

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 526 825**

51 Int. Cl.:

G01B 11/25 (2006.01)

G01B 11/30 (2006.01)

B21B 38/02 (2006.01)

G01M 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.07.2008 E 08012399 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.09.2014 EP 2031348**

54 Título: **Procedimiento de inspección de superficies para la detección de defectos de la superficie y/o medir la topografía de la superficie**

30 Prioridad:

09.07.2007 DE 102007032113

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

15.01.2015

73 Titular/es:

**VDEH-BETRIEBSFORSCHUNGSINSTITUT GMBH
(100.0%)
SOHNSTRASSE 65
40237 DÜSSELDORF, DE**

72 Inventor/es:

**KRAMBEER, HAGEN;
MÜLLER, ULRICH DR.;
COEN, GÜNTHER DR. y
POLZER, JAN DR.**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 526 825 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 inspección de superficies para la detección de defectos de la superficie y/o medir la topografía de la superficie

5 El invento se refiere a un procedimiento de inspección de superficies para la detección de defectos de la superficie y/o medir la topografía de la superficie de superficies continuamente reflectantes.

10 La planitud de productos industriales, especialmente acero en banda o bandas de metal pertenece hoy a una de las características de calidad más importantes. La conservación de tolerancias de planitud muy estrechas es no solo una medida de la bondad del producto listo para la venta, sino que también es una suposición para el desarrollo sin problemas de los procesos de mecanización, especialmente en el desarrollo de procesos cuya automatización aumenta continuamente. La detección online de la planitud de procesos de mecanización de bandas, por ejemplo en el proceso de laminación o en el proceso de mecanización que sigue a éste así como la optimización de la planitud mediante sistemas de control y regulación pertenece por ello a las misiones más prioritarias para la mejora de la calidad.

15 En el campo de la mecanización de bandas de metal se conocen diferentes procesos para la detección online con técnicas de medición de la planitud de bandas, y en aplicación industrial, como por ejemplo procesos ópticos que trabajan sin contacto, que hacen posible la medición sobre bandas quasi libres de tracción, cuando se trata de bandas con superficies no reflectantes o por ejemplo procedimientos basados en tensiones, en los cuales con los llamados rodillos de medida se calcula la distribución de tensiones en la banda bajo tracción.

20 Para la medición online de la superficie en estas bandas de metal se utilizan cada vez más puntos de medida ópticos los cuales trabajan según el principio de proyección por tiras. Como resultado, estos sistemas de medición suministran la forma de la superficie como un matriz $Z_{ij}(X_i, Y_j)$. Con ello se puede calcular, entre otros, una llamada distribución longitudinal la cual a su vez es utilizada como magnitud de medida para la regulación de un tren de laminación. En laminación de bandas los campos de medida son, en la práctica, por lo general de 2m x 2m de tamaño. Mediante la medición superficial en un determinado instante (tiempo de iluminación de la cámara) se llega a que no exista ninguna falsificación del resultado de la medición ocasionado por el propio movimiento del bien medido. Estos sistemas de medida son adecuados ciertamente solo para la medición de tales superficies, las cuales absorben luz por lo menos parcialmente difusa. Los sistemas no pueden ser utilizados para la medición de superficies altamente reflectantes, como por ejemplo acero inoxidable o aluminio.

30 Por el documento DE 196 43 018 A1 se conoce un dispositivo para acero reflectante con una unidad de inspección para medir defectos de planitud, que presenta una cámara y una retícula de luz a través de la que pasa la luz emitida por una fuente luminosa. El dispositivo presenta además una banda de metal reflectante que se mueve. La cámara y la retícula de luz están dispuestas de tal manera que la dirección visual de la cámara está dirigida hacia una zona por la que se mueve una superficie de la banda de metal reflectante. La retícula de luz está situada de tal manera y asociada con esa zona de tal manera que el paso de los rayos de los rayos visuales de la cámara lleva desde la cámara a través de la superficie de la banda de metal hasta superficie de la retícula de luz. El foco de la cámara está ajustado sobre la retícula.

40 Ante este historial, el invento tiene como base la misión de proponer un procedimiento de inspección de superficies para detectar defectos de las superficies y/o medir la topografía de superficie de superficies continuas, que también puede ser utilizado para superficies altamente especulares. Preferentemente el procedimiento debe estar diseñado de tal manera que pueda ser construido robusto. De manera ideal solo necesita una única toma por cada medición. Además, de manera ideal la inversión en calibración debe ser mínima.

Esta misión será resuelta por el procedimiento de inspección de superficies según la reivindicación 8. Diseños ventajosos están reproducidos en las reivindicaciones secundarias.

45 El invento se aprovecha especialmente de la propiedad de las superficies especulares de reflejar los rayos de luz de acuerdo con la Ley de la reflexión. Se preverá una cámara que esté orientada de tal manera que vea la imagen espejo de una pantalla igualmente prevista (una placa pantalla) con una muestra estructurada en la superficie reflectante que hay que medir. Si la superficie reflectante es un plano entonces la cámara recibe la muestra de la placa pantalla sin distorsión. Modificaciones en el objeto medido reflejado, como por ejemplo, arcos, ondas, arcos

transversales o defectos de la superficie deforman la imagen espejo de la placa pantalla. Según el procedimiento acorde con el invento se puede utilizar la deformación de la muestra de la placa pantalla en la fotografía tomada por la cámara, para el cálculo de la evolución de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada.

5 Un dispositivo para una banda de metal reflectante con una unidad de inspección para detectar defectos de superficies y/o medir la topografía de superficies presenta una cámara y una pantalla sobre la que está representada una muestra. La dirección visual de la cámara está dirigida hacia una zona por la que se mueve una superficie de la banda de metal reflectante que se mueve. La superficie de la pantalla sobre la que se representa la muestra está orientada hacia esa zona, de tal manera que el paso de rayos de los rayos de la vista de la cámara lleva desde la cámara a través de la superficie de la banda de metal reflectante hasta la superficie de la pantalla. La cámara está
10 entonces enfocada sobre la superficie de la pantalla. Por motivos de claridad, en esta descripción y en las reivindicaciones se describen todos los vectores o indicaciones de dirección en contra de la dirección de extensión de la luz en la dirección visual de la cámara, o sea, según el tipo de la llamada "secuencia de rayos inversa".

15 Como reflectante se denomina una superficie o una banda de metal en la que es válida la ley de la reflexión. Estas superficies pulidas poseen, respecto de la longitud de onda de la luz, pequeñas estructuras rugosas. En superficies rugosas la radiación se dispersa de manera difusa.

El dispositivo puede estar equipado con solo una única cámara, puesto que el procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento no necesita la observación de las superficies reflectantes desde varias direcciones de observación. Igualmente el dispositivo puede estar equipado con una única pantalla. Esta puede estar montada fija en el dispositivo y para la realización de la inspección no necesita ser movida.

20 En una forma constructiva preferida la muestra está aplicada fija sobre la pantalla, por ejemplo, impresa sobre la pantalla. Puede estar prevista una fuente de luz que irradie la pantalla.

En una forma constructiva alternativa, la muestra puede ser proyectada sobre la pantalla mediante un proyector, por ejemplo, un proyector con avance de diapositivas.

25 Preferentemente la pantalla es opaca. Como alternativa la pantalla puede estar formada por un display LCD iluminado por detrás o una pantalla de plasma.

En una forma constructiva preferida la muestra es, partiendo de la zona de medida, una retícula, por ejemplo una malla en cruz. La construcción de la muestra como retícula facilita la valoración de la toma de la cámara. Sin embargo, como muestra se pueden utilizar también otras muestras no del tipo retícula, por ejemplo, muestra como tablero de ajedrez, muestra codificada por colores, codificada por marcas o codificada por puntos.

30 Según una forma constructiva preferida, la muestra presenta una retícula homogénea y como mínimo una marcación diferenciada de la retícula homogénea. En el procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento es una ventaja si elementos individuales de la retícula pueden ser identificados con un índice correlativo. La previsión de una marcación diferenciada de la retícula homogénea permite de manera especialmente sencilla el fijar el punto de inicio de esos índices y también encontrarlos de nuevo en la toma de la cámara, incluso cuando la muestra es
35 reflejada de manera diferente por la superficie reflectante.

En una forma constructiva preferida solo está prevista una marcación diferente de la retícula homogénea. Esto es suficiente para en una forma constructiva preferida del procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento, llevar a cabo allí la colocación de índices propuesta.

40 En una forma constructiva preferida la muestra presenta una malla en cruz en la que los espacios intermedios entre la malla no son rectangulares sino redondos. Se demostrado que una malla en cruz de este tipo puede ser analizada especialmente bien.

45 En el procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento para la detección de defectos de superficies y/o medir la topografía de la superficie de superficies continuamente reflectantes, especialmente superficies reflectantes de bandas de metal y totalmente especialmente de bandas de metal en movimiento, una cámara hace en primer lugar, una toma de una muestra representada sobre una pantalla, que está diseñada de tal manera que representa como mínimo puntos de corte de líneas. La dirección visual de la cámara está entonces dirigida hacia una zona de la superficie reflectante. La superficie de la pantalla sobre la que está representada la muestra está

orientada hacia esa zona de manera que el paso de rayos de los rayos visuales de la cámara lleva desde la cámara a través de la superficie reflectante hasta la superficie de la pantalla. La cámara está enfocada sobre la superficie de la pantalla.

5 La toma quedará depositada como matriz A en la que cada valor a_{ij} corresponde con el valor medido que la cámara ha tomado en el lugar de pixel i_{ij} , en donde el valor máximo I del índice i corresponde a la cantidad de los lugares de pixel en una primera dirección de ensanchamiento de la superficie de toma de la cámara y el valor máximo J del índice j corresponde a la cantidad de los lugares de pixel en una segunda dirección de ensanchamiento. La matriz A depositada es transformada en una matriz B mediante una binarización en donde cada valor W_{ij} tiene o el valor 1 o valor 0.

10 La imagen binaria representada por la matriz B es enviada a un proceso de esqueletización en el que en un sistema de coordenadas cuyos ambos ejes corresponden a ambos índices de la matriz, se calculan trazados de líneas a lo largo de los cuales los valores b_{ij} son iguales y después de ello se genera una tabla de puntos de corte que a su vez reproduce la posición espacial de los puntos de corte de los trazados de línea en el sistema de coordenadas. Con ayuda de un proceso iterativo a partir de la tabla de puntos de corte se calcula entonces un trazado de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada.

15 Para ello el procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento parte de las siguientes consideraciones: Si se parte de diferentes posiciones de la superficie reflectante (figura 1), para el rayo visual s de la cámara esto significa que él mira otro punto de la pantalla en un objeto de medida que se encuentra fuera del plano cero en relación al plano cero prefijado. Aunque igualmente todos los datos geométricos (la llamada calibración exterior) y los parámetros de la cámara son conocidos, la altura local z no puede ser calculada a priori porque para 20 ello falta la dirección del rayo r reflejado. Surge la ambigüedad por que solo pueden ser identificados los puntos de encuentro s_i de los rayos visuales r_i reflejados sobre la placa pantalla. Solo cuando se hubiera desplazado la placa pantalla hacia delante o hacia detrás en una distancia definida se recibiría un segundo punto s' y con ello se podría calcular la dirección de los rayos reflejados. Sin embargo, esta ampliación no es adecuada aquí para las formas constructivas especialmente preferidas de aplicación relevante en los objetos móviles, de manera que para la 25 aplicación del procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento sobre superficies móviles se utiliza un procedimiento en el que precisamente a partir de una única toma se pueda calcular el trazado de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada.

30 El procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento se puede dividir, a grosso modo, en dos secciones superpuestas, en concreto, la preparación de la toma de la cámara para generar una tabla de puntos de corte que reproduzca en un sistema de coordenadas la posición espacial de los puntos de corte de los trazados de líneas en la toma de la cámara. En un segundo paso, a partir de las informaciones sobre la posición de estos puntos de corte con ayuda de un proceso iterativo, se calcula el trazado de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada.

35 En una forma constructiva preferida en el procesado de la imagen se prepara, por ejemplo, una imagen gris de una correspondiente cámara matriz. Como resultado, por ejemplo, los puntos de cruce de la toma que la cámara ha tomado de una malla en cruz aplicada sobre la placa pantalla, pueden existir como tabla con sus coordenadas de pixel e índices de malla. En esta forma constructiva preferida, en un segundo bloque, a partir de las coordenadas de pixel a través de un cálculo de transformación de cámara, se puede calcular la dirección de los rayos visuales. 40 Puesto que la posición de los puntos de cruce sobre la placa pantalla es conocida y es posible su colocación a partir de los índices del procesamiento de la imagen, se puede calcular una matriz de alturas a partir de estos datos geométricos. Pero también se puede pensar en otras formas de proceder.

45 En una forma constructiva preferida la superficie modelo es representada por un polinomio de Chebyshev de dos dimensiones. Se ha demostrado que una representación de superficie como esta reduce considerablemente el gasto en cálculos.

50 En un procedimiento de inspección de superficies una cámara puede hacer una toma de una muestra representada sobre una pantalla, que está diseñada de tal manera que como mínimo representa puntos de corte de líneas. La dirección visual de la cámara está dirigida a una zona de la superficie reflectante. La superficie de la pantalla, sobre la que está representada la imagen, está situada y dirigida hacia esa zona, de tal manera que el paso de rayos de los rayos visuales de la cámara lleva desde la cámara a través de la superficie reflectante hasta la superficie de la

- 5 pantalla. La cámara está enfocada sobre la superficie de la pantalla. La toma es analizada por un procedimiento de análisis y se genera una tabla de puntos de corte que reproduce en un sistema de coordenadas la posición espacial de los puntos de corte de los trazados de línea. Con ayuda de un proceso iterativo, a partir de la tabla de puntos de corte se calcula entonces el trazado de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada, en donde la superficie modelo está representada por un polinomio de Chebyshev de dos dimensiones.
- 10 Para obtener las ventajas de una representación de la superficie modelo por un polinomio de Chebyshev de dos dimensiones, en el marco del procesado de imagen no es obligatoriamente necesario utilizar el procedimiento de esqueletización anteriormente descrito. Las ventajas de este aspecto de un procedimiento de inspección de superficies pueden ser obtenidas también con otros procesos de análisis, que pueden ser generados a partir de una toma de la tabla de los puntos de corte, que pueden reproducir la posición espacial de los puntos de corte de los trazados de líneas en un sistema de coordenadas.
- 15 En la inspección automática de superficies reflectantes será posible, de acuerdo con el invento, el reconocimiento de la presencia de defectos de superficie (detección) como también la captación de la topografía de superficies o el gradiente de superficies (medir). Estos pueden ser deducidos de la superficie modelo.
- 20 En una forma constructiva preferida en un sistema de coordenadas se deposita cada punto de corte en la tabla de puntos de corte con un valor de índice que lo define y sus coordenadas x e y. Esto permite identificar a cada uno de los puntos de corte y en el marco del procedimiento iterativo ordenar cada uno de los puntos de corte en el modelo sobre la placa pantalla.
- En una forma constructiva preferida la muestra es colocada firmemente sobre la pantalla, por ejemplo, impresa sobre la pantalla. Puede estar prevista una fuente de luz que ilumine la pantalla.
- En una forma constructiva alternativa la muestra puede ser proyectada sobre la pantalla mediante un proyector, por ejemplo un proyector con un empuje de diapositivas.
- Preferentemente la pantalla es opaca. Como alternativa la pantalla puede estar formada por un display LCD iluminado por detrás o una pantalla de plasma.
- 25 En una forma constructiva preferida la muestra es una retícula homogénea, por ejemplo, una malla en cruz. La construcción de la muestra como malla simplifica la valoración de la toma de la cámara. Sin embargo, también pueden tomarse como muestra otras muestras no en forma de retícula, por ejemplo, muestra como tablero de ajedrez, muestra codificada por colores, código de puntos.
- 30 Según una forma constructiva preferida la muestra presenta una retícula homogénea y como mínimo una marcación diferente de la retícula homogénea. En el procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento es una ventaja si elementos individuales de la retícula pueden ser identificados con un índice correlativo. La previsión de una marcación diferente de la retícula homogénea permite fijar especialmente fácil el punto de inicio de esa indexación y también encontrarla de nuevo en la toma de la cámara, incluso cuando la muestra es reflejada de manera diferente por la superficie reflectante.
- 35 En una forma constructiva especialmente preferida solamente está prevista una marcación diferente de la retícula homogénea. Esto es suficiente para en una forma constructiva preferida del procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento llevar a cabo la indexación allí propuesta.
- 40 En una forma constructiva preferida la muestra presenta una malla en cruz en la que los espacios intermedios no son rectangulares sino circulares. Se ha demostrado que una malla en cruz de este tipo puede ser analizada especialmente bien.
- Según una forma constructiva preferida la binarización se realiza dinámicamente. En una imagen real de cámara no existe por lo general una iluminación regularmente repartida. Por lo tanto los niveles umbral entre el paso de blanco a negro no están regularmente repartidos. La binarización dinámica se realiza preferentemente orientada por regiones. Los píxeles pueden ser activados en la relación 1:1 (blanco; negro).

El procedimiento de inspección de superficies acorde con el invento encuentra especial aplicación en instalaciones para mejorar las bandas de metal, pero por ejemplo, pueden ser utilizados también en la inspección de acero inoxidable, aluminio, cobre, planchas de cristal y superficies reflectantes y lacadas.

5 A continuación se describe el invento con más detalle sobre la base de un dibujo que solo representa ejemplos constructivos. Allí se muestra:

- Fig. 1 la representación de la zona vista por la cámara de la pantalla que se refleja en el objeto de medida dependiendo del gradiente y la altura del objeto de medida;
- Fig. 2 una parte del dispositivo en una representación esquemática en perspectiva;
- Fig. 3 una muestra;
- 10 Fig. 4 la retícula para la placa pantalla;
- Fig. 5 la toma de la cámara para el llamado plano cero;
- Fig. 6 la toma de la cámara para una chapa de ensayo;
- Fig. 7 el programa de operaciones de un tratamiento de imagen de dos dimensiones;
- Fig. 8 la imagen de cámara de la chapa de ensayo según la figura 9, transformada en el plano del objeto
- 15 Fig. 9(a, b) un extracto de la imagen según la figura 8 (fig. 9a) transformada en el plano del objeto y la misma imagen después de la binarización (9b);
- Fig. 10 la representación de la figura 8 después de una binarización y esqueletización;
- Fig. 11a, b la representación de la figura 10 después de una extracción en las líneas horizontales (fig. 11a) y líneas verticales (fig. 11b);
- 20 Fig. 12 los pasos de simulación para un lugar de medida;
- Fig. 13 el cálculo numérico de los parámetros del modelo;
- Fig. 14 la geometría del procedimiento de reflexión de la retícula
- Fig. 15 la adaptación del modelo en el procedimiento de reflexión de retícula.

25 En la configuración representada en la figura 2, la zona de medida está vertical. La cámara y la placa pantalla están soportadas por una construcción de aluminio. La cámara mira bajo un ángulo plano sobre la zona de medida. La placa pantalla fue situada lo más próxima posible sobre la zona de medida por dos motivos:

1. Para mantener lo más pequeña posible la dimensión de la placa pantalla. En el caso concreto se trata de una zona de medida de 1,5 m x 1,3 m y aquí se trabajará de manera ideal con una placa pantalla de 2,8 m x 1,5 m.
- 30 2. Para mantener la sensibilidad lo más pequeña posible, también mantener la zona de medida lo más grande posible.

35 Una posible muestra del dispositivo acorde con el invento está representada en la figura 3. Se trata de una malla en cruz en forma de imagen binaria con una separación de malla (distancia de enmallado) de 50 mm x 50 mm. La zona de medida es por ejemplo de 1,6 m X 1,6 m. La imagen que se va a imprimir sobre la placa pantalla es calculada con una transformación de pantalla.

Para utilizar completamente la pantalla la malla en cruz del plano objeto fue ensanchada hasta 3,2 m x 3,2 m. Se insertó una marcación. Esta sirve para subir el contador de índice durante la rutina de detección.

En la figura 4, sobre la placa pantalla está representada la retícula que hay que imprimir.

La figura 5 muestra la toma de la cámara cuando la superficie reflectante está totalmente plana en el plano cero y sin cualquier tipo de defecto superficial.

La figura 6 muestra la toma de la cámara en el caso de una chapa ondulada.

5 La figura 7 muestra el programa de operaciones de un tratamiento de imagen de dos dimensiones. Para simplificar algunas funciones la imagen es transformada, en primer lugar, en el plano objeto. A continuación se produce una binarización con umbral dinámico. Todas las estructuras en esta imagen son adelgazadas ahora al tamaño de un pixel: esquelitización. Condicionado por las grandes distorsiones locales de la malla en cruz es muy costoso detectar directamente los puntos de cruce. Por eso, preferiblemente, en un primer paso se separan las líneas horizontales y verticales. Las líneas individuales son enviadas ahora a una interpolación por splines B. Así a 10 continuación se pueden calcular los puntos de corte de todas las líneas horizontales con todas las líneas verticales. Sobre la marcación cero se indexaran correctamente las coordenadas de los puntos de corte. Estas coordenadas están todavía en el plano objeto, por eso ahora sigue la transformación inversa en el plano imagen de la cámara. Se elaboran dos matrices para x e y con las coordenadas de los puntos de corte.

En detalle, se llevan a cabo las siguientes operaciones:

15 Mediante los parámetros de transformación de los lugares de medida reales la imagen de cámara se convierte en el plano objeto (figura 8). Ahora se dispone de una zona rectangular lo que simplifica considerablemente los siguientes pasos del procesamiento de la imagen. Los parámetros de transformación son tomados de la calibración interna y externa de la cámara. La calibración interna comprende: parámetros de distorsión del objetivo de la cámara, datos de chip, distancia focal.

20 La calibración externa comprende la matriz de rotación y el vector de traslación para poder convertir entre los sistemas de coordenadas de cámara y zona de medida.

A partir de la imagen gris, la cual por lo general contiene una profundidad de 8 a 12 bits, se genera una imagen binaria. Ahora hay dos valores: 0 = ninguna malla y 1 = malla. El umbral trabaja dinámicamente, puesto que en el caso de una imagen real de cámara no se dispone de una iluminación uniforme.

25 La figura 9a muestra un extracto de la imagen acorde con la figura 8 convertida en el plano del objeto.

La figura 9b muestra el extracto binarizado.

30 Existen una serie de procedimientos de esquelitización. Para un caso concreto de aplicación hay que ponderar las ventajas y las desventajas de los correspondientes algoritmos. Algunos procedimientos llevan a interrupciones en el esqueleto (por ejemplo, transformación de eje central). Entonces aquí a menudo se conectan a continuación rutinas de preparación para rellenar esos huecos. Otros algoritmos de esquelitización no dejan quietos los extremos de líneas, sino que los acortan en un pixel con cada paso. Procedimientos que nuevamente evitan esto, se inclinan por dejar quietas las llamadas barbas. En este caso se conectan a continuación rutinas de desbarbado, que nuevamente no pueden distinguir entre extremo de línea y barba. Para este caso concreto de aplicación de la esquelitización de una malla en cruz se modificaron los algoritmos disponibles de tal manera que ahora se pueden cumplir 35 debidamente las siguientes tres exigencias:

- No permitir interrupciones
- No acortar los extremos de línea
- No dejar ninguna barba.

40 En las relaciones de vecindad N8 los puntos de imagen se agrupan en las siguientes clases: "punto aislado", "comienzo de línea", "elemento de línea", "nudos", "punto interior", y "punto no esencial". Requisito para esta división es que después de la binarización solo existen líneas cerradas (H: Kazmierczak, detección y procesamiento mecanizado de datos de imagen, Akademie - Verlag Berlín, 1980).

45 Se consigue una simplificación mediante la forma de la malla en cruz. En la zona de las mayores curvas están previstas estructuras cóncavas. Por lo tanto no se trata de cuadrados negros sino de círculos negros sobre fondo blanco.

La figura 10 muestra el resultado de la esquelización, en donde la imagen, por motivos de la técnica de impresión esta mostrada negada.

5 Una esquelización puede ser relativamente costosa en tiempo de ordenador. La imagen binaria es limitada sucesivamente de negro a blanco (la llamada apertura). En cada paso de la mecanización, para cada pixel hay que comprobar las relaciones de vecindad con otros pixeles.

10 En la zona de los puntos de cruce de la imagen esqueleto se producen distorsiones. Los cruces son separados por deformación uno de otro en dos horquillas. Para poder determinar correctamente la posición de los cruces se recomienda tener en cuenta todos los pixeles ocupados en la imagen esqueleto. Aquí es ventajosa una interpolación spline B de las líneas horizontales y verticales. Igualmente podría utilizarse una filtración de paso bajo. Para poder llevar a cabo este paso se llevara a cabo una separación de las líneas verticales y horizontales.

15 La figura 11a muestra la parte de malla de las horizontales de la imagen esqueleto y la figura 11b la parte de malla de las verticales. Si en la figura 10 se sigue por ejemplo una línea horizontal, se comprueba que por zonas discurre más vertical que horizontal y que en esas zonas se produce un solape con las líneas verticales. Según esto se producen dos horquillas cuando se deforma un cruce. La unión de ambas horquillas contiene por igual medida una línea vertical y una línea horizontal. Este conocimiento de la estructura de la malla en cruz deformada se tiene en cuenta en el algoritmo para la separación de líneas verticales y horizontales.

20 La marcación prevista en la muestra reproducida en la placa pantalla lleva en la toma después del procesamiento de la imagen, a dos interrupciones superpuestas en la imagen esqueleto de la parte de malla de horizontales y a dos interrupciones adyacentes en la imagen esqueleto de la parte de malla de verticales. Las cuatro interrupciones están todas muy cerca una de otra, de manera que quías se pueden excluir que detecciones fallidas debidas a perturbaciones locales. Está asegurada una clara indexación de todas las líneas.

25 Se leen los puntos de corte de las líneas horizontales y verticales y se les coloca un índice mediante un contador de malla. Partiendo de las cuatro interrupciones anteriormente descritas se cuentan todos los puntos de corte en dirección horizontal y en dirección vertical. Para ello, partiendo de los estados de contador $ie/2$ y $je/2$ los contadores i y j incrementan en dirección del borde de imagen derecho e inferior y restan en dirección del borde de imagen izquierdo y superior.

30 Si se integran los pixeles de los alrededores es posible una determinación subpixel exacta. En el caso más sencillo, para las coordenadas del punto de corte se pueden adoptar exactamente las coordenadas del pixel el cual es parte componente de la línea vertical y horizontal, es decir, punto central del cruce. Más exacta será la determinación de coordenadas cuando otros pixeles, a la derecha y a la izquierda, arriba y abajo son integrados en la determinación de coordenadas en forma de un cálculo del centro de gravedad.

En un último paso, se transforman las coordenadas de los puntos de corte hacia atrás a la perspectiva de la cámara y se entregan al cálculo geométrico.

35 Los rayos visuales de la cámara son asociados mediante el procesamiento 2D de imagen con las coordenadas de los puntos de corte del rayo reflejado con la placa pantalla. Con esto todavía no se puede calcular ninguna altura local para un rayo visual individual. Como ya se ha descrito en conexión con la figura 1, para una configuración dada no se puede calcular todavía ninguna altura local a partir de un rayo visual individual de la cámara el cual mediante el procesamiento 2D de imagen es asociado con las coordenadas de los puntos de corte del rayo reflejado con la placa pantalla.

40 De acuerdo con el invento se aplicara un procedimiento iterativo. En el ejemplo constructivo aquí descrito se considerara todo un haz de rayos visuales y se supone que del objeto de medida no existe ni brota nada. Con resolución suficiente vale entonces que los gradientes locales están acoplados con las alturas locales en el lugar del punto de encuentro de los rayos visuales con el objeto de medida. Preferentemente con el procedimiento iterativo se calcula el discurrir de una superficie modelo, por ejemplo en forma de un modelo matemático. En el ejemplo constructivo aquí descrito la superficie modelo será descrita mediante una matriz de coeficientes. Los coeficientes de la superficie modelo se calculan mediante las coordenadas de los puntos de corte de los rayos visuales reflejados con la placa pantalla. Para ello se dispone de una matriz de coeficientes para la superficie modelo y con ella se calculan los puntos de corte de los rayos reflejados con la placa pantalla. Partiendo de esa matriz de coeficientes

inicial se calculan los puntos de corte de los rayos reflejados con la placa pantalla. A continuación se comparan las coordenadas calculadas con las coordenadas de malla de la pantalla conocidas. Los coeficientes de la superficie modelo se ajustan entonces de manera que la diferencia entre coordenadas calculadas y conocidas se reduzca todo lo posible. El cálculo y la comparación son repetidos tantas veces hasta que se sobrepasa por debajo un límite predeterminado para la diferencia entre medidas calculadas. Como método para resolver este, por lo demás no lineal, problema, es adecuado el procedimiento Levenberg - Marquardt. Para el cálculo de las coordenadas de los puntos de corte de los rayos visuales reflejados con la placa pantalla es necesaria la simulación en el ordenador de la geometría de los lugares de medida. Se tienen en cuenta todos los datos de calibración.

La figura 12 muestra el curso del lugar de medida simulado. A partir de las coordenadas de pixel de los puntos de cruce detectados de la malla y de los parámetros de la transformación de cámara se calculan los vectores de los rayos visuales. Se continúa con el cálculo de los puntos de corte del rayo visual y de la superficie modelo. En estos lugares se calculan ahora los vectores normales a la superficie modelo. De los vectores unitarios de los rayos visuales y de las normales a la superficie se obtiene, con la ley de la reflexión, el vector de reflexión. Por último se calcula el punto de corte del vector de reflexión y la pantalla.

La figura 13 muestra el programa de flujo de señal superior. Claramente se puede reconocer la estructura del círculo de regulación. Como valor teórico se consideran aquí las coordenadas de objeto constantes de los puntos de cruce de malla. El lugar de medida representa el tramo de regulación y es simulado de acuerdo con la figura 12. La desviación de regulación representa la diferencia entre las coordenadas de objeto de los puntos de cruce de malla de la pantalla y las coordenadas del lugar de medida calculadas en modelo. La optimización no lineal funciona como regulador y como magnitud de regulación suministra los parámetros de modelo de la superficie. Las coordenadas de pixel de los puntos de cruce de malla de la imagen de cámara pueden ser captadas como magnitudes de regulación. Si la desviación de regulación es cero, entonces coinciden la superficie modelo y la superficie real.

En la figura 13 existen márgenes para la disposición. La estructura aquí elegida resulta en primera línea a partir de la malla de cruce. Los puntos de cruce son simultáneamente los lugares de apoyo para el cálculo de los parámetros de modelo. En la figura 13, las señales son vectores y matrices de dimensiones considerables.

Para poder medir con suficiente exactitud una chapa ondulada por el borde o por el centro con arcos longitudinales o transversales, así como todas las formas mixtas, se prevén matrices de parámetros de dimensiones 12 x 12 hasta 20 x 20.

Si se mide una chapa de 1,5 m de ancho y 1,5 m de largo con una separación de los puntos de apoyo de 50 mm, entonces participan aproximadamente 900 puntos de malla los cuales suministran cada uno dos componentes, como vector de igualdad. Se trata con esto de un sistema de igualdades superior no lineal con aproximadamente 1800 igualdades y 144 hasta 400 incógnitas, que hay que resolver. Para ello hay que realizar el circuito de regulación de la figura 13 entre 500 y 5000 veces. Esto significa que, correspondientemente, a menudo también hay que calcular los lugares de medida.

En principio, parece igualmente posible el cálculo numérico de los puntos de corte de los rayos visuales de la cámara con la superficie modelo. Sin embargo esto depende de la elección del sistema de coordenadas. Es más elegante describir primeramente la superficie en un sistema de coordenadas de la cámara y después de la optimización transformarla en el espacio objeto. La superficie fue descrita antes primeramente con la altura como función de la anchura y la longitud, ahora es expresada con la longitud del rayo visual en función de las coordenadas normalizadas del chip de cámara. Con esto sobra el cálculo numérico del punto de corte. Si se describe la superficie polinomio 2D en el sistema de coordenadas del espacio objeto, entonces no es posible calcular analíticamente el punto de encuentro (matemáticamente el punto de corte) de un rayo visual (matemáticamente recta) de la cámara. Sin embargo si la superficie está descrita en sistemas de coordenadas de cámara entonces los puntos de corte están disponibles inmediatamente como valor de función. Solo al final de la optimización no lineal se obtiene la transformación de la superficie polinomio 2D del sistema de coordenadas de cámara en el sistema de coordenadas de objeto.

El costoso cálculo de la matriz de alturas mediante una optimización no lineal requiere considerables tiempos de ordenador. Para un polinomio de Chebyshev bidimensional de grado 18 y aproximadamente 2000 ecuaciones de componentes se necesitarán de 10 a 20 minutos en un PC de 3GHz. Mediante una estructura solapada la cual regula el transcurso de la optimización y en su caso se ocupa de valores de inicio adecuados, se puede conseguir

que cada minuto se obtenga un resultado. Además son posibles diversas mejoras de la técnica de programación en las rutinas para el cálculo del modelo. La conversión en un aparato de medida de trabajo llevará a otra reducción en los tiempos de ordenador, por que entonces se podrá llevar a cabo un intercambio de muchas rutinas con bibliotecas próximas al ordenador así como un reparto en varios ordenadores. Una posibilidad de una calibración exterior de los lugares de medida consiste en medir la disposición espacial de los componentes del sistema por medio de fotogrametría.

Para el segundo paso, en concreto el cálculo del discurso de una superficie modelo a partir de las informaciones sobre los puntos de corte con ayuda de un procedimiento iterativo, se pueden emplear las siguientes consideraciones de base:

Se toma la notación de la figura 14, así la ley de la reflexión se puede redactar como sigue en notación vectorial:

$$r = s - 2nn^T s. \quad (1)$$

Puesto que para el triángulo OSL vale

$$l = \rho r + \sigma s. \quad (2)$$

Se obtiene en total

$$l - \rho(s - 2nn^T s) - \sigma s = 0. \quad (3)$$

Mediante una correspondiente calibración de la disposición de la cámara y la pantalla se puede conseguir que el vector s de la dirección visual sea conocido y que cada punto de la pantalla, que es encontrado por el rayo visual reflejado, pueda ser identificado fácilmente y que el correspondiente vector l de lugar sea conocido. Ciertamente, la igualdad vectorial (3) contiene igualdades de componentes, de manera que para resolver según las incógnitas ρ , σ y el vector normal n (en total son cuatro incógnitas) disponemos de un sistema de igualdades indeterminado.

Sin embargo, si para la superficie se exigen ciertas propiedades de planitud, entonces este sistema de igualdades puede ser resuelto claramente. Para ello se considera la totalidad de los rayos visuales s_{ij} , cada uno de los cuales corresponde con un pixel de la cámara con el índice ij . Se obtiene entonces el siguiente sistema de igualdades:

$$l_{ij} - \rho_{ij}(s_{ij} - 2n_{ij}n_{ij}^T s_{ij}) - \sigma_{ij}s_{ij} = 0 \quad \forall i, j, \\ i \in \{0, \dots, I\}, \quad j \in \{0, \dots, J\}. \quad (4)$$

La indeterminación de la igualdad vectorial (3) proviene de la consideración aislada de un único punto de superficie. Si por el contrario se considera la superficie global entonces cada una de las igualdades (4) está acoplada suficientemente fuerte unas con otras si hay una suficiente planitud de la superficie y su gradiente, de manera que el sistema de igualdades (4) es claramente resoluble.

Esto puede pasar por ejemplo, mediante la adaptación de un modelo de Bézier paramétrico infinito a menudo continuamente diferenciable, a los datos reales observados. Implícitamente con ello se encuentran correspondientes suposiciones de planitud para la superficie.

Como se ha descrito anteriormente en detalle, en este procedimiento la superficie modelo será adaptada y desplazada tanto tiempo hasta que se forme y sitúe una superficie modelo de tal manera que los rayos de observación simulados y reflejados en la superficie modelo se encuentren sobre los mismos pixeles LCD que fueron realmente observados para la superficie que hay que medir (figura 15).

Para la adaptación iterativa del modelo a la superficie se puede proceder como sigue: Inicialmente se comienza con un modelo de un orden inferior y se utiliza solamente una cantidad parcial de los rayos visuales. Para estos se lleva a cabo un seguimiento de rayo inverso. Cada rayo es reflejado en la superficie modelo por simulación y se calcula el punto de corte \hat{l}_{ij} resultante con el plano pantalla.

- 5 A continuación se minimiza la función de defectos $\epsilon_{ij} = \|l_{ij} - \hat{l}_{ij}\|$ y con ello se adaptan los parámetros del modelo al l_{ij} real observado. A continuación se lleva a cabo de nuevo un seguimiento de rayo inverso hasta que los ϵ_{ij} se estancan.

Después de esto se ofrece el aumentar el orden del modelo y el número de los rayos visuales considerados y se repite el proceso realizado para el modelo parcial tantas veces hasta que los ϵ_{ij} son suficientemente pequeños.

- 10 Como superficie modelo $\hat{\sigma}_{uv}$ puede utilizarse una superficie de Bézier producto tensor

$$\hat{\sigma}_{uv} = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m b_{k,l}^{m,n} B_k^n\left(\frac{u}{I}\right) B_l^m\left(\frac{v}{J}\right),$$

$$(u, v) \in [0, I] \times [0, J] \subset \mathbb{R}^2, \quad (5)$$

$$B_k^n(\alpha) = \binom{n}{k} \alpha^k (1 - \alpha)^{n-k}, \quad (6)$$

- 15 En ella, los b_{kl} son los parámetros del modelo y los B_k^n son los polinomios de Bernstein de grado n. La ventaja de este polinomio consiste en que en el caso de un aumento de grado, los nuevos coeficientes pueden ser calculados analíticamente a partir de los antiguos:

$$b_{k,l}^{m+1,n+1} = \frac{l}{n+1} b_{k,l-1}^{m+1,n} + \left(1 - \frac{l}{n+1}\right) b_{k,l}^{m+1,n},$$

$$b_{k,l}^{m+1,n} = \frac{k}{m+1} b_{k-1,l}^{m,n} + \left(1 - \frac{k}{m+1}\right) b_{k,l}^{m,n}. \quad (7)$$

Para la determinación del \hat{l}_{ij} en la ecuación (5) se inserta el modelo según la ecuación (4):

$$\hat{l}_{ij} = \hat{p}_{ij} (s_{ij} - 2\hat{n}_{ij}\hat{n}_{ij}^T s_{ij}) + \hat{\sigma}_{ij} s_{ij} \quad (8)$$

En efecto, \hat{p}_{ij} es todavía desconocida. Puesto que, sin embargo, las \hat{l}_{ij} deben estar sobre el plano pantalla ($z' = 0$) se puede llegar a una solución clara. Durante la calibración, para el haz de rayos visuales se puede utilizar un inicio paramétrico con el que se pueden interpolar los vectores de la dirección visual s_{uv} incluso para índices no enteros u, v . Esto permite un cálculo analítico de los vectores normales de la superficie modelo:

$$\hat{n}_{ij} \propto \frac{\partial(\hat{\sigma}_{uv} s_{uv})}{\partial u} \times \frac{\partial(\hat{\sigma}_{uv} s_{uv})}{\partial v} \Bigg|_{\substack{u=i \\ v=j}} \quad (9)$$

Quando los ϵ_{ij} han llegado a ser suficientemente pequeños se obtiene el coeficiente b_{kl}^* para un modelo del orden $m^* + n^*$ que se aproxima de forma continua a la superficie verdadera en forma de la función vectorial $(u,v) \rightarrow (x,y,z)$:

$$\sigma_{uv}^* s_{uv} = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))^T \quad (10)$$

10

15

20

25

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de inspección de superficies para la detección de defectos de la superficie y/o medir la topografía de la superficie de superficies continuamente reflectantes, especialmente superficies reflectantes de bandas de metal, especialmente bandas de metal en movimiento, en el que
 - 5 - una cámara hace una toma de una muestra representada sobre una pantalla, que está diseñada de tal manera que representa como mínimo puntos de corte de líneas, en donde
 - la dirección visual de la cámara está dirigida hacia una zona de la superficie reflectante y
 - la superficie de la pantalla sobre la que está representada la muestra está situada y orientada hacia esa zona de tal manera que el paso de rayos de los rayos visuales de la cámara lleva desde la cámara a través de la superficie reflectante hasta la superficie de la pantalla y
 - 10 - la cámara está enfocada sobre la superficie de la pantalla,
 - en donde la toma quedará depositada como matriz A en la que cada valor a_{ij} corresponde con el valor medido que la cámara ha tomado en el lugar de pixel i_{ij} , en donde el valor máximo I del índice i corresponde al número de lugares de pixel en una primera dirección de ensanchamiento de la superficie de toma de la cámara y el valor máximo J del índice j corresponde al número de lugares de pixel en una segunda dirección de ensanchamiento.
 - 15 - la matriz A es transformada en una matriz B mediante una binarización en donde cada valor b_{ij} tiene o el valor 1 o valor 0.
 - La imagen binaria representada por la matriz B es enviada a un proceso de esqueletización en el que en un sistema de coordenadas cuyos ambos ejes corresponden a ambos índices de la matriz, se calculan trazados de líneas a lo largo de los cuales los valores b_{ij} son iguales y después de ello se genera una tabla de puntos de corte que reproduce la posición espacial de los puntos de corte de los trazados de línea en el sistema de coordenadas.
 - 20 - con ayuda de un procedimiento iterativo a partir de la tabla de puntos de corte generada a partir de una toma se calcula entonces un trazado de una superficie modelo para la superficie reflectante considerada.
2. Procedimiento de inspección de superficies según la reivindicación 1, caracterizado por que la superficie modelo está representada por un polinomio de Chebyshev bidimensional.
3. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que cada punto de corte en la tabla de puntos de corte n un sistema de coordenadas con un índice que lo define y sus coordenadas x- e y-.
 - 30 4. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que la muestra está aplicada fija sobre la pantalla.
 5. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que la muestra es proyectada sobre la pantalla mediante un proyector.
 - 35 6. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que la muestra presenta una retícula homogénea y como mínimo una marcación que se diferencia respecto de la retícula homogénea.
 7. Procedimiento de inspección de superficies según la reivindicación 6, caracterizado por que la muestra presenta una retícula homogénea y una única marcación que se diferencia respecto de la retícula homogénea.
 - 40

8. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que la muestra presenta una malla en cruz en la que los espacios intermedios de malla no están contruidos rectangulares sino redondos.
 9. Procedimiento de inspección de superficies según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que la binarización se lleva a cabo dinámicamente.
- 5

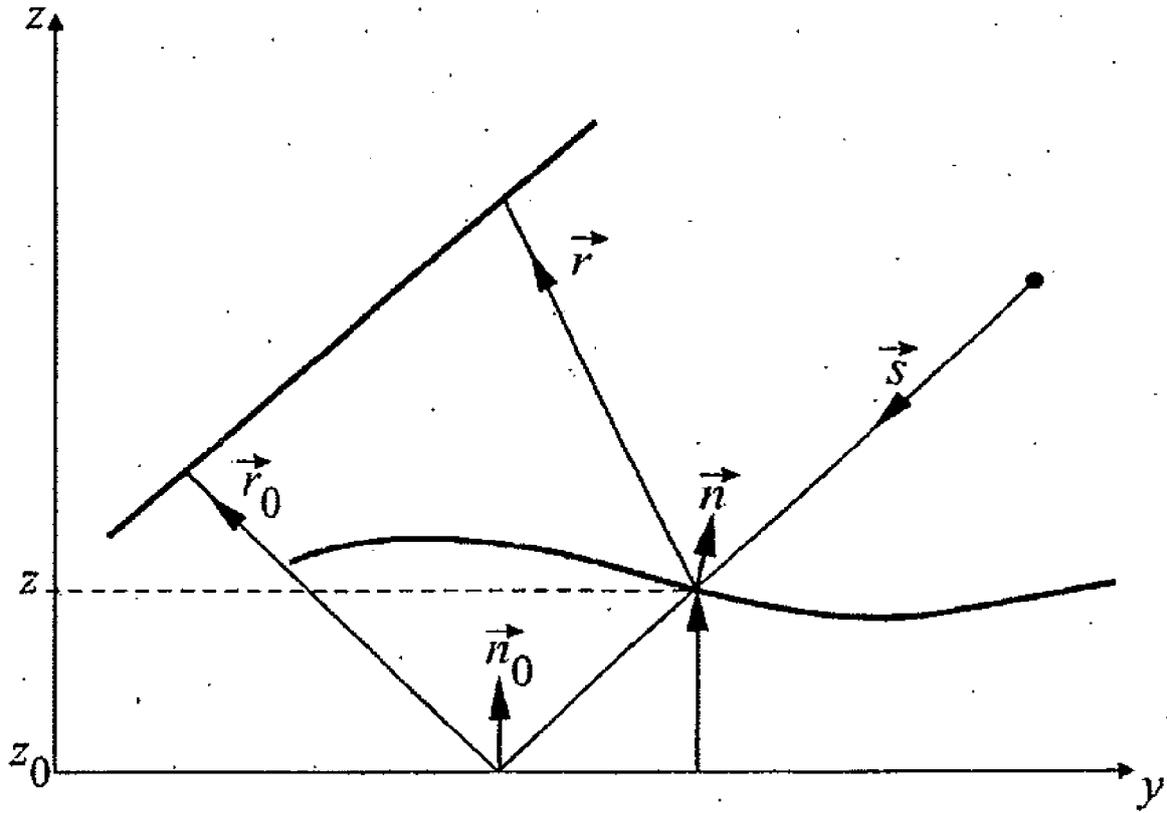


Fig. 1

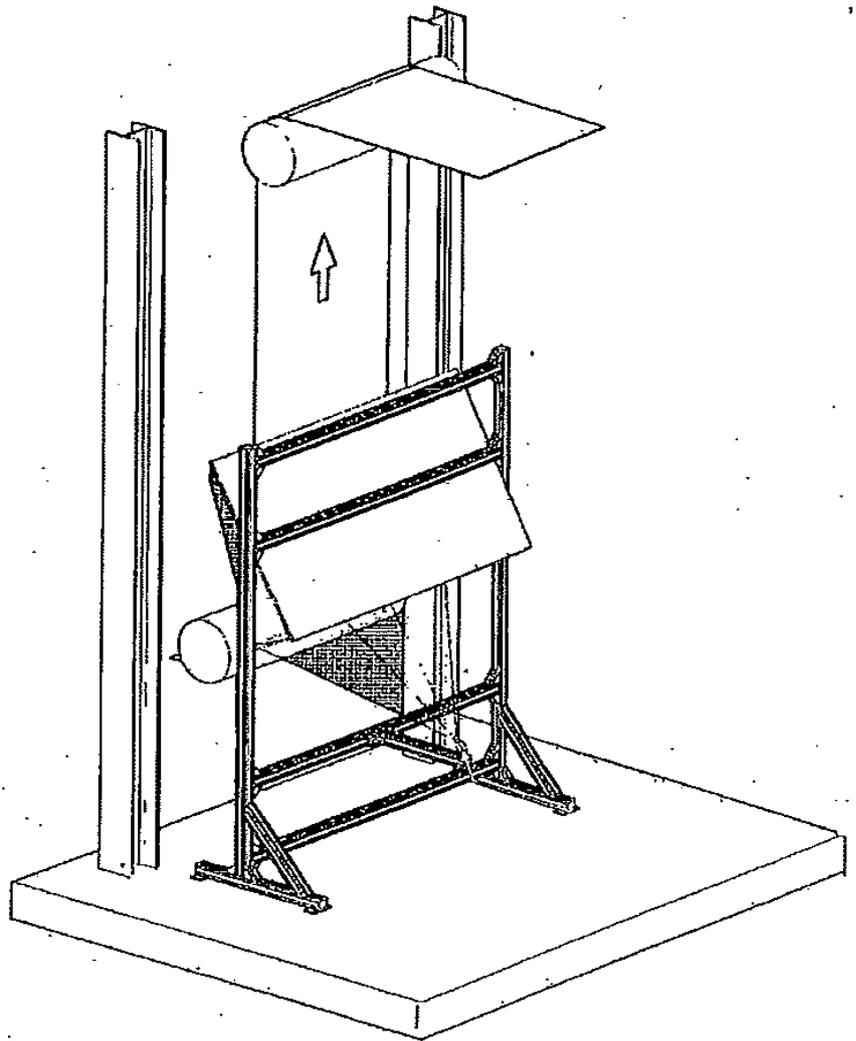


Fig. 2

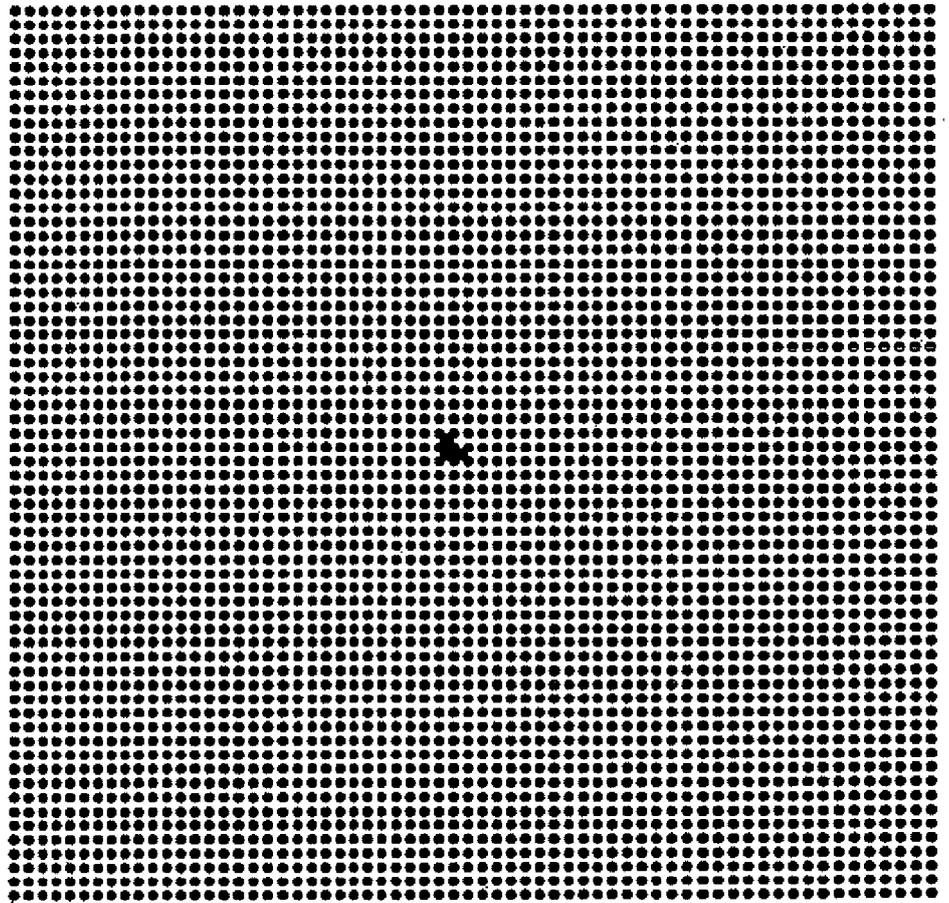


Fig. 3

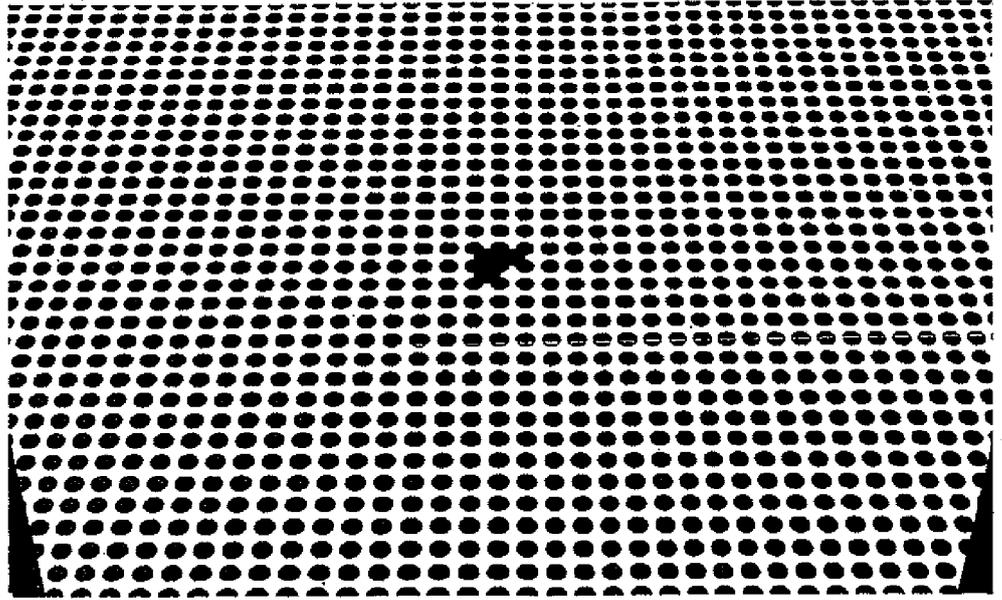


Fig. 4

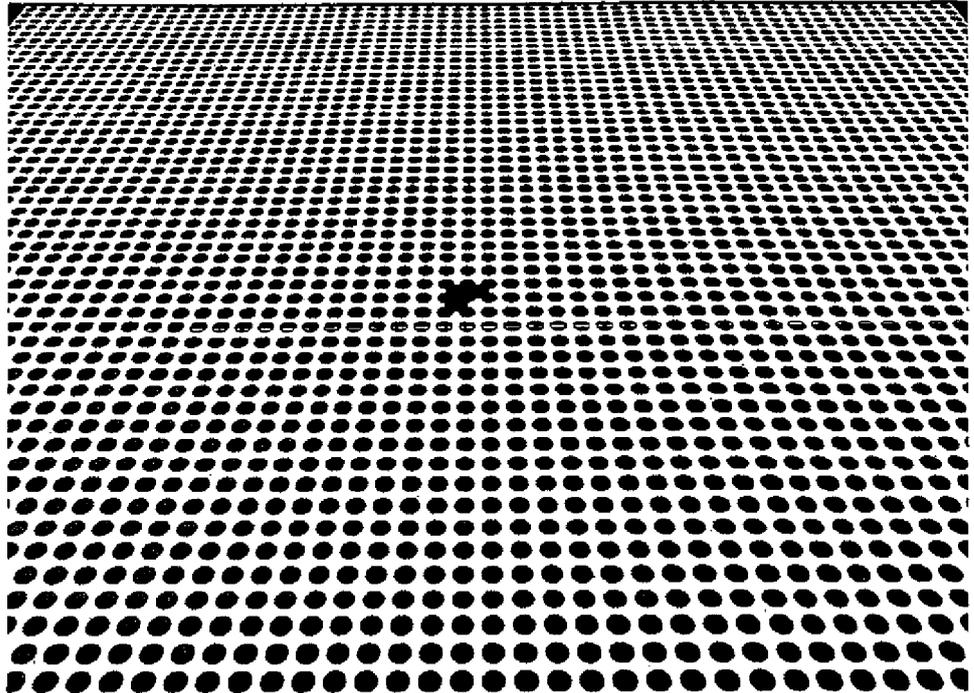


Fig. 5

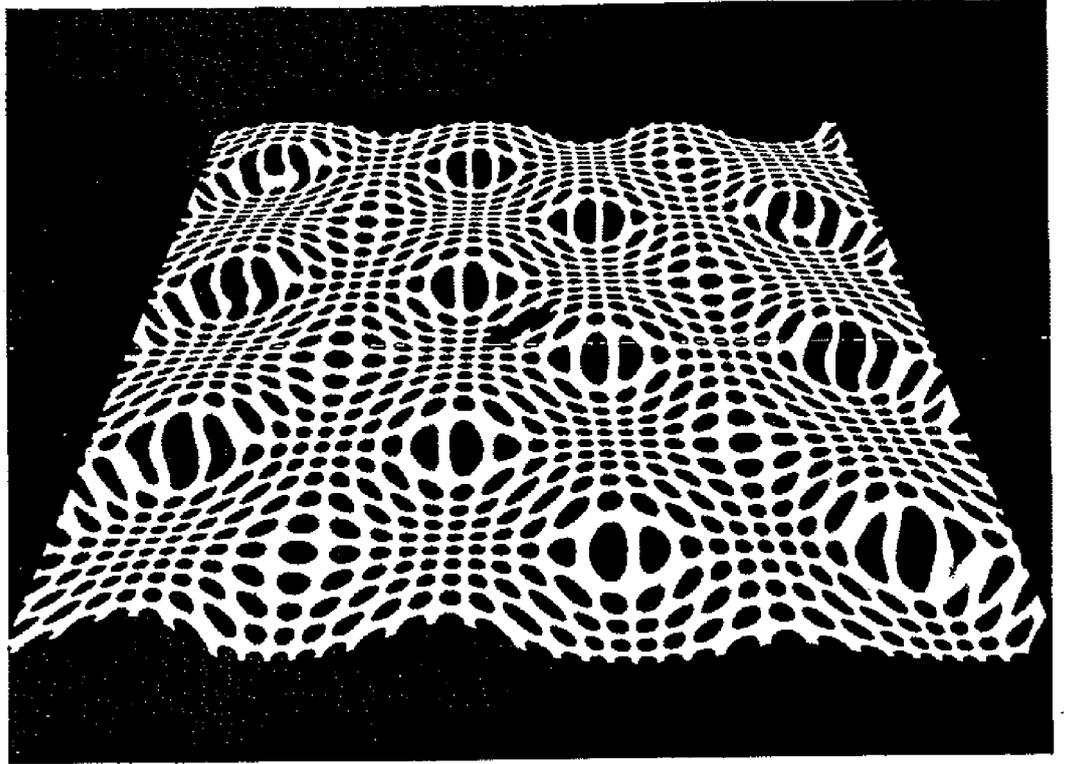


Fig. 6

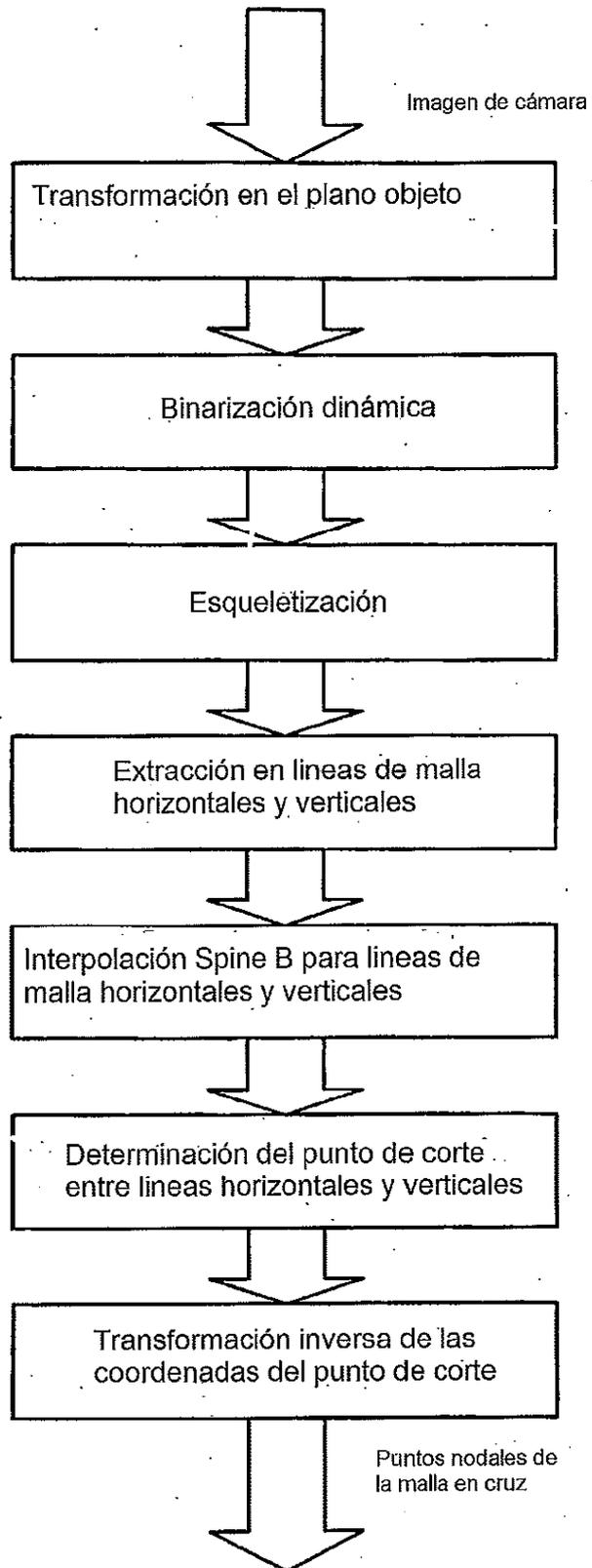


Fig. 7

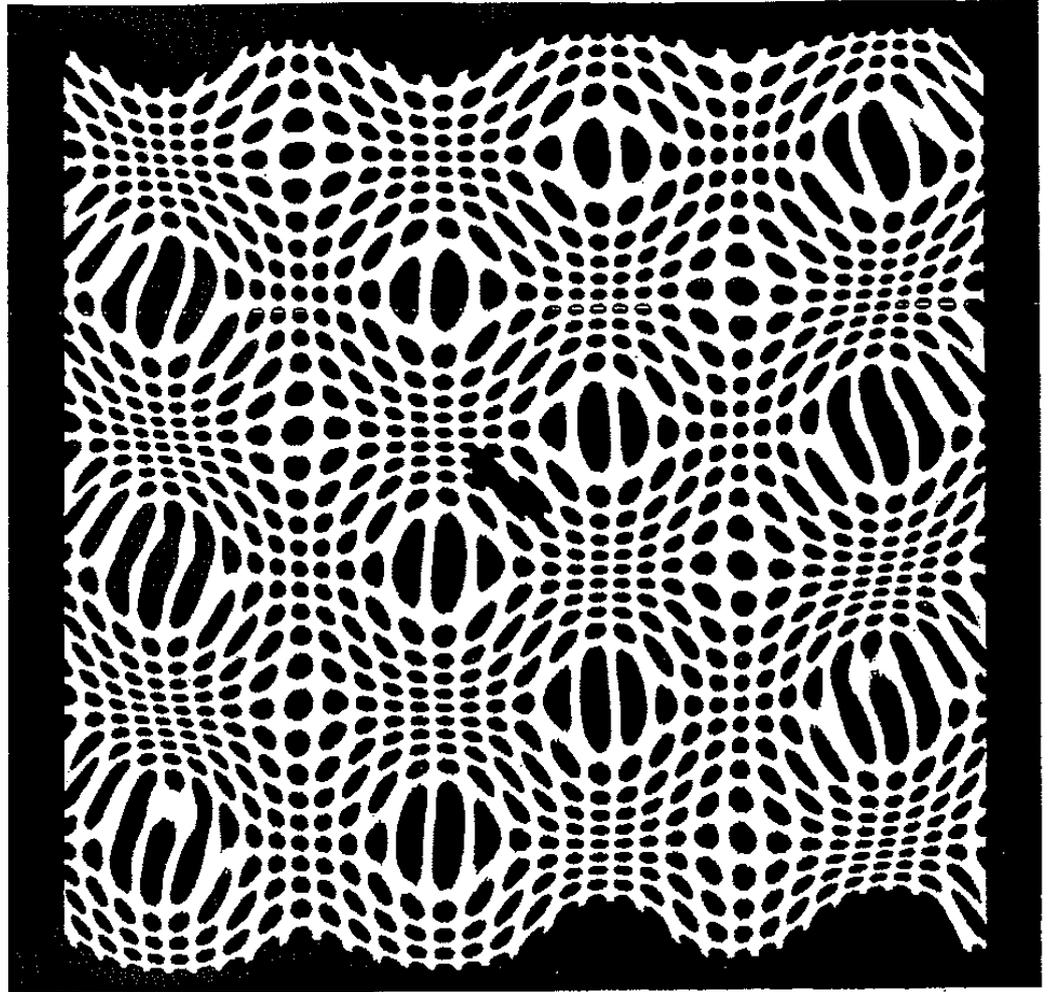


Fig. 8

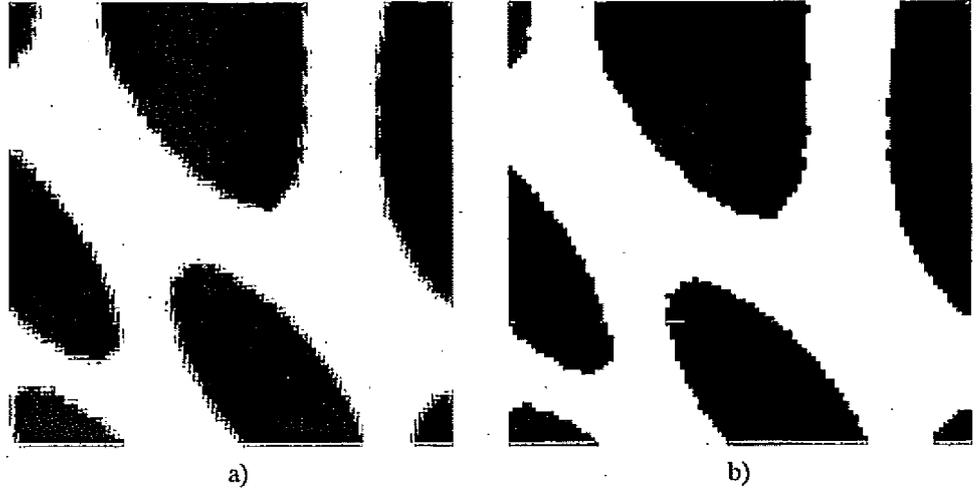


Fig. 9

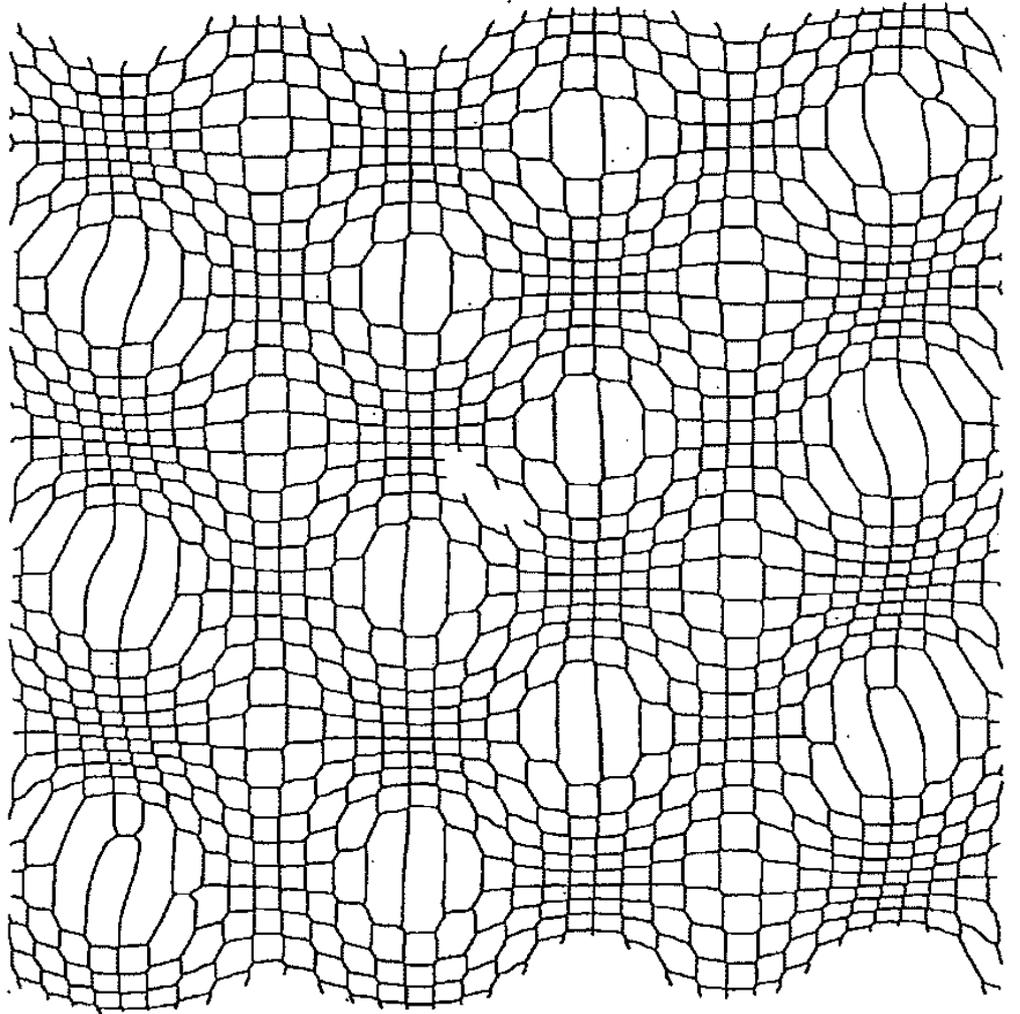


Fig. 10

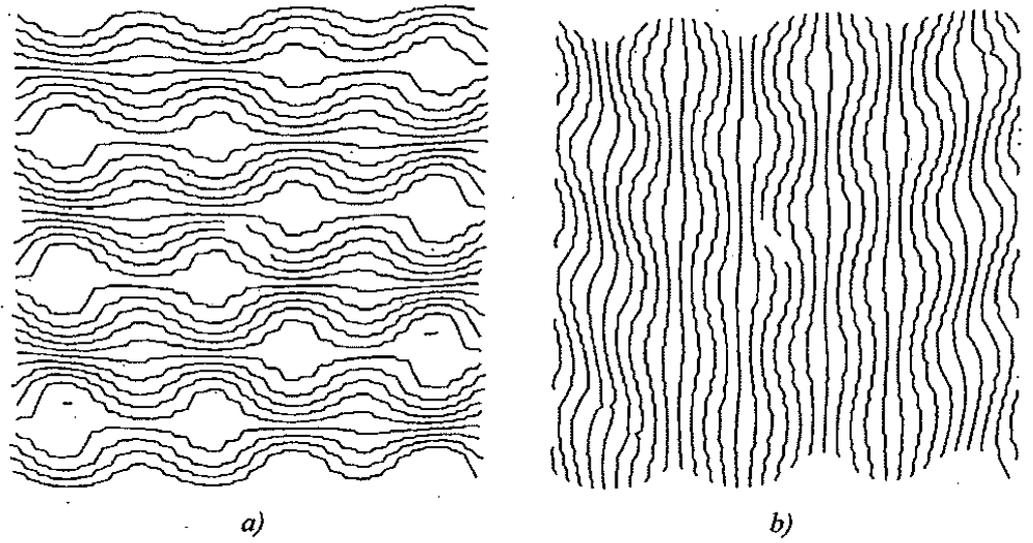


Fig. 11

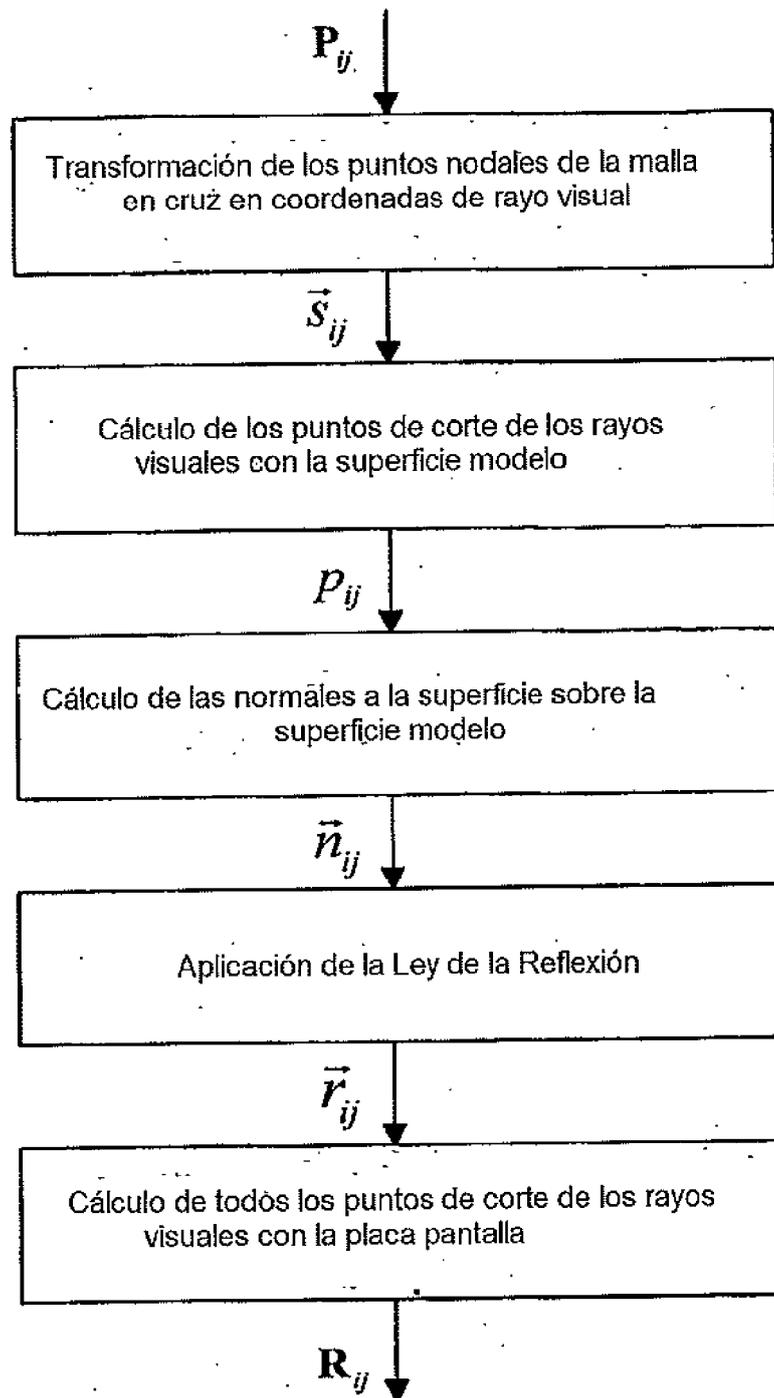


Fig. 12

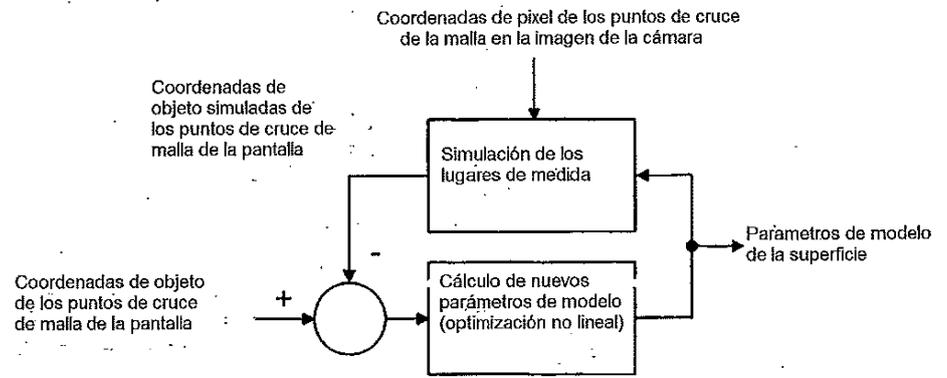


Fig.13

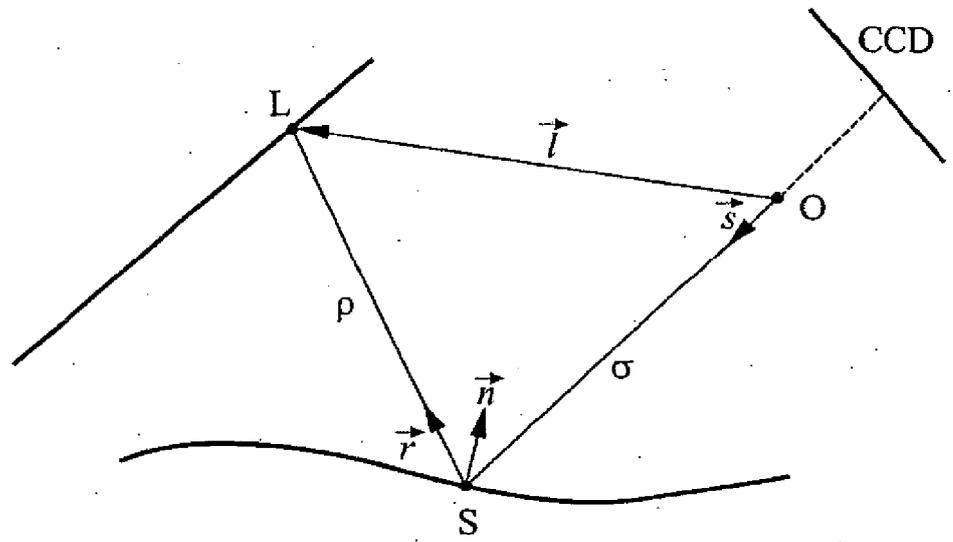


Fig. 14

