

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 545 218**

51 Int. Cl.:

B23K 26/03 (2006.01)
B23K 26/16 (2006.01)
B23K 26/08 (2014.01)
B23K 26/14 (2014.01)
B23K 26/00 (2014.01)
B23K 26/06 (2014.01)
B23K 26/36 (2014.01)
B08B 7/00 (2006.01)
B08B 15/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.12.2010 E 10796388 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2015 EP 2516100**

54 Título: **Procedimiento de ablación de una superficie en tres dimensiones gracias a un dispositivo de ablación láser y gracias al uso de una etapa de calibrado; dispositivo de realización de dicho procedimiento**

30 Prioridad:

22.12.2009 FR 0959411

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.09.2015

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**CHAMPONNOIS, FRANÇOIS y
LAVAL, BERTRAND**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 545 218 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de ablación de una superficie en tres dimensiones gracias a un dispositivo de ablación láser y gracias al uso de una etapa de calibrado; dispositivo de realización de dicho procedimiento.

La presente invención se refiere a un procedimiento de ablación de una superficie en tres dimensiones gracias a un dispositivo de ablación, comprendiendo el dispositivo:

- una fuente láser para generar un haz láser pulsado;
- un objetivo que permite hacer variar el punto focal del haz láser según una profundidad z;
- un cabezal galvanométrico para dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y), el haz sobre la superficie que va a ser ablacionada;
- una lente f-theta que permite visualizar el haz láser en una superficie plana en lugar de en una superficie esférica;
- por lo menos una cámara de observación de la superficie en la que se debe realizar una ablación; y
- una unidad de control conectada por lo menos al cabezal galvanométrico, al objetivo y a la cámara (véase, por ejemplo, el documento US 2007/173792A).

La invención se refiere también a un dispositivo de realización del procedimiento anterior.

Estado de la técnica

Como se muestra en la figura 1, una solución conocida para efectuar la ablación de una superficie 1, por ejemplo para la restauración de fachadas de edificios o para la descontaminación de instalaciones nucleares, consiste en utilizar la ablación láser.

La ablación láser consiste en retirar una capa de grosor reducido del material a quitar (polvo, pintura, o un contaminante por ejemplo), a través de la interacción de una luz, coherente, focalizada y procedente de un láser pulsado, con este material.

El calentamiento rápido de la superficie de esta capa provoca la vaporización y después la eyección de los primeros estratos del material.

Unos dispositivos 2 de ablación láser conocidos comprenden típicamente una fuente 3 láser prevista para generar un haz 4 láser pulsado y unos medios de transporte de este haz hasta un módulo 6 óptico situado por debajo de la fuente 3 láser, y que está provisto de un objetivo 5, de un cabezal 7 galvanométrico y de una lente 8 f-theta para focalizar y dirigir según los ejes X e Y el haz pulsado sobre la superficie 1 que va a ser ablacionada. El dispositivo 2 comprende también un sumidero 13 y un tubo de evacuación 12 para la evacuación de los materiales ablacionados.

A la salida del objetivo 5 y del cabezal galvanométrico 7, las coordenadas del punto de focalización están situadas sobre una superficie esférica, lo que puede complicar un control del haz. Para superar esta dificultad, la lente f-theta 8 está dispuesta en la trayectoria del haz láser, a fin de situar el punto de focalización en una superficie plana.

Se trata de aportar una cantidad de energía suficiente sobre la capa para alcanzar el límite de ablación de ésta. Pero este no es el único efecto que aporta un haz láser sobre la capa. En efecto, en el momento del impacto láser, se crea una onda de choque y contribuye a separar el material de la superficie 1 en la que es aplicado.

Se ha representado esquemáticamente en la figura 2 la forma clásica de un haz 4.

La fluencia, o densidad de energía (J/m^2) necesaria para activar la ablación del material, depende de la naturaleza de éste, del grosor que se desea someter a ablación y de la composición de la superficie.

Los experimentos muestran que se necesita una fluencia de 1 a 50 J/cm^2 . Por lo tanto, la cantidad de energía transmitida depende de la cantidad de energía transportada por el haz 4 y de la sección de este haz que interactúa con el material a tratar. La sección más pequeña del haz está situada a la distancia de focalización L, una distancia L a la que se sitúa el punto de ablación preferido (véase también la figura 1). Es del orden de 50 cm a partir de la lente 8 por ejemplo.

Como lo muestra la figura 2, el haz 4 tiene una profundidad l de campo importante, que corresponde a la distancia de Rayleigh, es decir aproximadamente 1 cm, permitiendo así trabajar sobre superficies librándose de los defectos de planeidad de esta. El dispositivo está por lo tanto bien adaptado para las superficies en dos dimensiones.

Cuando se desea efectuar una ablación sobre una superficie 1 en tres dimensiones, como se muestra en la figura 3, se debe de asociar un objetivo 5 de enfoque variable a la fuente láser 3 para corregir la distancia L de focalización.

- 5 Como se muestra en la figura 4 también, modificando la distancia L de focalización de manera dinámica gracias a una unidad de control 9 es posible controlar la distancia de ablación sobre una superficie 1 en tres dimensiones.

Las técnicas anteriores conocidas presentan sin embargo unos inconvenientes.

- 10 La superficie en tres dimensiones debe ser previamente memorizada en la unidad de control 9 para poder ser tenida en cuenta por el dispositivo.

- 15 No es posible efectuar una ablación sobre una superficie no conocida previamente, y determinada previamente por unos dispositivos suplementarios de determinación de la superficie, como por ejemplo unos teodolitos, unos interferómetros, unos sensores conoscópicos, etc.

- 20 Además, los dispositivos suplementarios de determinación de una superficie en tres dimensiones del estado de la técnica, necesarios para la determinación previa de la superficie, son caros y voluminosos, y no son convenientes para las aplicaciones de ablación de superficies.

- Finalmente, los dispositivos suplementarios no trabajan en el mismo referencial que el dispositivo de ablación, lo que genera unas distorsiones, ya que el dispositivo suplementario no tiene la misma visión de la superficie que va a ser ablacionada que el dispositivo de ablación, y puede generar unos errores de posicionamiento del haz láser.

- 25 Se conoce por el documento US 2007/173792 una técnica de cualificación y de calibración de un sistema láser, según la cual se cualifica y/o se calibra el sistema láser en función de una desviación en un plano de un haz láser, con respecto a una dirección deseada, observada por un sistema de imágenes.

- 30 Se conoce por el documento US 2004/144760 una técnica de calibración de un marcaje láser sobre una cara opuesta a una cara observada por un sistema de imágenes.

- 35 Se conoce por el documento US 2009/220349 una técnica de triangulación de una superficie en tres dimensiones, mediante un sistema de imágenes que ilumina también la superficie, siendo el sistema distinto de un dispositivo de ablación de la superficie.

Presentación de la invención

Se propone según la invención paliar por lo menos uno de estos inconvenientes.

- 40 Para ello, se propone según la invención un procedimiento de ablación según la reivindicación 1.

La invención está ventajosamente completada por las características de las reivindicaciones 2 a 9, tomadas solas o en una cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles.

- 45 La invención se refiere también a un dispositivo de realización del procedimiento antes citado, definido en la reivindicación 10.

La invención presenta numerosas ventajas.

- 50 La superficie en tres dimensiones no tiene que ser conocida previamente para poder ser tenida en cuenta por la unidad de control: la invención permite efectuar una ablación sobre una superficie no conocida previamente.

- 55 Además, la invención no necesita la utilización de dispositivos suplementarios de determinación de una superficie en tres dimensiones. La invención utiliza únicamente unos elementos del dispositivo de ablación que tienen por lo tanto el mismo referencial, y no generan así ninguna distorsión.

Debido a esto, el dispositivo es menos caro y menos voluminoso, lo que es conveniente para las aplicaciones de ablación de superficies.

- 60 **Presentación de las figuras**

Otras características, objetivos y ventajas de la invención destacarán a partir de la descripción siguiente, puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe ser leída en relación con los dibujos adjuntos, en los que:

- 65 - la figura 1, ya comentada, representa esquemáticamente un dispositivo de ablación conocido;

- la figura 2, ya comentada, representa esquemáticamente un haz láser conocido de ablación;
- las figuras 3 y 4, ya comentadas, representan esquemáticamente la ablación de una superficie en tres dimensiones;
- la figura 5 representa esquemáticamente las principales etapas de un procedimiento según la invención;
- la figura 6 representa esquemáticamente un posible ejemplo de un dispositivo de realización de un procedimiento según la invención;
- la figura 7 representa esquemáticamente el principio de triangulación;
- la figura 8 representa esquemáticamente la determinación de las coordenadas s_x y s_y en un plano de referencia de un cabezal, mediante una unidad de control según la invención;
- la figura 9 representa esquemáticamente la determinación de las coordenadas p_x y p_y en un plano de referencia de una matriz de una cámara, mediante una unidad de control según la invención;
- la figura 10 representa esquemáticamente las principales etapas de una etapa de calibración según la invención;
- la figura 11 representa esquemáticamente una sucesión de placas vistas por arriba, con una placa transversal (en línea de puntos) para mostrar las tolerancias admisibles;
- la figura 12 representa esquemáticamente unas curvas de correspondencia de p_x en función de s_x , para diferentes profundidades z ;
- la figura 13 representa esquemáticamente, unas curvas de correspondencia de a , b y c respectivamente en función de p_x ;
- la figura 14 representa esquemáticamente una curva de relación de z en función de c ;
- las figuras 15 y 16 representan esquemáticamente las principales etapas de una etapa de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie que va a ser ablacionada;
- la figura 17 representa esquemáticamente las principales etapas de alineación del haz láser del cabezal 7 sobre el eje óptico del cabezal;
- la figura 18 representa esquemáticamente las principales etapas de ortogonalidad de la matriz con respecto al plano (xOz);
- la figura 19 representa esquemáticamente una etapa de interpolación por la unidad de control durante la etapa de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie que va a ser ablacionada;
- la figura 20 representa esquemáticamente un dispositivo que comprende dos cámaras.

En el conjunto de las figuras, los elementos similares llevan unas referencias numéricas idénticas.

Descripción detallada

Las figuras 5 y 6 representan esquemáticamente las principales etapas de un procedimiento de ablación de una superficie 1 en tres dimensiones, realizadas sobre un dispositivo 2 de ablación.

El dispositivo 2 comprende clásicamente:

- una fuente 3 láser para generar un haz 4 láser pulsado;
- un objetivo 5 de ajuste del punto de focalización del haz láser 4 según una profundidad z ;
- un cabezal 7 galvanométrico para dirigir, según unos ejes que definen un plano (X , Y), el haz 4 sobre la superficie 1 que va a ser ablacionada;
- una lente f -theta 8 que sitúa el punto focal sobre una superficie plana;
- por lo menos una cámara 10 de observación de la superficie que va a ser ablacionada.

La fuente 3 es, por ejemplo, un láser de fibra pulsado de baja potencia (por ejemplo 20W de potencia media a una cadencia de 20 kHz, es decir 1 mJ por impulso láser) con una buena calidad de haz ($M^2 = 1,5$), lo que significa que la sección de interacción haz/materia es suficientemente pequeña para alcanzar la fluencia de ablación antes citada. El punto de impacto tiene un diámetro de 30 a 200 μm .

El objetivo 5, el cabezal 7 y la lente 8 forman un módulo óptico referenciado con 6 en la figura 6. La lente 8 puede también ser independiente del módulo 6.

El cabezal 7 comprende clásicamente un juego de dos espejos cuya rotación está motorizada. Cada uno de estos espejos permite desviar el haz láser según los dos ejes X e Y con un movimiento muy rápido del haz (hasta 7 m/s a una distancia focal de 160 mm).

La lente f-theta 8 está dispuesta por debajo (en el sentido de propagación del haz láser) del cabezal 7 a fin de situar el punto focal del haz láser sobre una superficie plana. Esta lente f-theta 8 fija el punto focal inicial del haz láser en ausencia de cualquier orden.

Como se muestra en la figura 7, la cámara 10 es, por ejemplo, una cámara de baja definición que comprende una matriz 100 de tipo CCD (512x512 con unos píxeles de aproximadamente 8 μm de lado). Este tamaño de píxeles es suficientemente amplio para la aplicación deseada: una incertidumbre de 1 píxel provoca un error sobre la profundidad z de la superficie 1 del orden de centésimas de mm. Para un objetivo 101 de la cámara 10 de 8 mm, la incertidumbre antes citada provoca un error angular del orden de seis centésimas de grado. Para un objetivo 101 de 16 mm, el error de ángulo antes citado medido es del orden de tres centésimas de grado.

El dispositivo 2 comprende además una unidad de control 9 unido por un lado al módulo 6, es decir por lo menos al objetivo 5 y al cabezal 7 galvanométrico y, por otro lado a la cámara 10. El objetivo 5 y el cabezal 7 son totalmente controlados por la unidad de control 9. Para ello, la unidad de control 9 comprende todos los medios clásicos de memoria, de unidad de control y de tratamiento de datos.

La figura 5 muestra esquemáticamente que el procedimiento comprende principalmente:

- una etapa E1 de calibración del dispositivo 2,
- una etapa E2 de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie 1 que va a ser ablacionada, a partir de la etapa de calibración E1, por triangulación, y
- una etapa E3 de ablación de la superficie en tres dimensiones, según la cual la unidad de control 9 controla el módulo 6, a saber por lo menos el objetivo 5 y el cabezal galvanométrico 7, en función de la forma determinada de la superficie, para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y) y según una profundidad z, el haz 4 sobre la superficie 1 que va a ser ablacionada.

Los desarrollos siguientes muestran que la etapa E1 de calibración permite la etapa E2 de triangulación.

Como se muestra en la figura 7, el dispositivo 2 utiliza el principio de la triangulación para medir la profundidad z de un punto P1 a tratar sobre la superficie 1 que va a ser ablacionada.

Por triangulación en el triángulo (P0, P1, P2), conociendo por construcción la distancia D entre la cámara 10 (P2) y el cabezal 7 (P0), y por medición de dos ángulos beta y theta, la unidad de control 9 puede subir a la profundidad en z del punto iluminado P1, gracias a la relación conocida por el experto en la materia:

$$z = \frac{D}{\frac{1}{\tan(\frac{\pi}{2} - \text{beta})} + \frac{1}{\tan(\frac{\pi}{4} + \text{theta})}}$$

El conjunto matriz 100/objetivo 101 permite medir el ángulo theta que realiza el haz imagen del punto iluminado P1 con el eje óptico 102 del objetivo 101.

Conociendo la distancia d' entre el centro óptico P2 (considerando que se puede aproximar el objetivo 101 a una lente fina) del objetivo 101, y el centro c' de la matriz 100 de la cámara, así como la distancia (p-c') que separa el píxel iluminado p y el píxel central de la matriz c', la unidad de control 9 calcula el ángulo theta mediante la fórmula de trigonometría siguiente:

$$\text{theta} = \arctan\left(\frac{p - c'}{d'}\right).$$

Utilizando el cabezal galvanométrico 7, la unidad de control 9 puede subir hasta el ángulo beta que realiza el haz láser objeto con el eje óptico 70 del cabezal 7 galvanométrico, mediante la fórmula trigonométrica siguiente:

$$\beta = \arctan\left(\frac{x_1}{z_1}\right)$$

Como se muestra en la figura 7, en un mismo plano de focalización de profundidad z, los puntos de una línea vertical (según el eje Y) tienen los mismos parámetros de triangulación (D, beta y theta) si, y sólo si, los dos puntos de referencia de la triangulación P0 (cabezal 7) y P2 (cámara 10) están en el plano que contiene el eje óptico del cabezal 7 (xOz). En el plano de profundidad z, se diferencian dos puntos según el eje Y únicamente por sus coordenadas respectivas en el eje Y, y P1 es la proyección ortogonal del punto que la unidad de control desea medir a lo largo del eje Y en el plano (xOz).

Esta es por lo tanto únicamente la posición según el eje X del punto buscado que permitirá a la unidad de control 9 determinar la profundidad z por triangulación.

En conclusión, si por construcción del dispositivo 2 el triángulo (P0, P1, P2) está en el plano (xOz) (es decir, la cámara 10 está correctamente posicionada con respecto al cabezal 7), las variaciones del sistema de triangulación inducidas por una variación de posición según el eje Y del punto medido son eliminadas.

Por otra parte, como lo muestra la figura 8, la trayectoria del haz láser 4 que pasa por el cabezal galvanométrico 7 está totalmente definida por las dos coordenadas (sx, sy) del punto P de intersección del haz 4 con un plano R de referencia del cabezal 7. El plano R de referencia del cabezal 7 es el plano ortogonal al eje óptico 70 en el que todos los puntos tienen sus coordenadas conocidas del cabezal 7 (en un cuadrado cuyo tamaño está limitado por las características del sistema óptico 8 f-theta).

También por otro lado, y como se muestra en la figura 9, se denomina px a la posición realmente observada y medida según el eje X sobre la matriz 100, por ejemplo CCD, de la cámara 10, y que corresponde a la posición x en la que se encuentra efectivamente sobre un plano 11 de focalización z que intercepta un haz láser 4'.

Volviendo a la figura 7, se recuerda que un punto medido está definido por D, beta y theta. Los parámetros que varían en el sistema de medición, cuando el punto P1 (proyección ortogonal del punto medido sobre el plano (xOz)) se mueve, son:

- la coordenada sx según el eje X del punto a medir en el plano R de referencia del cabezal galvanométrico 7;
- la profundidad z del plano de focalización en el que se encuentra el punto P1;
- la coordenada px según el eje X de la imagen de este punto sobre la matriz 100 de la cámara 10.

Ahora bien, para un punto de profundidad z, existe uno y un solo par (sx, px) y la etapa E1 de calibración consiste, para la unidad de control 9, en encontrar las correspondencias que unen cada par de punto (sx, px) a z. Siendo la profundidad z el tamaño que la unidad de control 9 desea encontrar, la unidad de control 9 debe determinar la relación que, a partir de sx, permite iluminar el punto x del objeto que se desea medir, y de la medición px realizada por la cámara 10 del punto iluminado, permite a la unidad de control 9 subir a z.

Así, para un plano de focalización de profundidad z conocida, la unidad de control mide una pluralidad de pares de puntos (sx, px) y representa las curvas px(sx) para diferentes planos de focalización de varias z.

Para este fin, y como se muestra en la figura 10 en combinación con la figura 9, la etapa E1 de calibración comprende una etapa S1 según la cual el módulo 6, más precisamente el cabezal galvanométrico 7, ilumina un punto 111 de una placa de calibración 11, situada a una profundidad z, gracias a un haz 4'. La coordenada sx es por lo tanto conocida por la unidad de control 9 gracias al cabezal galvanométrico 7. Esta profundidad z debe ser conocida con una precisión mejor que la distancia l de Rayleigh, preferentemente inferior a una décima parte de esta distancia. Asimismo, el error ε de paralelismo de esta placa de calibración 11 con el plano (xOy) no debe exceder una décima parte de la distancia l de Rayleigh, como se muestra en la figura 11.

En estas condiciones, las placas 11 deben ser suficientemente planas y suficientemente grandes para interceptar el haz láser 4' sobre el conjunto del dominio alcanzable por este, sea cual sea la profundidad de z de la placa 11. La placa de calibración 11 se representa esquemáticamente en las figuras 11 y 17.

El haz 4' es el haz láser de ablación utilizado a potencia reducida, o un haz auxiliar de alineación (por ejemplo un láser HeNe) de la fuente 3, disponible, por construcción, sobre la fuente 3, y colineal a la fuente 3. La potencia del haz 4' se reduce ya que no es necesario efectuar una ablación de la placa de calibración 11, si no únicamente una

iluminación que pueda iluminar cada punto 111, de manera que cada punto 111 pueda ser observado por la cámara 10, como se explica a continuación.

Durante una etapa S2, la cámara 10 observa dicha placa de calibración 11 y el punto 111 iluminado. La unidad de control 9 determina entonces la coordenada p_x observada en la matriz 100 de la cámara 10.

Durante una etapa S2', el cabezal 7 del módulo 6 desplaza según dichos ejes X, Y el haz 4' en la mira 11, para iluminar una pluralidad de puntos 111 determinados de la placa de calibración 11.

La pluralidad de puntos 111 determinados de la placa de calibración 11 están repartidos según unas líneas continuas o líneas de puntos, y/o unas columnas continuas o de puntos.

Cuando el número de puntos 111 es suficiente (del orden de 5 por ejemplo), la unidad de control pasa a una etapa S3.

Durante la etapa S3, la unidad de control 9 establece una correspondencia entre:

- por un lado, la posición de iluminación s_x de cada uno de los puntos iluminados 111 de la placa de calibración 11 a la profundidad z , y
- por otro lado, la posición observada p_x por la cámara 10 de los puntos iluminados.

A este efecto, la unidad de control 9 traza, durante una etapa S31 comprendida en S3, la curva:

$$p_x = f(s_x).$$

Unos ejemplos de estas curvas son representados en la figura 12 (curvas con cruces). Se constata que estas curvas pueden ser aproximadas por un polinomio de segundo grado.

Durante una etapa S32, la unidad de control 9 determina después, a partir de la curva de la etapa S31, los coeficientes a , b y c , uniendo p_x y s_x en forma de un polinomio de segundo grado tal que:

$$p_x(s_x) = a \cdot s_x^2 + b \cdot s_x + c \quad (\text{EC. 1}).$$

Esta aproximación es posible ya que, como lo muestra la figura 13, a , b y c son sustancialmente unas funciones lineales de s_x .

Durante una etapa S33, la unidad de control 9 traza la curva correspondiente (en línea continua en la figura 12).

Durante una etapa S4, las etapas S1, S2, S2' y S3 descritas anteriormente son reanuda para otra profundidad z y la placa de calibración 11 es por lo tanto colocada en otra z . La reanudación de las etapas S1, S2, S2' y S3 permite una pluralidad de iluminaciones S1 por el módulo 6, una pluralidad de observaciones S2 por la cámara 10 y una pluralidad de establecimientos de correspondencias S3 por la unidad de control 9.

La unidad de control 9 dispone por lo tanto de una red de curvas como la representada en la figura 12, correspondiendo cada curva a una profundidad z dada.

Cuando el número de profundidades z es suficiente (del orden de 5 por ejemplo), la unidad de control ζ pasa a una etapa S5.

Se recuerda que para trazar una de las curvas de la figura 12, cinco pares de puntos (s_x , p_x) por ejemplo se colocan en correspondencia, para cada profundidad z de la placa de calibración 11. El haz 4' es por ejemplo proyectado en (coordenadas en s_x en mm):

-120, -60, 0, 60 y 120,

sobre cada una de las profundidades z de la placa de calibración 11.

Asimismo, las mediciones son efectuadas para cinco profundidades z , es decir, por ejemplo (coordenadas en z en mm, medida gracias a una regla graduada, por ejemplo):

-100, -50, 0, 50, 100

El plano de focalización de coordenada en z 0 mm es el plano de referencia del cabezal galvanométrico 7.

Durante una etapa S5, la unidad de control 9 determina una relación entre las correspondencias.

A este efecto, durante una etapa S51 comprendida en la etapa S5, la unidad de control 9 traza la curva:

$$z = g(c).$$

Un ejemplo de tal curva se representa en la figura 14 (curva con cruces).

Se constata que esta curva puede ser aproximada por un polinomio de segundo grado.

Durante una etapa S52, la unidad de control determina así los parámetros α , β y γ que une todos los pares z y c así determinados anteriormente bajo la forma de un polinomio de segundo grado tal como:

$$z(c) = \alpha \cdot c^2 + \beta \cdot c + \gamma \quad (\text{EC } 2)$$

La unidad de control 9 puede entonces trazar la curva correspondiente (en línea continua en la figura 14).

La etapa de calibración E1 gracias a la placa de calibración 11 es entonces terminada.

Volviendo a la figura 5, el procedimiento comprende también una etapa E2 de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie 1 que va a ser ablacionada, a partir de la etapa de calibración E1, por triangulación.

Los desarrollos siguientes se refieren a la etapa E2.

En referencia a las figuras 15 y 16, para la etapa E2 de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie 1, el cabezal galvanométrico 7, es decir el módulo 6, ilumina, durante una etapa S6 un punto e de la superficie 1 que va a ser ablacionada. La iluminación se efectúa, así como para la etapa E1, gracias a un haz 4' de potencia reducida.

Durante la etapa S6, la unidad de control 9 determina por lo tanto la coordenada s_{xe} según el eje X, gracias al cabezal galvanométrico 7.

Durante una etapa S7, la cámara 10 observa la superficie 1.

La unidad de control 9 determina entonces la coordenada p_{xe} observada sobre la matriz 100 de la cámara 10.

Durante una etapa S8, la unidad de control 9 determina la forma en tres dimensiones de la superficie 1 gracias a las correspondencias establecidas por la unidad de control 9 durante la etapa de calibración E1.

Así, durante una etapa S81, comprendida en la etapa S8, la unidad de control 9 determina el valor, gracias a los valores p_{xe} y s_{xe} , por la fórmula:

$$ce = p_{xe} - a \cdot s_{xe}^2 - b \cdot s_{xe} \quad (\text{EC3})$$

utilizando los coeficientes a y b determinados por la unidad de control 9 durante la etapa E1 de calibración.

Los coeficientes a y b se seleccionan por la unidad de control 9 como se ha indicado anteriormente.

Como se muestra en la figura 19, al final de la etapa S4 de la etapa E1, la unidad de control 9 dispone de una red de curvas C representadas en líneas continuas en la figura 19. Cada curva C corresponde a valores de los coeficientes a , b y c diferentes.

Ahora bien, durante las etapas S6 y S7 de E2, la unidad de control 9 determina s_{xe} y p_{xe} (representado por una cruz 1000 en la figura 19).

Para seleccionar los buenos valores de a y b en (EC3), la unidad de control 9 efectúa una interpolación Δ .

La unidad de control 9 calcula y almacena la coordenada ox de los puntos que pertenecen a las curvas C de la red de calibración de la figura 19 y que tiene su coordenada s_x idéntica a la de s_{xe} del punto buscado. En una segunda fase, mediante una serie de ensayos sucesivos, la unidad de control 9 determinará la curva C1 de la red de calibración que se encuentra justo encima del punto a medir. Si no hay curva encima de este punto, la unidad de control 9 toma la curva C2 que se encuentra justo por debajo. Finalmente, la unidad de control 9 utiliza la relación (EC3) que corresponde a la curva determinada, con los valores de a y b correspondientes.

Además, durante una etapa S82, también comprendida en la etapa S8, la unidad de control 9 determina la profundidad ze por la fórmula:

$$ze = \alpha \cdot ce^2 + \beta \cdot ce + \gamma \quad (EC4)$$

utilizando los parámetros α , β y γ determinados por la unidad de control 9 durante la etapa E1 de calibración.

Como se muestra en la figura 15, para cada punto $e1$ iluminado por el haz 4' en la superficie 1, la unidad de control 9 puede determinar la profundidad $ze1$ asociada.

Como se indica en la etapa S9 de la figura 16, las etapas S6, S7 y S8 descritas anteriormente se reanuda por tantos puntos de la superficie como se desea, en función de la precisión deseada de determinación de la superficie 1. La distancia máxima según los ejes X e Y entre dos puntos de medición sucesivos depende de la distancia de Rayleigh del haz láser utilizado y de la variación máxima según la profundidad z observada en la superficie 1 que va a ser ablacionada.

Se han representado en la figura 15 sólo dos ejemplos $e1$ y $e2$, para $ze1$ y $ze2$. La unidad de control 9 determina así la forma en tres dimensiones de la superficie 1 gracias a las correspondencias establecidas por la unidad de control 9 durante la etapa de calibración.

La etapa E2 de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie 1 que va a ser ablacionada es por lo tanto terminada.

Volviendo en la figura 5, el procedimiento comprende también una etapa E3 de ablación de la superficie en tres dimensiones, según la cual la unidad de control 9 controla el módulo 6 en función de la forma determinada de la superficie, para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y) y según una profundidad z , el haz 4 sobre la superficie 1 que va a ser ablacionada.

Se parece aquí a la ablación conocida del experto en la materia, y esta etapa no se describe más en detalle a continuación de la presente descripción.

Sin embargo, para la etapa E3 de ablación, la unidad de control 9 controla ventajosamente el módulo 6 para focalizar y dirigir el haz 4 sobre todos los puntos de la superficie 1 que va a ser ablacionada, según unas profundidades z sucesivas. De esta manera, la unidad de control 9 controla un número de veces menor el módulo 6, y puede por lo tanto ganar tiempo para la ablación. La unidad de control 9 controla el módulo 6 de manera que todos los puntos a ser ablacionados situados en la misma profundidad z estén tratados, antes de tratar los puntos de la superficie 1 situados a otra profundidad.

Como se muestra en la figura 20, el dispositivo comprende ventajosamente dos cámaras 10, lo que permite tener un mejor conocimiento de la superficie 1 que va a ser ablacionada, lo que permite, llegado el caso, obtener una mejor ablación, por supuesto si el haz 4 puede tener acceso a las zonas observadas por las cámaras (ablación de zonas no observadas en el caso de una única cámara).

Los desarrollos que siguen se refieren a los ajustes a efectuar para obtener una mejor precisión para la etapa E1 de calibración del dispositivo 2.

Se recuerda que el cabezal 7 y la cámara 10 deben estar en el mismo plano (xOz) (véase la figura 7). La placa de calibración 11 debe estar paralela al plano (xOy) con una tolerancia máxima admisible inferior a la distancia l de Rayleigh del haz láser utilizado, preferiblemente mejor que una décima parte de esta distancia. Sin embargo, si tal tolerancia se superase, la unidad de control 9 podría efectuar una corrección de la posición observada px por la cámara 10 de los puntos iluminados, para compensar los efectos de la distorsión.

El cabezal 7 es parametrado de manera que apunta al haz láser sobre el centro de su plano de referencia R, para definir su eje óptico 70. El haz del cabezal 7 debe estar en un plano (xOz). Un accionador simple y conocido por el experto en la materia permite desplazar la placa de calibración 11 de referencia a lo largo del eje óptico del cabezal. Como se muestra en la figura 17, el haz láser 4' del cabezal 7 está alineado sobre el eje 70, si corta los dos planos z y z' en el mismo punto O.

Una vez que el eje óptico 70 está en el plano (xOz), siendo los puntos P0 y P1, con el parametrado anterior (el punto P1 es la intersección del eje óptico 70 con la placa de calibración 11), situados en el eje 70, los dos puntos P0 y P1 están situados por lo tanto en el mismo plano (xOz).

Además, el centro de la matriz 100 y el centro P2 del objetivo 101 están sustancialmente colocados sobre la misma recta que P1. El triángulo definido por los puntos (P0, P1, P2) está así colocado en el mismo plano (xOz).

5 Para asegurarse que la matriz 100 es ortogonal al plano (xOz), y como se muestran en las figuras 17 y 18, el cabezal 7 ilumina un punto dado de coordenada y_1 según el eje Y en la placa de calibración 11. Por un tratamiento de imágenes, la unidad de control 9 mide la coordenada py_1 pixélica según el eje Y del punto imagen sobre la matriz 100 de la cámara 10. Todavía en la placa de calibración 11 a la misma profundidad z, el cabezal 7 ilumina un segundo punto de la misma coordenada en x, pero de coordenada y_2 opuesta a la anterior en y. De la misma manera, la unidad de control 9 mide la coordenada py_2 pixélica en y sobre la matriz 100. Si esta coordenada es la opuesta de la del primer punto con respecto al punto central de la 100, entonces la matriz 100 es ortogonal al plano (xOz).

10

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de ablación de una superficie (1) en tres dimensiones gracias a un dispositivo (2) de ablación, comprendiendo el dispositivo (2):

- una fuente (3) láser para generar un haz (4) láser pulsado;
- un módulo (6) óptico para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y) y según una profundidad (z), el haz (4) sobre la superficie (1) que va a ser ablacionada,
- por lo menos una cámara (10) de observación de la superficie que va a ser ablacionada; y
- una unidad de control (9) conectada al módulo (6) y a la cámara (10);

estando el procedimiento caracterizado por que comprende

- una etapa (E1) de calibración del dispositivo (2) según la cual
- el módulo (6) ilumina (S1, S2') según dichos ejes (X, Y) una placa (11) de calibración, situada a una profundidad (z), para iluminar una pluralidad de puntos (111) determinados de la placa de calibración (11), mientras que la cámara (10) observa (S2) dicha placa de calibración (11), estableciendo (S3) la unidad de control (9) una correspondencia entre, por un lado, la posición de iluminación (sx) de cada uno de los puntos iluminados (111) de la placa de calibración (11) a la profundidad (z) y, por otro lado, la posición observada (px) por la cámara (10) de los puntos iluminados;

siendo la placa de calibración (11) sucesivamente posicionada (S4) a una pluralidad de profundidades (z) durante la etapa de calibración, para permitir una pluralidad de iluminaciones (S1) por el módulo (6), de observaciones (S2) por la cámara (10) y de establecimientos de correspondencias (S3) por la unidad de control (9);

la unidad de control (9) establece (S5) una relación entre las correspondencias,

- una etapa (E2) de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie (1) que va a ser ablacionada, a partir de la etapa de calibración (E1), por triangulación, y
- una etapa (E3) de ablación de la superficie en tres dimensiones, según la cual la unidad de control (9) controla el módulo (6) en función de la forma determinada de la superficie, para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y) y según una profundidad (z), el haz (4) sobre la superficie (1) que va a ser ablacionada.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que, para el establecimiento, para cada profundidad z, de la correspondencia entre

- por un lado, la posición de iluminación sx de cada uno de los puntos iluminados (111) de la placa de calibración (11) a dicha profundidad z, y
- por otro lado, la posición observada px por la cámara (10),

durante la etapa (E1) de calibración, la unidad de control (9) determina (S3) los coeficientes a, b y c que unen px y sx en forma de un polinomio de segundo grado, tal como:

$$px(sx) = a \cdot sx^2 + b \cdot sx + c \quad (EC \ 1)$$

y

la unidad de control (9) determina (S5) también los parámetros α , β y γ que unen todos los pares z y c determinados de este modo anteriormente en forma de un polinomio de segundo grado, tal como:

$$z(c) = \alpha \cdot c^2 + \beta \cdot c + \gamma \quad (EC \ 2)$$

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que, para la etapa (E1) de calibración, la pluralidad de puntos (111) determinados de la placa de calibración (11) están repartidos según unas líneas continuas o de puntos, y/o unas columnas continuas o de puntos.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 o 3, en el que por lo menos cinco pares (sx, px) se ponen en

correspondencia para cada profundidad z de la placa de calibración (11), para la calibración, siendo la placa de calibración (11) colocada por lo menos en cinco profundidades (z) diferentes.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la unidad de control (9) efectúa una corrección de la posición observada (px) por la cámara (10) de los puntos iluminados, para compensar los efectos de la distorsión.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que, para la etapa (E2) de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie (1), el módulo (6) ilumina ($S6$) según dichos ejes (X , Y) la superficie (1) que va a ser ablacionada, para iluminar una pluralidad de puntos (sxe) determinados de la superficie (1), mientras que la cámara (10) observa ($S7$) la superficie (1) y así los puntos iluminados (pxe), determinando ($S8$) la unidad de control (9) la forma en tres dimensiones de la superficie (1) gracias a las correspondencias y la relación establecida por la unidad de control (9) durante la etapa de calibración.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 6, en el que, para la etapa (E2) de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie (1), a partir de la posición observada pxe en la cámara (10) de los puntos iluminados sxe por el módulo (6), la unidad de control (9) determina ($S81$) el valor gracias a los valores pxe y sxe por la fórmula:

$$ce = pxe - a \cdot sxe^2 - b \cdot sxe \quad (EC\ 3)$$

utilizando los coeficientes a y b determinados por la unidad de control (9) durante la etapa (E1) de calibración,

después determina ($S82$) la profundidad ze por la fórmula:

$$ze = \alpha \cdot ce^2 + \beta \cdot ce + \gamma \quad (EC\ 4)$$

utilizando los parámetros α , β y γ determinados por la unidad de control (9) durante la etapa (E1) de calibración.

8. Procedimiento según la reivindicación 6, en el que la unidad de control (9) realiza una interpolación de pxe y sxe gracias a los coeficientes a y b determinados durante la etapa de calibración (E1).

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, en el que, para la etapa (E3) de ablación, la unidad de control (9) controla el módulo (6) para focalizar y dirigir el haz (4) sobre la superficie (1) que va a ser ablacionada según unas profundidades (z) sucesivas.

10. Dispositivo (2), que comprende:

- una fuente (3) láser para generar un haz (4) láser pulsado;
- un módulo (6) óptico para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X , Y) y según una profundidad (z), el haz (4) sobre una superficie (1) en tres dimensiones que va a ser ablacionada,
- por lo menos una cámara (10) de observación de la superficie que va a ser ablacionada;

estando dicho dispositivo (2) caracterizado por que comprende además una unidad de control (9) conectada al módulo (6) y a la cámara (10), y adaptada para la realización de un procedimiento de ablación que comprende:

- una etapa (E1) de calibración del dispositivo (2) según la cual
- el módulo (6) ilumina ($S1$, $S2'$) según dichos ejes (X , Y) una placa (11) de calibración, situada a una profundidad (z), para iluminar una pluralidad de puntos (111) determinados de la placa de calibración (11), mientras que la cámara (10) observa ($S2$) dicha placa de calibración (11), estableciendo ($S3$) la unidad de control (9) una correspondencia entre, por un lado, la posición de iluminación (sx) de cada uno de los puntos iluminados (111) de la placa de calibración (11) a la profundidad (z) y, por otro lado, la posición observada (px) por la cámara (10) de los puntos iluminados;

siendo la placa de calibración (11) sucesivamente posicionada ($S4$) a una pluralidad de profundidades (z) durante la etapa de calibración, para permitir una pluralidad de iluminaciones ($S1$) por el módulo (6), de observaciones ($S2$) por la cámara (10) y de establecimientos de correspondencias ($S3$) por la unidad de control (9);

la unidad de control (9) establece ($S5$) una relación entre las correspondencias,

- una etapa (E2) de determinación de la forma en tres dimensiones de la superficie (1) que va a ser ablacionada, a partir de la etapa de calibración (E1), por triangulación, y
- 5 - una etapa (E3) de ablación de la superficie en tres dimensiones, según la cual la unidad de control (9) controla el módulo (6) en función de la forma determinada de la superficie, para focalizar y dirigir, según unos ejes que definen un plano (X, Y) y según una profundidad (z), el haz (4) sobre la superficie (1) que va a ser ablacionada.

FIG. 1

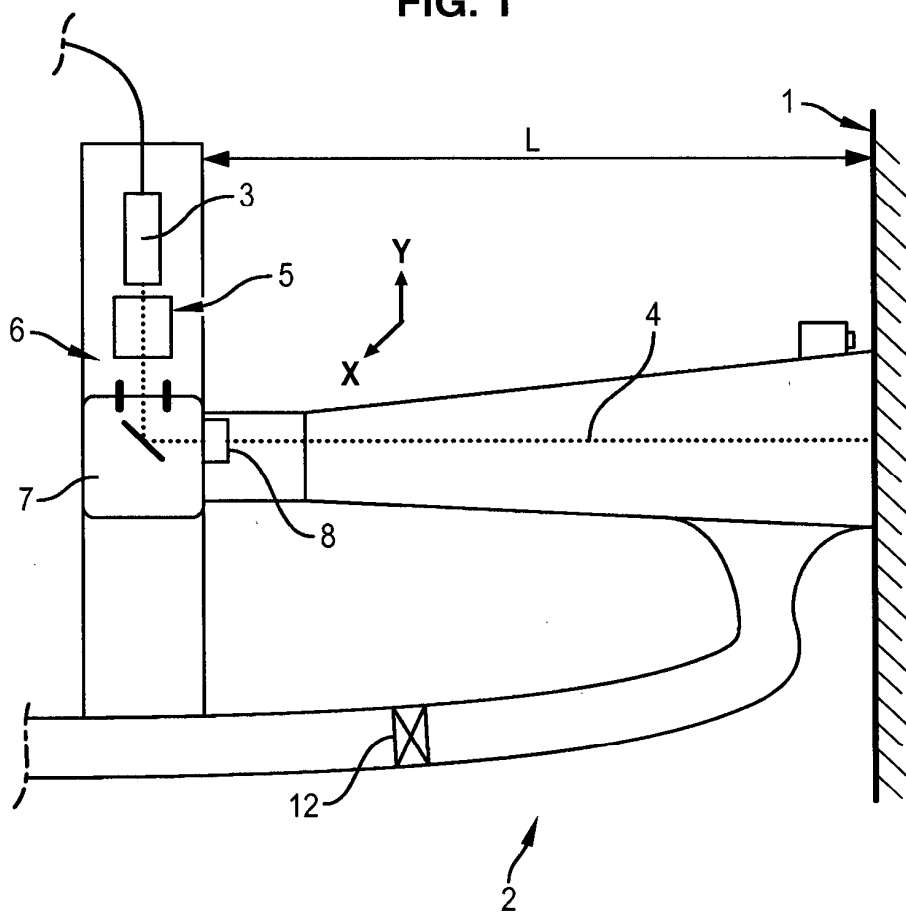


FIG. 2

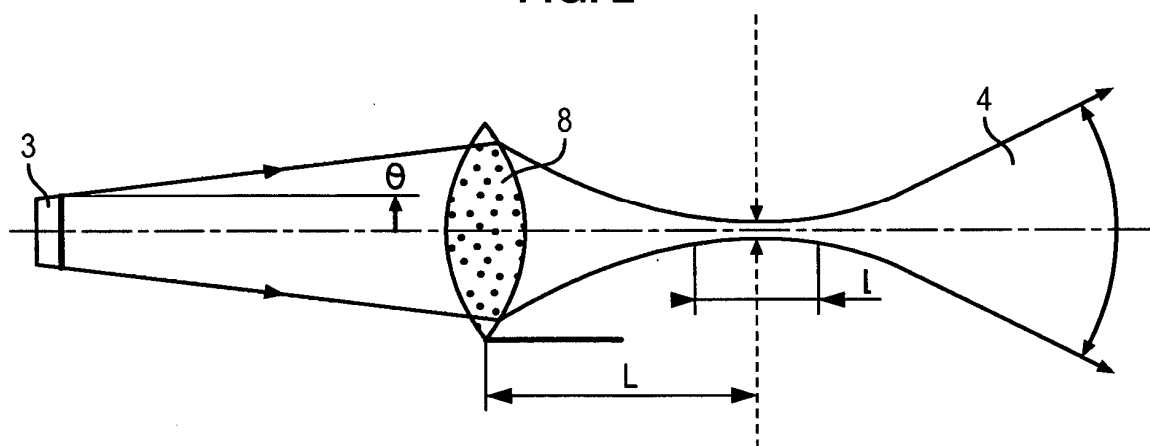


FIG. 3

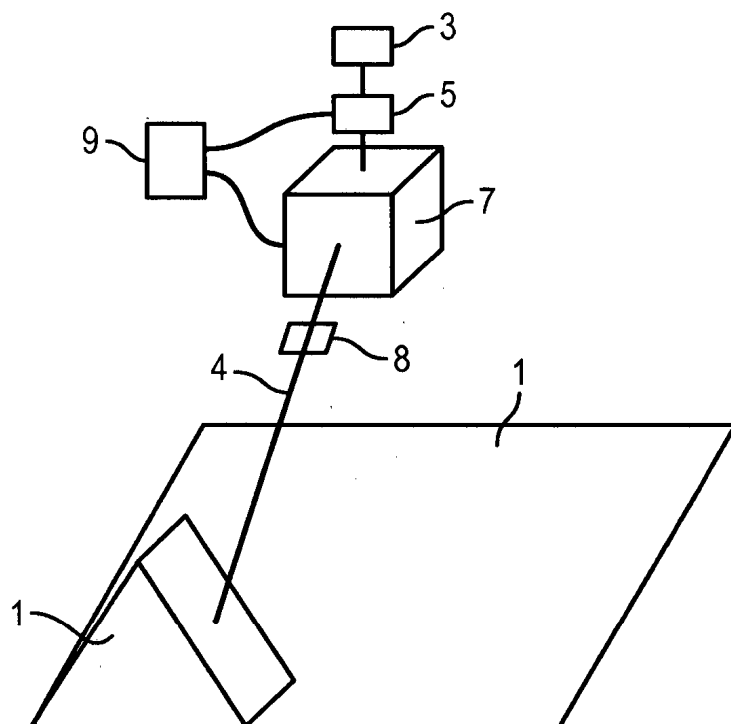


FIG. 4

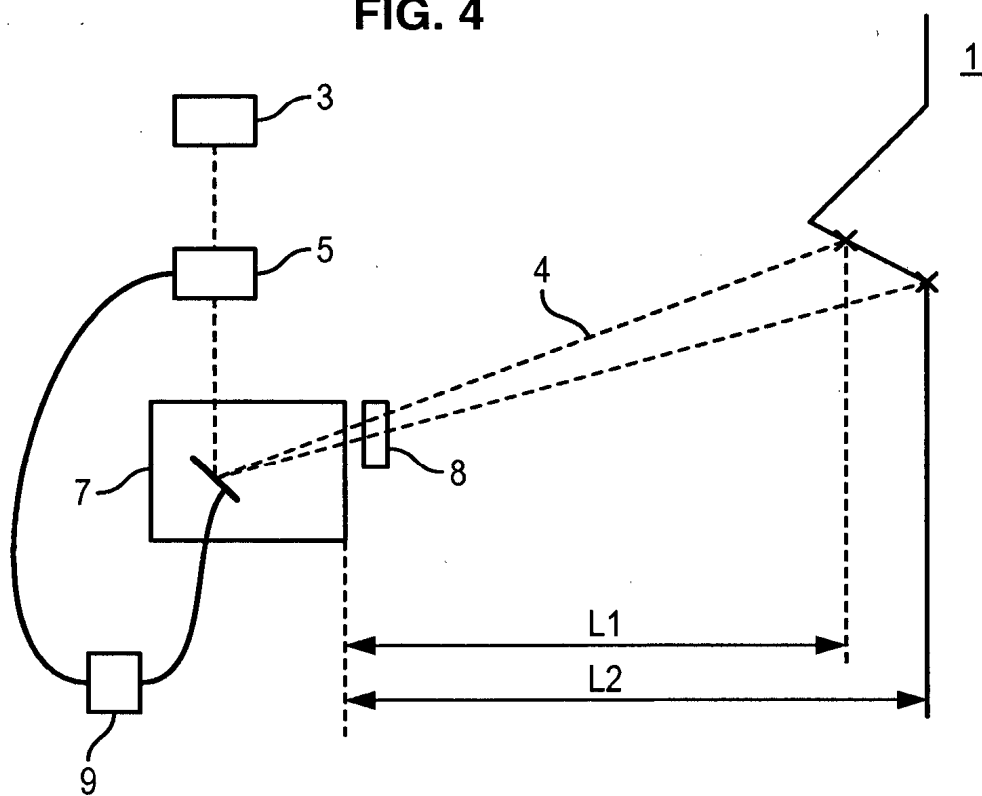


FIG. 5

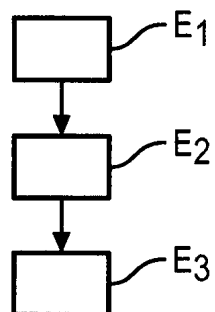


FIG. 6

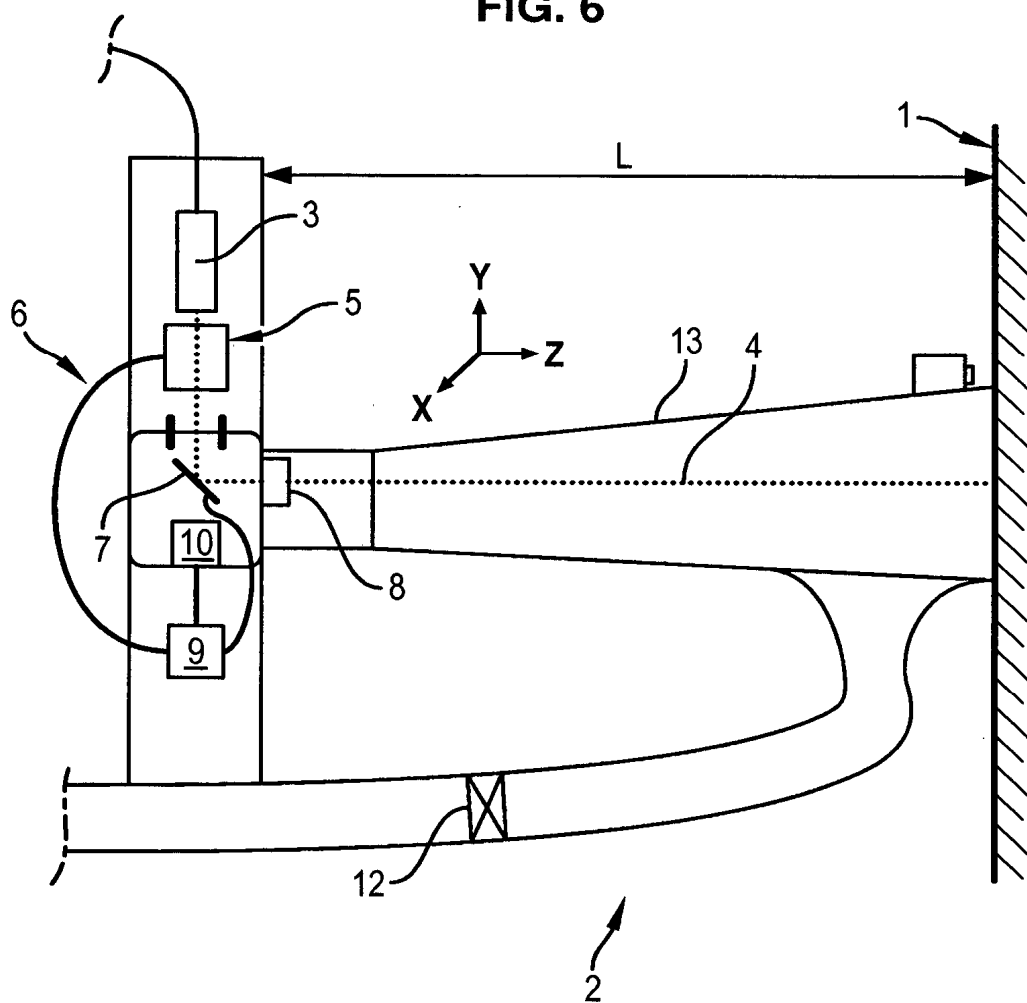


FIG. 7

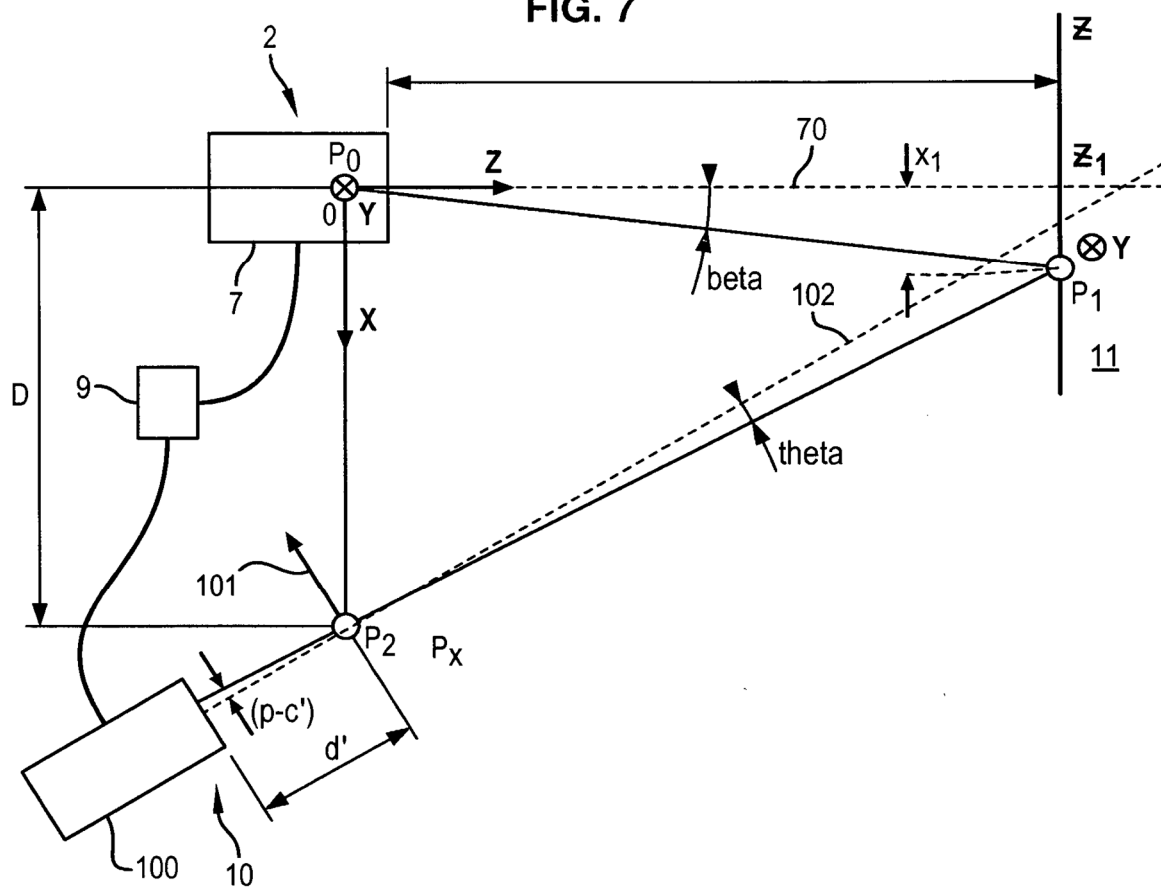


FIG. 8

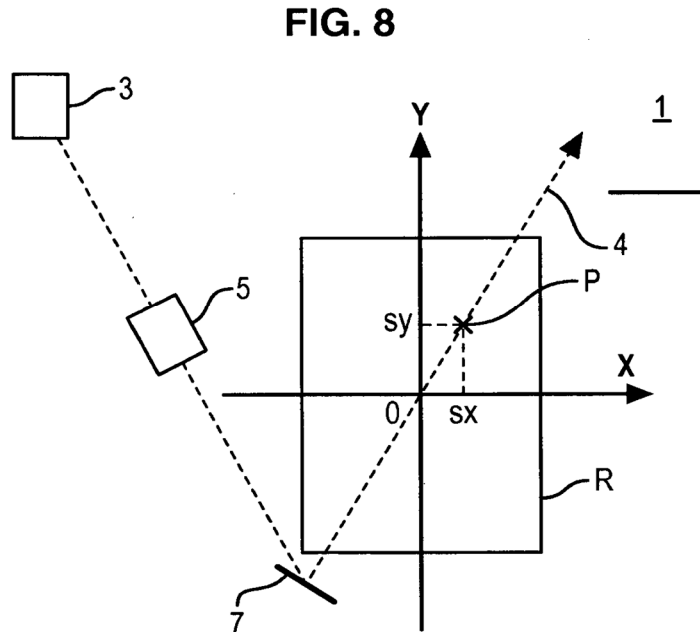


FIG. 9

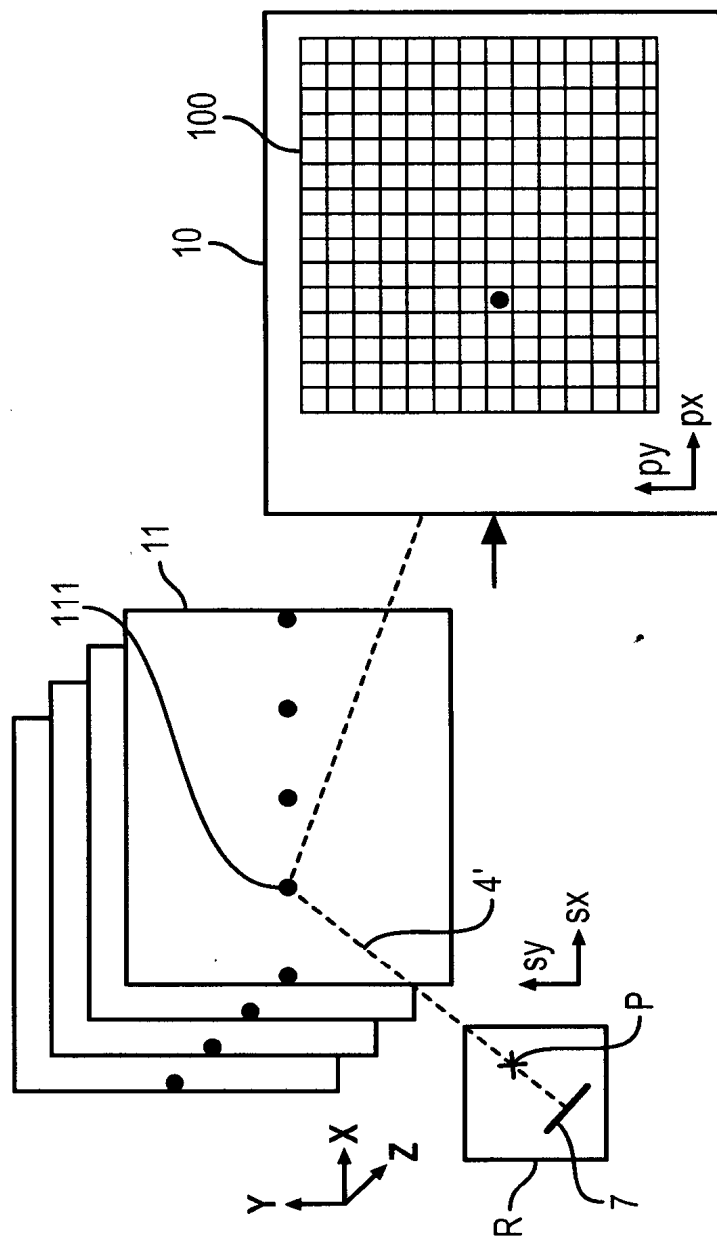


FIG. 10

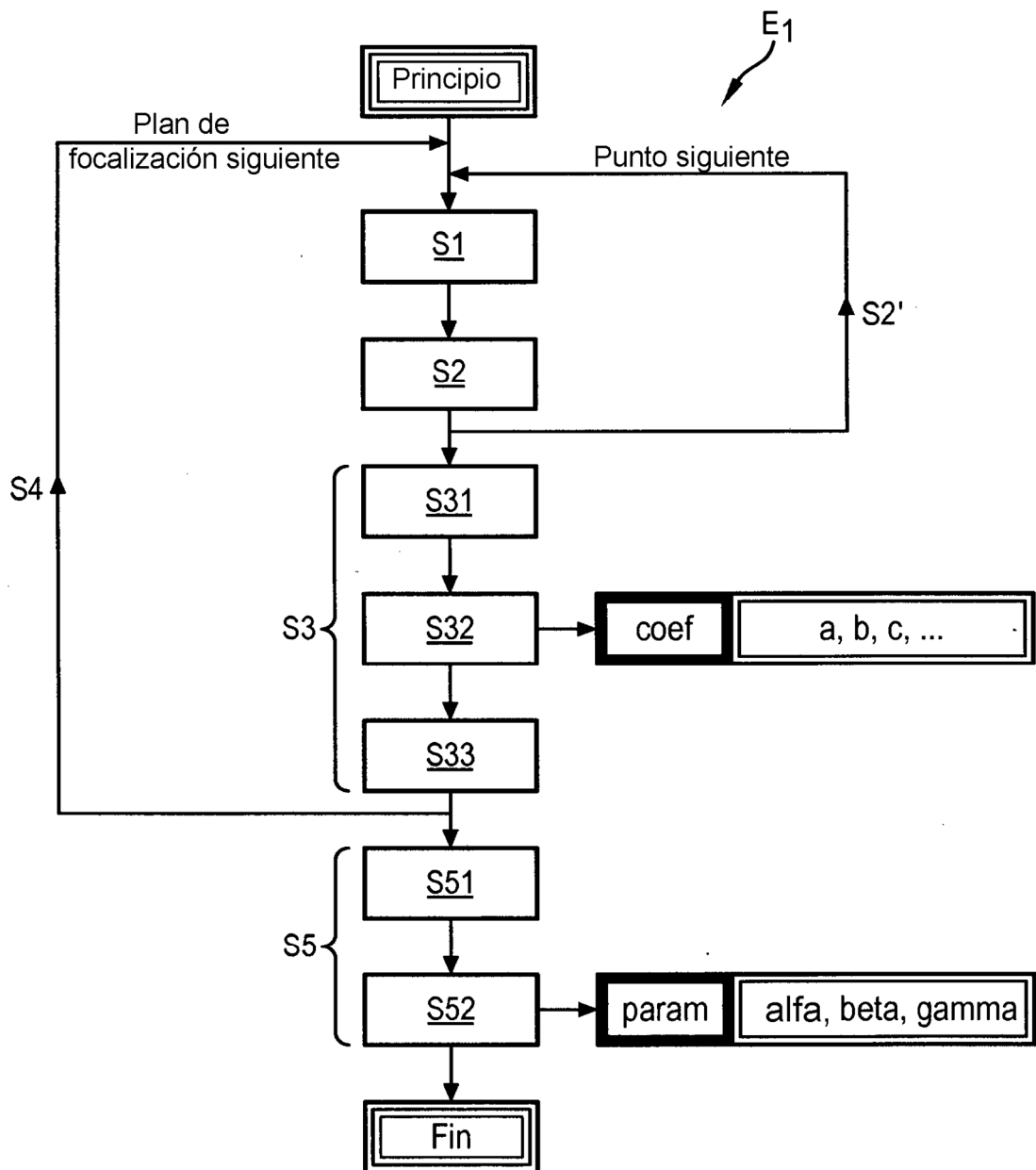


FIG. 11

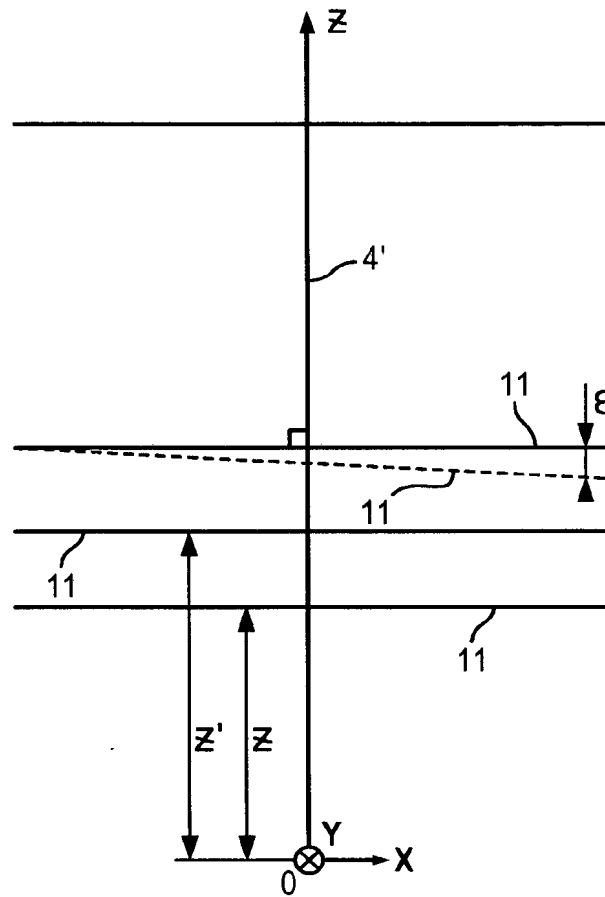


FIG. 12

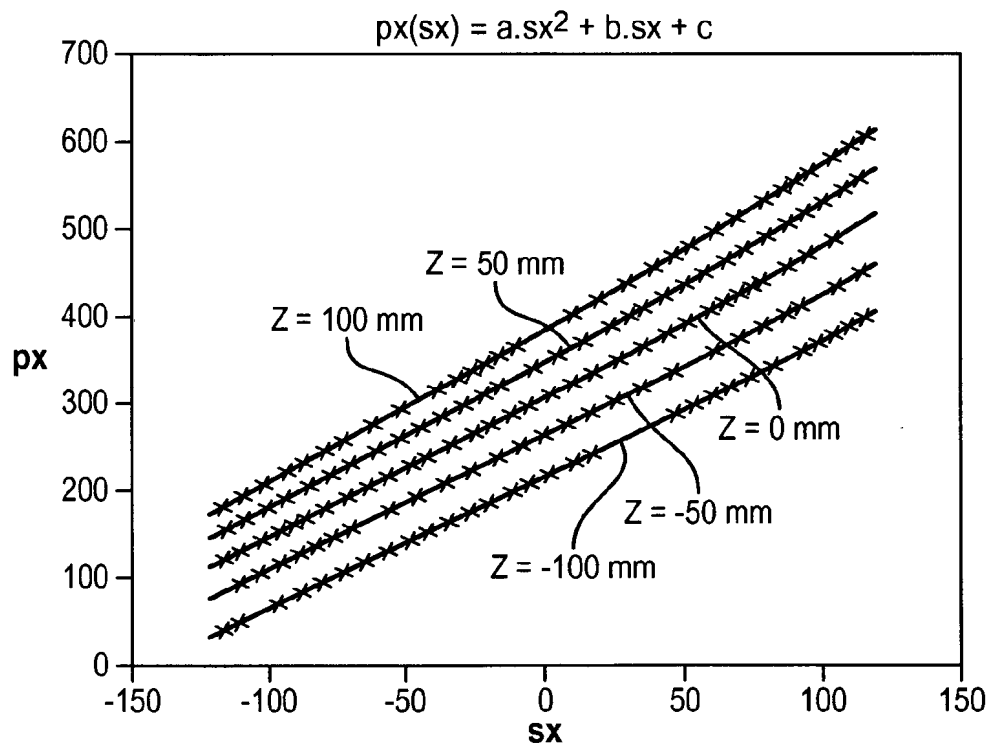


FIG. 13

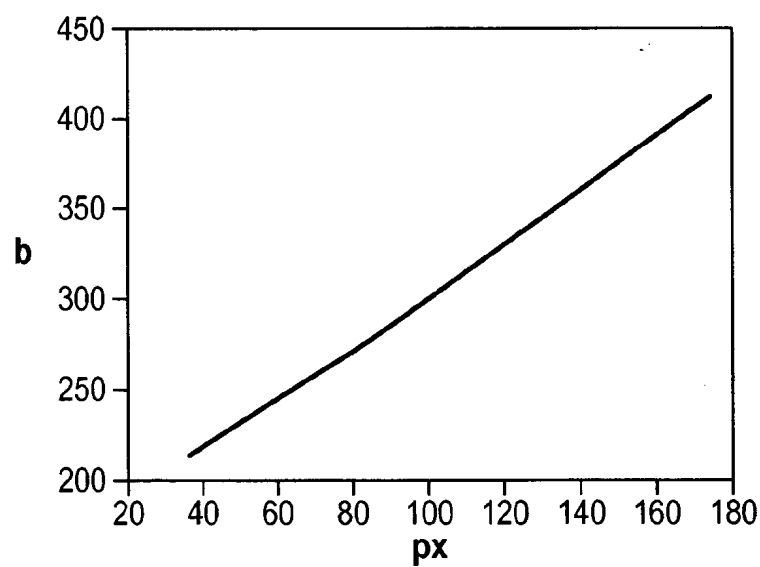
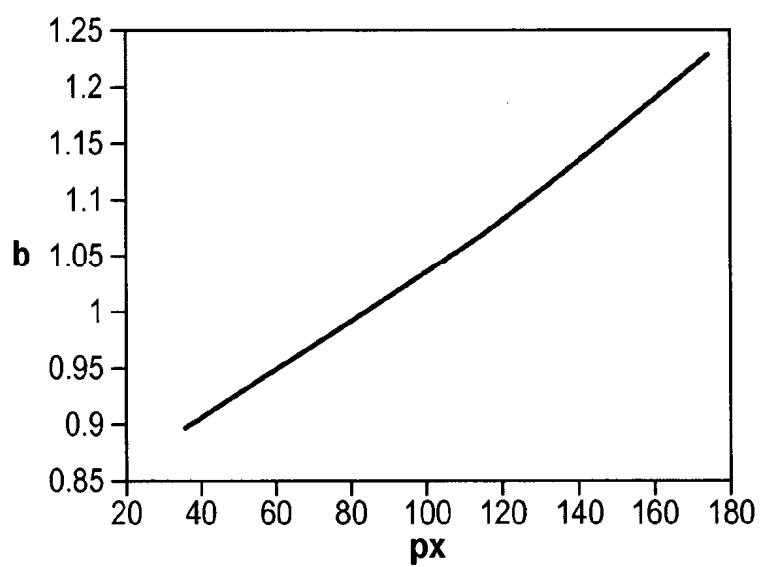
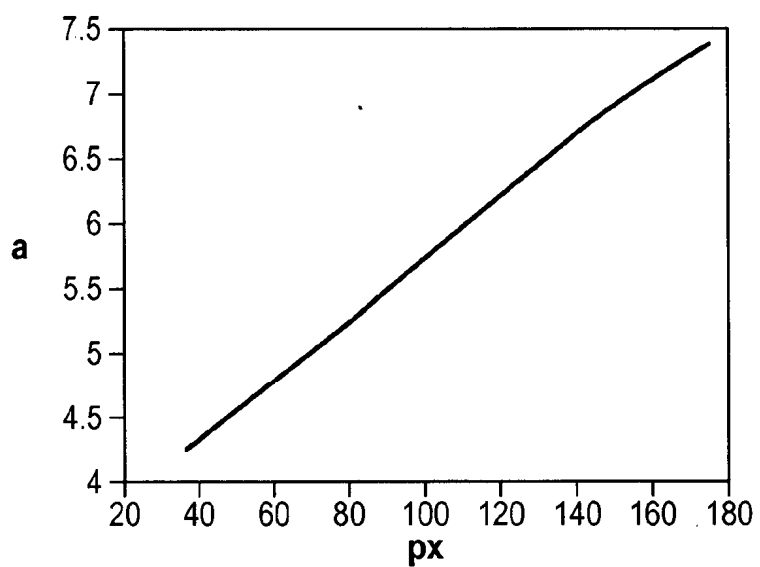


FIG. 14

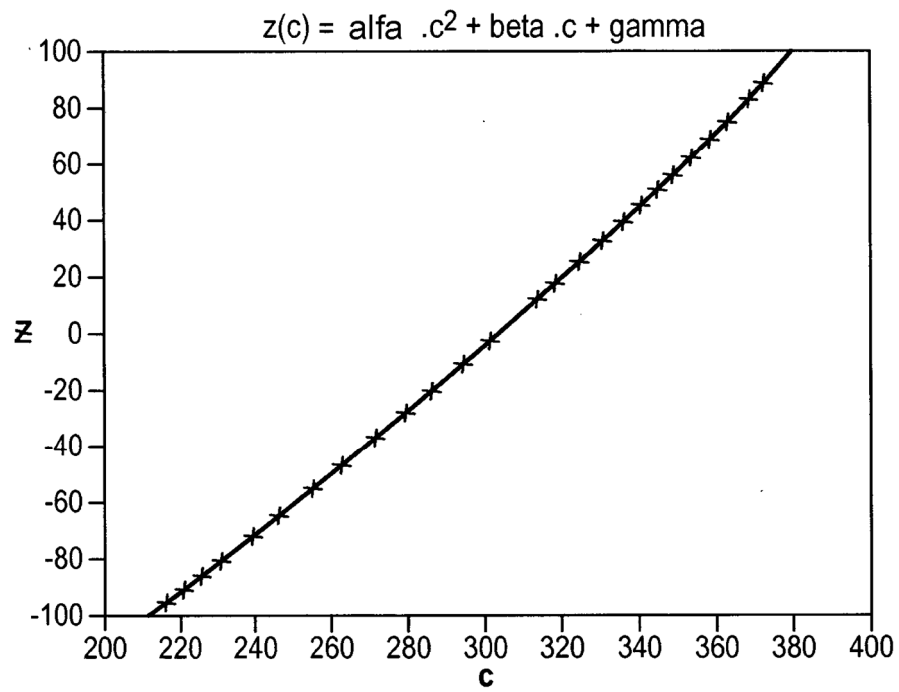


FIG. 15

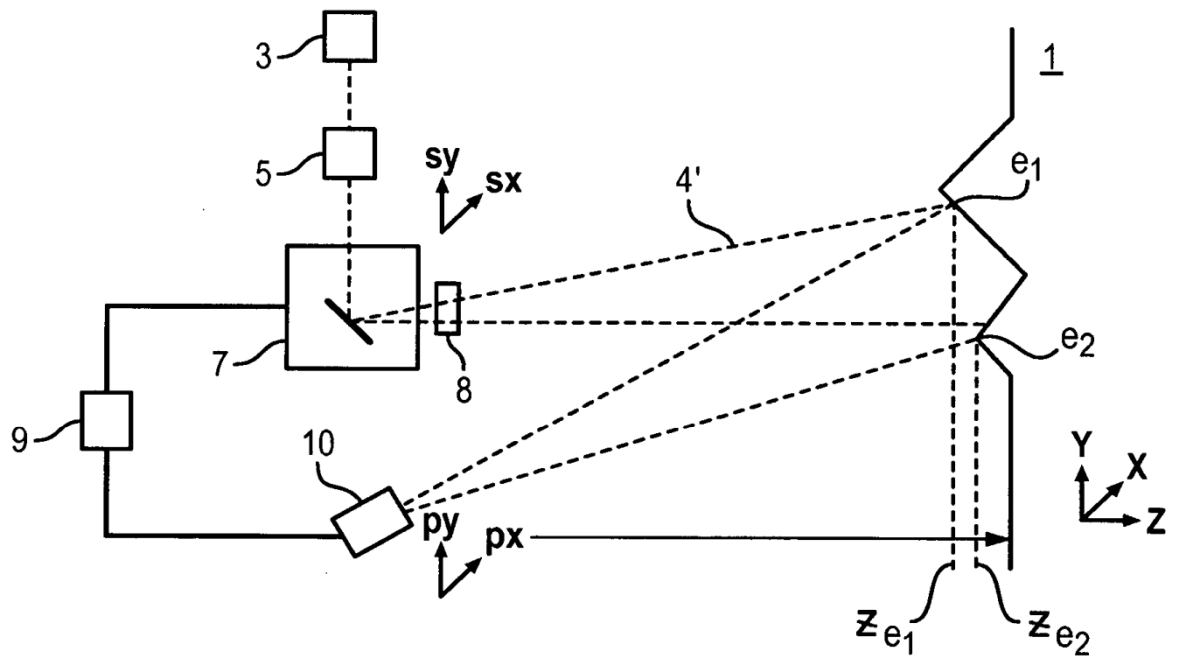


FIG. 16

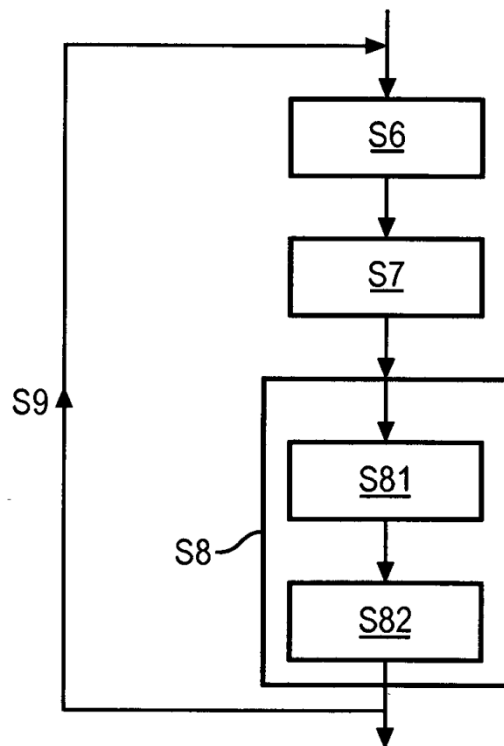


FIG. 17

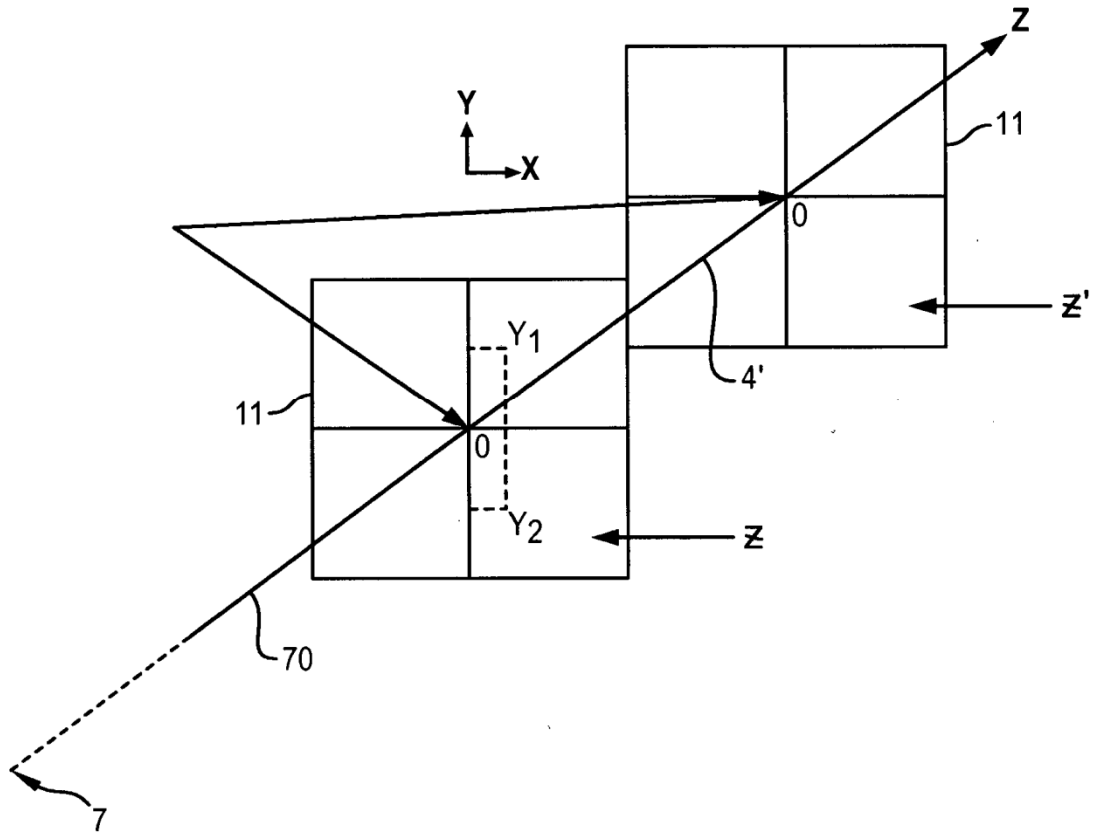


FIG. 18

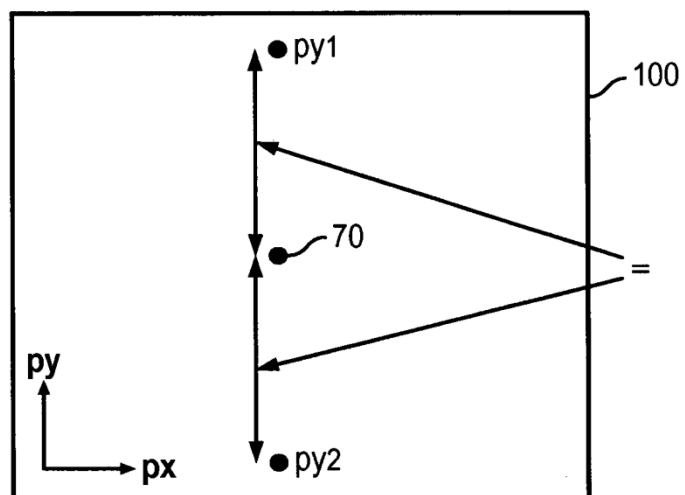


FIG. 19

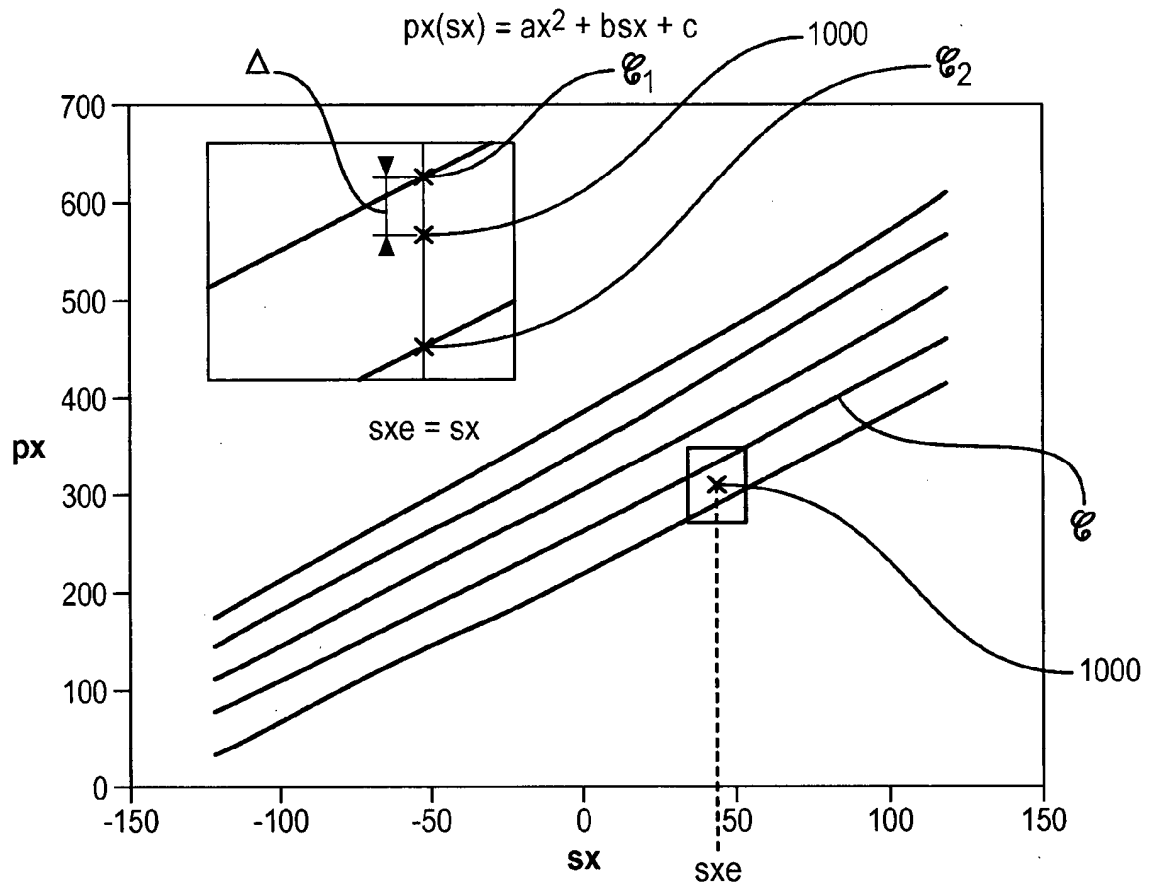


FIG. 20

