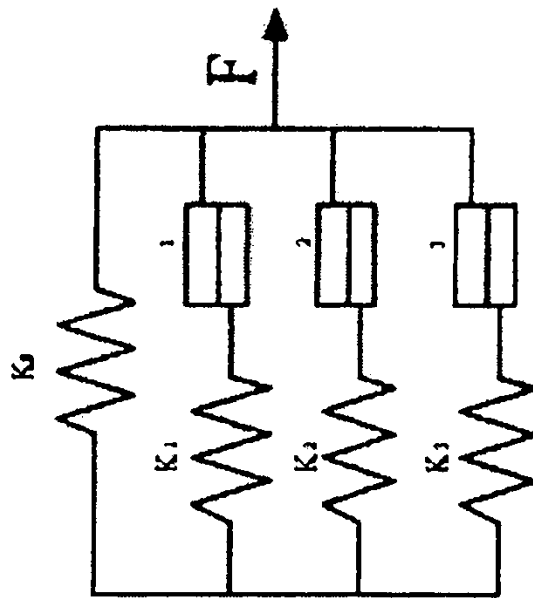
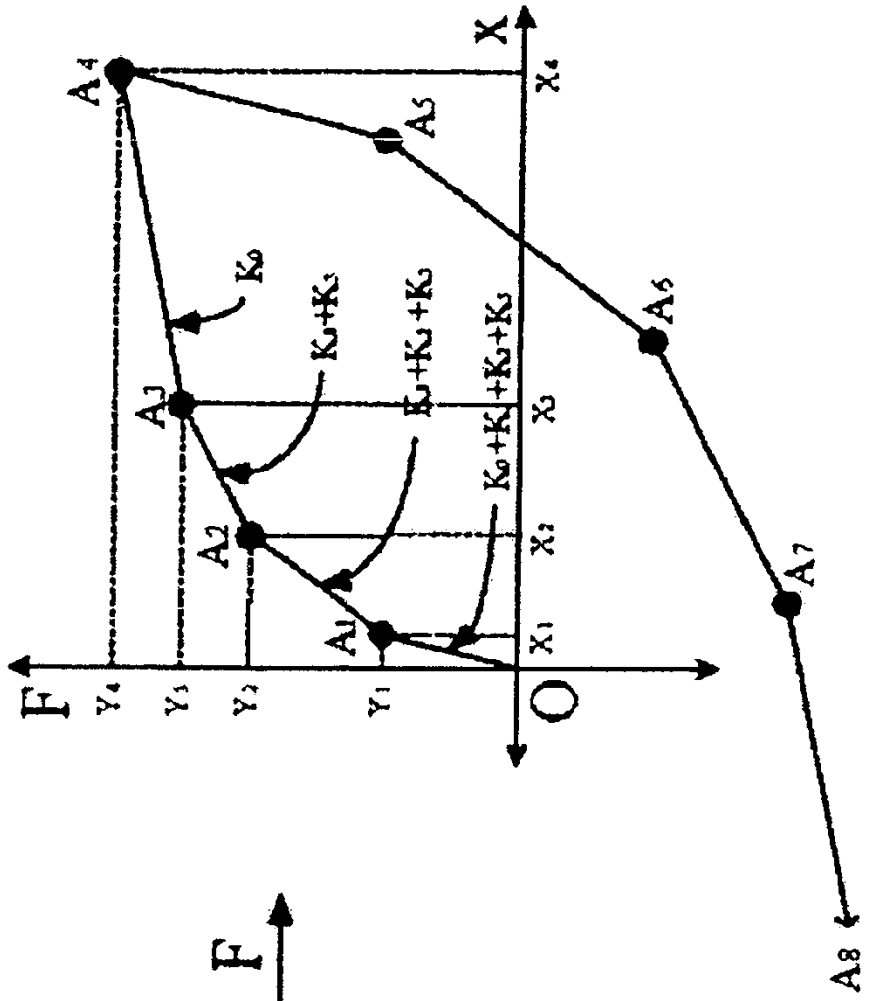


FIG.11

