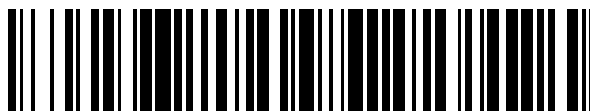


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 865**

51 Int. Cl.:

G02B 5/04 (2006.01)
G02B 5/18 (2006.01)
G03B 17/54 (2006.01)
H04N 9/31 (2006.01)
H04N 13/02 (2006.01)
G02B 27/10 (2006.01)
G01B 11/25 (2006.01)
G02B 27/22 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.12.2015** **E 15200256 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.11.2017** **EP 3034992**

54 Título: **Proyector de luz estructurada y escáner tridimensional que incluye tal proyector**

30 Prioridad:

16.12.2014 FR 1462551

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

19.03.2018

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**MICHEL, RÉMI y
PARTOUCHE-SEBBAN, DAVID**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

Observaciones :

**Véase nota informativa (Remarks, Remarques
o Bemerkungen) en el folleto original publicado
por la Oficina Europea de Patentes**

ES 2 659 865 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

Proyector de luz estructurada y escáner tridimensional que incluye tal proyector

La presente solicitud se refiere a un proyector de luz estructurada, particularmente a un proyector de luz estructurada para un escáner tridimensional, así como a un escáner tridimensional que incluye tal proyector.

5 Los escáneres tridimensionales son aparatos que permiten medir las coordenadas geométricas (x, y, z) de cada punto de la superficie de una escena o de un objeto. El resultado de la medición se considera a menudo como un mapa llamado «de profundidad» de la escena cuya imagen se ha formado ya que la profundidad (o distancia) z es generalmente expresada en función de la posición (x, y) en un sistema de coordenadas cartesianas. Los mapas de profundidad así recogidos pueden entonces ser utilizados para construir imágenes de síntesis en tres dimensiones (objetos numéricos) para varios propósitos.

10 Son utilizadas varias tecnologías de escáner: algunas necesitan un contacto físico con la superficie a digitalizar, por ejemplo las máquinas de medición tridimensionales (MMT) para las cuales la medida es realizada palpando la superficie por medio de un sensor por contacto o de un lápiz táctil. Otros permiten realizar la medición sin contacto físico, como por ejemplo los sistemas estereoscópicos basados sobre la utilización de dos cámaras, ligeramente separadas y que apuntan hacia la misma escena, para las cuales la profundidad es deducida de la deformación geométrica entre las dos imágenes.

15 Los escáneres tridimensionales llamados «de luz estructurada» son una familia específica de escáneres tridimensionales sin contacto. Estos escáneres están constituidos de un proyector de luz, generalmente realizado sobre el principio de un video-proyector o constituido de un sistema láser que genera franjas de interferencias (para la técnica llamada del desfase («phase-shifting»)), y al menos una cámara desplazada geoméricamente con relación al proyector con el fin de realizar una configuración estereoscópica. El proyector proyecta un patrón luminoso llamado «estructurado», con una o dos dimensiones geométricas (por ejemplo una línea o una imagen) y eventualmente coloreado, sobre la superficie a medir. La cámara posicionada a una distancia del proyector llamada «base estereoscópica», adquiere y registra una imagen de la escena. El patrón estructurado proyectado está constituido de patrones elementales (llamados «elementos estructurado» en este documento) apropiadamente elegidos de manera que sea posible detectarlos en la imagen adquirida.

20 La posición geométrica (x, y, z) de cada punto de la superficie de la escena observada se obtiene por un método de triangulación entre las direcciones de proyección y de formación de imágenes de cada elemento estructurado. Los patrones utilizados en los escáneres tridimensionales de luz estructurada son generalmente proyectados en negro y blanco, en niveles de gris, en colores o en una combinación de los tres efectos (lo que se expone por ejemplo en el artículo de J. Geng, «Structured-Light 3D Surface imaging: a tutorial», Advances in Optics and Photonics 3, páginas 128-160. 2011). En el caso donde la escena observada es estática, métodos llamados «multiple-shot» de proyecciones (temporalmente) secuenciales de patrones (por ejemplo las técnicas llamadas de «phase shifting», de «binary patterns» o de «gray coding»), permiten obtener medidas precisas y fiables gracias a la complementariedad de las informaciones disponibles en las imágenes de la secuencia (véase por ejemplo J. Geng, 2011). En el caso donde la escena a observar está en movimiento, es necesario entonces emplear métodos de proyecciones no secuenciales, de una imagen (llamada «single-shot»), incluso de dos imágenes (llamadas «two-shot») si la adquisición de las dos imágenes es suficientemente rápida con relación al movimiento propio de la escena. Las técnicas no secuenciales implican proyectar una multitud de elementos estructurados suficientemente diferentes entre sí con el fin de ser identificables en la imagen adquirida por la cámara. Estos elementos estructurados pueden ser, por ejemplo, bandas cuyos colores son definidos por una secuencia llamada de «De Bruijn», o bien incluso nubes de puntos codificados (véase J. Geng, 2011).

25 Cuando la superficie a digitalizar presenta fuertes gradientes de relieve o discontinuidades (agujeros u oclusiones por ejemplo), el mapa de profundidad producido por los escáneres tridimensionales de luz estructurada de la técnica anterior por medio de las técnicas no secuenciales puede ser inclinado o incompleto en la proximidad de estas formas singulares ya que algunos elementos estructurados proyectados no son entonces más que parcialmente observables (es decir en parte ocultos) o demasiado deformados, y no son por tanto siempre identificables en la imagen adquirida por la cámara.

30 Además, los escáneres tridimensionales de luz estructurada de la técnica anterior permiten esencialmente producir el mapa de profundidad de la escena cuya imagen se ha formado, incluso disponer eventualmente de informaciones sobre su apariencia (color, textura, ...), pero no proporcionan datos cuantitativos que permiten deducir la naturaleza de los materiales constitutivos de los elementos de la escena.

Tales informaciones, utilizadas conjuntamente con el mapa de profundidad, serían muy útiles para producir, precisa y automáticamente, una identificación y una clasificación de los elementos de la escena.

35 Se ha propuesto un procedimiento en las solicitudes de patente US 2014/0028800 y US 2014/0028801. Está basado sobre una utilización teórica de un dispositivo de proyección de luz estructurada en el dominio espectral y de un dispositivo de formación de imágenes que permite asegurar una medida del espectro de la luz reflejada (o difundida) por la superficie de la escena o del objeto observado. La estructuración del patrón es realizada en el dominio

espectral en lugar de en los dominios geométrico, colorimétrico y/o temporal. La información espectral reflejada por la superficie de los elementos de la escena constituye un dato útil para determinar la naturaleza de los materiales observados. Se ha sugerido igualmente, a título de ejemplo, realizar una proyección multi-espectral de los patrones geométricos binarios, de manera similar a la técnica «binary patterns» con la diferencia de que los patrones binarios no son proyectados secuencialmente en el tiempo sino simultáneamente en diferentes longitudes de onda, siendo asegurada entonces al final la separación de las imágenes por el dispositivo de formación de imágenes espectral. En otros términos, el procedimiento propuesto en estas patentes se basa sobre una utilización hipotética de un proyector dotado de varios canales de longitud de onda relativamente estrechos y que permiten proyectar simultáneamente imágenes geométricas diferentes de un canal de longitud de onda a otro. Además, se ha indicado que el número de canales del proyector debe ser bastante elevado, típicamente superior a 10 por analogía a la técnica «binary patterns», para asegurar una precisión suficiente sobre el mapa de profundidad de la escena. Sin embargo, no se ha descrito ni incluso propuesto ningún dispositivo que permite poner en práctica el procedimiento. Se ha mencionado sin embargo en estos documentos que los canales de longitud de onda del proyector pueden ser eventualmente asociados con la utilización de fuentes monocromáticas tales como fuentes láseres o LED, pero no se proporcionan las características técnicas que permiten desembocar en un prototipo.

Los video-proyectores disponibles comercialmente no permiten satisfacer esta necesidad.

En efecto, los video-proyectores disponibles comercialmente están dotados generalmente de tres canales colorimétricos correspondientes a los colores rojo, verde y azul (RVB), como se ha descrito por ejemplo en las patentes US6247814B1 y US2004085634A1, lo que es suficiente para proyectar elementos estructurados en los dominios geométrico, colorimétrico y temporal, pero no para medir una reflectancia espectral de la escena observada con precisión ya que esto necesita una gran gama de longitudes de onda.

Existen sin embargo video-proyectores que poseen más de tres canales colorimétricos (véanse por ejemplo las patentes WO2006096598A2, US2010156958A1 y US2010315596A1) pero estos proyectores son más voluminosos y más costosos, particularmente por el hecho de que incluyen un prisma óptico de separación de colores más complejo, y que es necesario añadir una matriz de micro-espejos (DMD-Digital Micromirror Device) por canal colorimétrico suplementario.

Finalmente, a fin de optimizar la precisión de la medida del mapa de profundidad y de la información espectral reflejada, sería deseable poder modificar en tiempo real el número y las gamas de longitud de onda de los canales del proyector para adaptar la luz estructurada proyectada a las características espectrales de la iluminación ambiental y a la reflectancia (es decir la firma óptica) de los elementos de la escena. Esta última característica no es realizable más que de manera muy limitada con un proyector cuyos canales de longitud de onda son fijos durante la fabricación por las fuentes monocromáticas seleccionadas.

El objeto de la presente solicitud pretende resolver al menos en parte los problemas mencionados anteriormente para proyectar luz estructurada en el dominio espectral.

Para este propósito, se ha propuesto un proyector de luz estructurada que incluye un dispositivo de codificación espectral de haz de luz en el cual el código óptico del haz de luz es por ejemplo asegurado por un componente que puede ser pasivo (por ejemplo una máscara óptica) o activo (por ejemplo una célula DMD).

Más precisamente, se propone, según un primer aspecto, un proyector de luz estructurada que incluye sucesivamente:

- una fuente de luz configurada para emitir un haz de un espectro continuo entre una longitud de onda mínima (λ_{\min}) y una longitud de onda máxima (λ_{\max}),
- un sistema óptico de descomposición espectral, configurado para captar el espectro del haz emitido por la fuente de luz y descomponerlo espectralmente con una imagen del haz en la longitud de onda mínima (λ_{\min}) que es contigua a una imagen del haz en la longitud de onda máxima (λ_{\max}) en al menos un plano determinado transversal a un camino óptico del haz y a lo largo de una línea de este plano que constituye una frontera,
- un dispositivo de codificación configurado para codificar el espectro descompuesto espectralmente,

incluyendo el dispositivo de codificación una máscara,

estando posicionada la máscara en el plano predeterminado, e

incluyendo la máscara un patrón matricial de codificación binaria formado de una serie de $2 \cdot n$ líneas y de una serie de m columnas, donde « n » es igual o superior a 4, o 5, o 7, o incluso aún 8 o 9, y donde « m » es igual o superior a 16, o 32, o 128, o incluso aún 256, siendo superpuesta una demarcación entre las líneas « n » y « $n+1$ » a dicha frontera,

siendo iluminado un sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » por la imagen del haz en la longitud de onda

λ_{\min} y siendo iluminado un sub-patrón definido por las líneas « $n+1$ » a « $2*n$ » por la imagen del haz en la longitud de onda λ_{\max} ,

siendo el sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » idéntico o complementario del sub-patrón definido por las líneas « $n+1$ » a « $2*n$ », y

5 siendo iluminado un sub-patrón definido por las líneas « i » a « $i+n-1$ », estando i comprendido entre 2 y n , por una imagen del haz en una longitud de onda λ dada comprendida entre λ_{\min} y λ_{\max} ,

siendo las m columnas perpendiculares a esta demarcación e incluyendo cada una de las dos columnas contiguas una codificación binaria diferente de la otra,

10 - un sistema óptico de nueva combinación espectral configurado para volver a combinar en un haz que se ha vuelto a combinar del espectro descompuesto espectralmente y codificado, y

- un sistema óptico de proyección configurado para proyectar el haz vuelto a combinar sobre una escena a observar

Tal proyector presenta así por ejemplo las siguientes ventajas:

15 (1) es simple de fabricar: en algunas configuraciones propuestas de la presente invención, un número elevado de canales espectrales puede obtenerse con una sola fuente de luz, un sólo componente de codificación óptica y componentes ópticos estándares (lentillas, espejos, prismas, redes, etc.) y en número limitado.

20 (2) La fuente utilizada puede ser incoherente con un amplio espectro y no es por tanto necesario recurrir a un conjunto de fuentes monocromáticas para producir canales espectrales de proyección. Por consiguiente, se pueden emplear una gran variedad de fuentes naturales (sol, luz del día, etc.) o artificiales (lámpara incandescente, LED policromáticos, etc.).

(3) En algunas configuraciones propuestas de la presente invención y en el caso del empleo de un componente activo de codificación óptica, se pueden modificar el número y las gamas de las longitudes de onda de los canales del proyector en tiempo real.

La máscara incluye ventajosamente al menos $m/5$ codificaciones diferentes en las m columnas.

25 Esto contribuye a reducir una ambigüedad de interpretación durante el post tratamiento de las imágenes adquiridas.

Por otro lado, una codificación es ventajosamente repetida en un máximo de 5 columnas.

Esto contribuye a reducir una complejidad del algoritmo de determinación del mapa de profundidad.

Es por tanto aún más interesante que las dos condiciones precedentes sean acumuladas.

30 Según un ejemplo interesante, las m columnas del sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » incluyen un máximo de 5 repeticiones de una misma secuencia de codificaciones diferentes entre sí. Es decir, por ejemplo una codificación según las columnas del tipo « ABCABCABCABCABC »; en este caso se trataría de una codificación de $m=15$ columnas que incluyen $m/5=3$ codificaciones diferentes con cada codificación que se repite 5 veces y cada secuencia de codificación « ABC » que se repite igualmente aquí 5 veces.

35 De preferencia, las m columnas del sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » incluyen codificaciones todas diferentes entre sí.

Se trata entonces de un caso preferido, o llamado « caso perfecto » ya que cada columna es entonces fácilmente identificable en términos de posicionamiento, esto es una configuración de la máscara que incluye un mínimo de ambigüedad.

Según otro ejemplo interesante, el número de columnas « m » es igual a « 2^n », siendo n el número de líneas.

40 Por ejemplo, las líneas del sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » incluyen codificaciones que representan una sucesión de potencias de 2.

Se entiende aquí por sucesión de potencias de 2 que las líneas del sub-patrón considerado incluyen una codificación que representa una sucesión de estructuras periódicas cuyo número de periodos, de una línea a otra, es igual a $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-1}$.

45 Según un ejemplo particularmente interesante, el sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » incluye n líneas y $m=2^n$ columnas cuyas líneas incluyen codificaciones que representan una sucesión de potencias de 2.

Esto permite obtener una codificación simple mientras que asegura que todas las columnas incluyen una codificación diferente de las otras.

Posiblemente, han sido mezcladas las codificaciones de las columnas.

Según aún otro ejemplo, el sub-patrón definido por las líneas « 1 » a « n » incluye n líneas y $m=2^n$ columnas cuyas líneas incluyen codificaciones que representan una sucesión de potencias de 2 y han sido mezcladas.

5 Para realizar tal máscara, el dispositivo de codificación incluye por ejemplo una disposición matricial de zonas reflectantes y zonas absorbentes. O, según otro ejemplo, el dispositivo de codificación incluye una disposición matricial de zonas transparentes y zonas opacas.

En una configuración de funcionamiento por transparencia/opacidad, el dispositivo de codificación incluye por ejemplo un sistema opto-electrónico constituido de píxeles cuya transparencia óptica se puede pilotar electrónicamente, estando formada entonces la máscara por el sistema opto-electrónico.

10 Tal sistema opto-electrónico particularmente cómodo en el marco de la presente invención es por ejemplo una pantalla de cristales líquidos (LCD – Liquid Crystal Display).

En una configuración de funcionamiento por reflexión/absorción, el dispositivo de codificación incluye por ejemplo un sistema opto-electrónico constituido de píxeles cuya reflectividad óptica se puede pilotar electrónicamente, estando formada la máscara entonces por el sistema opto-electrónico.

15 Tal sistema opto-electrónico particularmente cómodo en el marco de la presente invención es por ejemplo una matriz de micro espejos (DMD Digital Micromirror Display).

Según un ejemplo de realización particularmente cómodo, la fuente de luz del proyector incluye una fuente de luz natural o una fuente de luz artificial.

20 Por ejemplo, se puede tratar de una fuente de luz artificial continua, por ejemplo una lámpara de filamento o incandescente, una lámpara halógena, un LED, o de otro tipo.

Según un ejemplo de configuración interesante, el sistema óptico de descomposición espectral y el sistema óptico de nueva combinación espectral son el mismo sistema óptico atravesado en un sentido y en sentido inverso por el haz.

25 Tal configuración permite hacer que el proyector sea más compacto minimizando el número de componentes para su realización.

Según aún un ejemplo interesante, el proyector incluye un diafragma. El diafragma es por ejemplo posicionado entre la fuente de luz y el sistema óptico de descomposición espectral. Es por ejemplo configurado para delimitar geoméricamente el haz.

30 Por ejemplo, el proyector incluye un espejo convergente y/o una lentilla convergente posicionada o posicionadas entre la fuente de luz y el sistema óptico de descomposición espectral sobre un camino óptico del haz, incluso entre la fuente de luz y el diafragma llegado el caso.

En un ejemplo privilegiado de realización, el sistema óptico de descomposición espectral incluye un prisma óptico. Puede igualmente incluir una red óptica.

35 Según aún otro ejemplo interesante, el proyector incluye al menos un objetivo. El objetivo incluye por ejemplo una lentilla convergente, o un espejo, por ejemplo un espejo convergente. En una configuración privilegiada, el objetivo es entonces posicionado después del sistema óptico de descomposición espectral sobre un camino óptico del haz.

Por ejemplo, el proyector incluye una lentilla convergente y luego un espejo posicionados antes del sistema óptico de descomposición espectral sobre un camino óptico del haz.

40 El espejo es entonces configurado por ejemplo para reenviar el haz en una dirección diferente en función de las necesidades de compacidad a dar al proyector.

Según un ejemplo privilegiado de realización, el sistema óptico de nueva combinación espectral incluye un prisma óptico. Puede igualmente incluir una red óptica.

45 Según aún un ejemplo interesante, el proyector incluye al menos un objetivo. El objetivo incluye por ejemplo una lentilla convergente, o un espejo, por ejemplo un espejo convergente. En una configuración privilegiada, el objetivo es posicionado antes del sistema óptico de nueva combinación espectral sobre un camino óptico del haz.

Según aún otro ejemplo interesante, el proyector incluye un espejo y luego una lentilla convergente posicionados después del sistema óptico de nueva combinación espectral, por ejemplo después del prisma, sobre un camino óptico del haz.

50 El espejo es entonces por ejemplo configurado para reenviar el haz en una dirección diferente en función de las necesidades de compacidad a dar al proyector.

Se propone igualmente, según otro aspecto de la presente invención, un escáner tridimensional de luz estructurada que incluye un proyector y un dispositivo de detección, caracterizado por que el proyector es un proyector tal como el que se ha descrito precedentemente, que incluye todas o parte de las características mencionadas precedentemente, y porque el dispositivo de detección es una cámara multi-espectral.

5 Ventajosamente, la cámara incluye al menos 4 canales espectrales.

La cámara está dispuesta por ejemplo a una distancia determinada del proyector, llamada «base estereoscópica».

Según un ejemplo de realización particularmente interesante, la cámara multi-espectral incluye al menos 6 canales espectrales, u 8, o incluso 9.

10 Según otro ejemplo de realización interesante, la cámara multi-espectral está configurada para utilizar un número de canales espectrales igual a un número de canales espectrales definidos por la máscara del dispositivo de codificación.

15 Según otro ejemplo de realización particularmente interesante, en concreto para aumentar el rendimiento del escáner cuando el dispositivo de codificación no se puede pilotar electrónicamente, el escáner tridimensional incluye también una fuente de luz secundaria que se puede pilotar electrónicamente y cuyo espectro es continuo entre la longitud de onda mínima (λ_{\min}) y la longitud de onda máxima (λ_{\max}), por ejemplo un flash de una cámara fotográfica, con el fin de iluminar la escena temporalmente para enriquecer la medición de reflectancia de los elementos de la escena por una o varias adquisiciones de imágenes con la cámara multi-espectral.

20 La invención, según un ejemplo de realización, será bien entendida y sus ventajas se verán mejor con la lectura de la descripción detallada que sigue, dada a título indicativo y no limitativo, en referencia a los dibujos adjuntos en los cuales:

La fig. 1 presenta el principio general de un proyector según un ejemplo de realización de la presente invención,

Las figs. 2a y 2b detallan parámetros geométricos del haz-modelo 2,

La fig. 3 muestra esquemáticamente un ejemplo de realización de elementos de un proyector según la fig. 1 formados de hojas de vidrio con caras planas y paralelas,

25 La fig. 4 muestra esquemáticamente otro ejemplo de realización de los elementos de la fig. 3,

Las figs. 5a y 5b ilustran respectivamente la propagación del haz $F_{\lambda_{\max}}$ y del haz $F_{\lambda_{\min}}$, correspondiente respectivamente a la longitud de onda máxima (λ_{\max}) y a la longitud de onda mínima (λ_{\min}) del haz incidente, y la fig. 5c ilustra la propagación combinada de los haces extremos $F_{\lambda_{\min}}$ y $F_{\lambda_{\max}}$ y presenta un ejemplo de máscara binaria doble del que cada sub-patrón representa los 16 valores binarios de una base canónica de grado 4,

30 La fig. 6 presenta una definición del ángulo de dispersión espectral, expresada como $\alpha_{\text{dispersión}}$, que caracteriza la dispersión espectral introducida por el sistema óptico de descomposición espectral 3,

Las figs. 7a y 7b presentan un ejemplo de haz incidente que está totalmente codificado por el dispositivo de codificación 5,

35 La fig. 8 muestra las posiciones geométricas de las imágenes ópticas intermedias de la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ del haz-modelo 2 formadas sobre el dispositivo de codificación 5 en función de la longitud de onda de la luz,

La fig. 9 ilustra un ejemplo de codificación espectral obtenido a lo largo de una línea de una imagen obtenida a la salida del sistema óptico de nueva combinación espectral según el ejemplo de la máscara de la fig. 5c,

La fig. 10 muestra zonas de la máscara iluminadas por cinco haces de luz del haz incidente de longitudes de onda diferentes en un ejemplo donde el haz incidente incluye cinco longitudes de onda monocromáticas,

40 La fig. 11 es una representación esquemática de la imagen de salida del sistema óptico de nueva combinación espectral del ejemplo de la fig. 10,

La fig. 12 presenta las zonas de la máscara iluminadas por cuatro canales en un ejemplo donde el espectro óptico del haz de luz incidente es continuo,

45 La fig. 13 es una representación esquemática de la imagen de salida del sistema óptico de nueva combinación espectral del ejemplo de la fig. 12,

La fig. 14 muestra otro ejemplo del patrón de codificación de la máscara y una representación de codificación espectral obtenida a lo largo de una línea en la imagen de salida,

La fig. 15 ilustra un ejemplo de máscara binaria cuyas columnas han sido mezcladas,

La fig. 16 presenta un proyector según un ejemplo de realización de la presente invención,

La fig. 17 presenta esquemáticamente un escáner tridimensional de luz estructurada según un ejemplo de realización de la presente invención, y

5 La fig. 18, formada por las figs. 18a a 18d, muestra imágenes de las zonas de la máscara observadas por una cámara multi-espectral en los diferentes canales espectrales de la imagen proyectada según un ejemplo de realización de la presente invención.

Los elementos idénticos representados en las figuras anteriormente mencionadas son identificados por referencias numéricas idénticas.

10 El principio general de un proyector de luz estructurada según la invención es presentado esquemáticamente en la fig. 1 según un ejemplo de realización. El proyector incluye principalmente (además de una fuente de luz y un medio de proyección opcional no representados sobre este esquema):

15 - un sistema óptico de descomposición espectral 3, configurado para realizar una separación geométrica de los rayos del haz incidente en función de su longitud de onda (por ejemplo una desviación angular dependiente de la longitud de onda por medio de un prisma o de una red óptica, o incluso de un desplazamiento transversal del haz por medio de una hoja de vidrio en las caras planas y paralelas) según una dirección esencialmente transversal a la marcha del haz, por ejemplo aquí según una dirección vertical representada por un eje (Oy), y opcionalmente para focalizar y/o concentrar el haz de luz en al menos un plano predeterminado transversal a un camino óptico del haz, y por ejemplo sobre un dispositivo de codificación 5, igualmente llamado «de codificación multiplicativa» 5,

20 - el dispositivo de codificación 5, configurado para codificar el espectro del haz de luz dispersado espectralmente, por ejemplo por enmascaramiento parcial, por ejemplo en un caso de máscara con niveles de grises, o total, por ejemplo en un caso de máscara binaria, de algunas zonas. Para ello, el dispositivo de codificación 5 incluye por ejemplo una máscara que es por ejemplo una matriz de micro-espejos (DMD-Digital Micromirror Device) para realizar el enmascaramiento en reflexión, o, para realizar el enmascaramiento en transmisión, una máscara óptica o una pantalla de cristales líquidos (LCD-Liquid Crystal Display),

25 - y un sistema óptico de nueva combinación espectral 8, configurado para volver a combinar espectralmente el haz de luz, compensando parcial o totalmente la separación geométrica (es decir la dispersión espectral) de los rayos incidentes dependientes de la longitud de onda que ha sido introducida por el sistema óptico de descomposición espectral 3.

30 Sobre el esquema de la fig. 1, el sistema óptico de descomposición espectral 3, el dispositivo de codificación 5 y el sistema óptico de nueva combinación espectral 8 son representados en línea sobre un mismo eje óptico pero en la práctica pueden por supuesto ser tenidos en cuenta de otra manera desplazamientos o desviaciones del haz de luz que pueden ser introducidos por los componentes ópticos que constituyen estos elementos, o por deseo de compacidad o de disposición de los elementos del proyector.

35 La función del sistema óptico de nueva combinación espectral 8 puede ser eventualmente asegurada por el sistema óptico de descomposición espectral 3 si el proyector es concebido de manera que la luz pasa dos veces en el sistema óptico de descomposición espectral 3: por ejemplo, una vez en un sentido y una vez en sentido inverso. Dicho de otra manera, el sistema óptico de nueva combinación espectral 8 y el sistema óptico de descomposición espectral 3 pueden en sí estar formados de los mismos elementos, en una misma entidad física.

40 Según el presente ejemplo de realización esquematizado, los elementos del proyector son configurados posiblemente para codificar un haz incidente «óptimo» geoméricamente, es decir que el haz incidente es optimizado, materializado por un haz-modelo 2 (véanse las figs. 1, 2a y 2b). El haz-modelo 2 considerado aquí está centrado sobre el eje óptico de entrada (Oz) del proyector. Presenta por ejemplo una sección rectangular ($S_{\text{haz-modelo}}$), sensiblemente perpendicular al eje óptico de entrada (Oz), y centrado sobre el eje (Oz) en un punto llamado de focalización o concentración, expresado como E. En este documento, se hace referencia a esta sección del haz, es decir el haz formado en la sección $S_{\text{haz-modelo}}$, bajo el nombre de «cintura», que es el término corrientemente utilizado en francés, por analogía a un haz láser. Esta sección ($S_{\text{haz-modelo}}$) está aquí posicionada a una distancia del sistema óptico de descomposición espectral 3, expresada como ($d_{\text{haz-modelo}}$), sobre el eje óptico de entrada (Oz), considerado entre el punto E y una entrada, en un punto O, del sistema óptico de descomposición espectral 3. El haz-modelo 2 a la salida de la «cintura» está además configurado para presentar dos aberturas angulares $\alpha_{\text{haz-modelo}}$ y $\beta_{\text{haz-modelo}}$ (representadas en las figs. 2a y 2b) en dos direcciones, respectivamente aquí Oy, que representa aquí una dirección vertical, y Ox que representa aquí una dirección horizontal, ortogonales entre sí y al eje (Oz).

En el marco de la presente descripción, un haz-modelo es considerado por defecto pero podría por supuesto tratarse del haz incidente no delimitado geoméricamente, como será descrito más adelante.

55 La función, opcional, de focalización del haz de luz sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5 del sistema óptico de descomposición espectral 3 consiste en formar íntegramente la imagen de la «cintura» (es decir de la

sección $S_{\text{haz-modelo}}$ sobre el dispositivo 5.

Sobre el esquema de principio de la fig. 1, la posición de la «cintura» del haz es, en el sentido de la óptica geométrica, un objeto real para el sistema óptico de descomposición espectral 3. Sin embargo, la presente invención no se limita a esta configuración del haz de entrada. Se aplica también si la posición de la «cintura» es virtual para el sistema óptico 3 o si la «cintura» está localizada en el infinito. Por ejemplo, si está localizada entre el sistema óptico de descomposición espectral 3 y el dispositivo de codificación multiplicativa 5, esto significa que para realizar la función de focalización del haz de luz sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5 el sistema óptico de descomposición espectral 3 incluiría un sistema óptico esencialmente divergente, mientras este sistema óptico de descomposición espectral 3 es esencialmente convergente en el caso de la fig. 1 donde la «cintura» es un objeto real para el sistema óptico de descomposición espectral 3. Finalmente, en el caso donde la «cintura» estaría en el infinito, el sistema óptico de descomposición espectral 3 sería posiblemente de manera esencial convergente y el dispositivo de codificación multiplicativa 5 estaría por ejemplo posicionado al nivel del foco de imagen del sistema óptico de descomposición espectral 3, según las dimensiones de la imagen de la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ (por el sistema óptico de descomposición espectral 3) y de la máscara del dispositivo de codificación 5 por ejemplo.

La función de focalización/concentración del haz de luz sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5 del sistema óptico de descomposición espectral 3 es generalmente una ventaja para realizar un proyector cuya riqueza de codificación es optimizada, es decir que el índice de correlación entre las codificaciones espectrales de diferentes elementos estructurados obtenidas a la salida del dispositivo de codificación espectral del haz de luz 5 es suficientemente débil. Sin embargo, algunas configuraciones menos eficaces o polivalentes pueden ser consideradas sin esta función. Por ejemplo (véase fig. 3), es posible realizar un proyector que incluye una primera hoja de vidrio con caras planas y paralelas (cuyas caras están inclinadas con relación al eje Oy en un ángulo $+\theta$ alrededor del eje (Ox)) para separar geoméricamente los rayos incidentes en función de su longitud de onda (es decir formando el sistema óptico de descomposición espectral 3), un dispositivo de codificación multiplicativa 5 utilizado en transmisión (por ejemplo una máscara óptica), y una segunda hoja de vidrio con caras planas y paralelas (cuyas caras están inclinadas con relación al eje Oy en un ángulo igual a $-\theta$ alrededor del eje (Ox)) para volver a combinar espectralmente los rayos incidentes (es decir formando el sistema óptico de nueva combinación espectral 8).

El ejemplo representado en la fig. 4 repite el principio ilustrado en la fig. 3 detallando los caminos tomados por el haz de longitud de onda λ_{min} y el haz de longitud de onda λ_{max} en una configuración privilegiada en la cual estos haces están yuxtapuestos según una línea que constituye una frontera.

La luz que constituye el haz incidente es por ejemplo policromática: su espectro puede ser discreto (es decir constituido de un número finito de longitudes de onda) o continuo. La gama espectral puede extenderse en los dominios ultravioleta y/o visible y/o infrarrojo según la aplicación. El haz puede por tanto provenir de una fuente natural (sol, luz del día, etc.) o artificial (lámpara incandescente, LED policromático, conjunto de varios LED casi monocromáticos, conjunto de varios diodos láseres, etc.).

El proyector es configurado de manera ventajosa ópticamente para una gama dada de longitudes de onda, expresado aquí como $[\lambda_{\text{min}} - \lambda_{\text{max}}]$. Las figs. 5a y 5b representan respectivamente la propagación óptica de la luz en los principales componentes ópticos anteriormente mencionados del proyector para la longitud de onda máxima (λ_{max}) y la longitud de onda mínima (λ_{min}) del haz incidente, en particular cuando ésta es materializada por el haz-modelo 2. En estas figuras, la dispersión espectral de los rayos incidentes se supone que es una desviación angular vertical producida a la entrada del sistema óptico de descomposición espectral 3 y la imagen de la cintura del haz-modelo está formada sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5 por ejemplo por un sistema óptico convergente (por ejemplo una lentilla en transmisión o un espejo en reflexión), por ejemplo localizado en la salida del sistema óptico de descomposición espectral 3. Aunque en estos esquemas, la dispersión espectral sea realizada antes de la recuperación de imagen por el sistema óptico convergente, estas dos funciones pueden también ser realizadas en el orden inverso.

La fig. 5c ilustra la propagación combinada de estos dos haces extremos. El ángulo $\alpha_{\text{dispersión}}$ de dispersión espectral introducido en el sistema óptico de descomposición espectral 3 entre los haces $F_{\lambda_{\text{min}}}$ y $F_{\lambda_{\text{max}}}$ se ha representado en la fig. 6. En los esquemas de las figs. 5a, 5b y 5c, las características ópticas del sistema óptico de descomposición espectral 3 son configuradas para que estos dos haces extremos, expresados como $F_{\lambda_{\text{min}}}$ y $F_{\lambda_{\text{max}}}$, corten, encuentren, la máscara del dispositivo de codificación 5 según dos secciones rectangulares idénticas (expresadas como $S_{\lambda_{\text{min}}}$ y $S_{\lambda_{\text{max}}}$ respectivamente) y yuxtapuestas a lo largo de la dirección de la dispersión espectral del haz (en este ejemplo, se supone que la dispersión en longitud de onda coloca $F_{\lambda_{\text{min}}}$ en una posición vertical inferior a la de $F_{\lambda_{\text{max}}}$). Esta condición, llamada yuxtaposición en lo sucesivo, es la configuración preferida de la invención pero la invención se aplica también si las zonas de intersecciones se recubren parcialmente o son distantes entre sí. Cuando las zonas de intersecciones se recubren parcialmente, el índice de correlación entre los códigos espectrales contenidos en el haz de luz de salida del proyector es más elevado que en el caso de la yuxtaposición de estas dos zonas. La riqueza de la codificación espectral disminuye con el aumento de este índice de correlación. Por ejemplo, en un caso extremo donde la desviación angular de los rayos incidentes en el sistema óptico de descomposición espectral 3 no dependería de la longitud de onda, las zonas de intersección se recubrirían totalmente y cada canal espectral atravesaría («vería») la misma zona del dispositivo de codificación multiplicativa 5. Cada canal espectral

sería por tanto codificado por la misma información y el índice de correlación sería igual a 1. Finalmente, cuando las zonas de intersecciones son distantes entre sí, la riqueza de la codificación espectral puede ser conservada adaptando el patrón de codificación multiplicativa a la geometría de la figura de luz obtenida sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5. Tal configuración hace sin embargo la interpretación de las medidas más delicada.

5 Cuando el haz incidente es el materializado por el haz-modelo 2, la totalidad de la luz incidente es codificada y es utilizado el campo total de codificación del sistema. En otras situaciones:

- O bien el haz incidente es totalmente codificado: es el caso por ejemplo de un haz de entrada 1 definido en las figs. 7a y 7b (y cuyo camino óptico es evidente en la fig. 5c) para lo cual:

o una sección $S_{\text{haz-ejemplo}}$ en el punto E es incluida en la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ del haz-modelo 2,

10 o y las aberturas angulares $\alpha_{\text{haz-ejemplo}}$ y $\beta_{\text{haz-ejemplo}}$ en las dos direcciones Oy y Ox son respectivamente inferiores a las aberturas angulares $\alpha_{\text{haz-modelo}}$ y $\beta_{\text{haz-modelo}}$ del haz-modelo 2.

- O bien una parte solamente del haz incidente es codificada ya que algunos rayos son físicamente diafragmados, o el haz incidente está geoméricamente delimitado, ya sea aguas arriba del sistema óptico de descomposición espectral 3 (situación que sería entonces análoga a la de un haz-modelo) o bien por el propio dispositivo de codificación 5, por ejemplo en un caso donde una imagen sobre la máscara sería más grande que la superficie de la máscara. Por ejemplo, en el caso de un haz incidente que envuelve el haz-modelo 2, sólo la fracción del haz incidente correspondiente a este modelo será codificada.

En los esquemas teóricos de las figs. 5a, 5b y 5c, el sistema óptico de nueva combinación espectral 8 que permite «volver a combinar» espectralmente el haz de luz, compensa totalmente la dispersión espectral de los rayos incidentes inicialmente introducidos por el sistema óptico de descomposición espectral 3: los haces $F_{\lambda_{\text{min}}}$ y $F_{\lambda_{\text{max}}}$ se vuelven a combinar en efecto totalmente. En el ejemplo de realización representado en estas figuras, la nueva combinación espectral es realizada antes de una recuperación de imagen por un sistema óptico convergente pero estas dos funciones pueden también ser realizadas en el orden inverso. El haz de salida 9 obtenido a la salida del sistema óptico de nueva combinación espectral 8 está centrado sobre el eje óptico de este último (aquí el mismo eje (Oz)) y se focaliza en una posición dada de este eje. Su sección, aquí igualmente rectangular, $S'_{\text{haz-modelo}}$ (esquemática en la fig. 1 particularmente) es sensiblemente perpendicular al eje óptico de salida, y su punto de focalización es expresado como E' (igualmente representado en la fig. 1 principalmente). Los planos de las secciones $S_{\text{haz-modelo}}$ y $S'_{\text{haz-modelo}}$ son conjugados ópticamente por los elementos del proyector situados entre ellos. En estas figuras, la imagen $S'_{\text{haz-modelo}}$ de la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ está formada en un espacio de imagen real del sistema óptico de nueva combinación espectral 8, pero es posible formarlo en el espacio de imagen imaginaria (por una elección adaptada de los elementos del sistema óptico de nueva combinación espectral 8) si la aplicación lo necesita.

Se ha representado un ejemplo de máscara 51 del dispositivo de codificación multiplicativa 5 en el emplazamiento de estas dos secciones $S_{\lambda_{\text{min}}}$ y $S_{\lambda_{\text{max}}}$ en las figs. 5a, 5b y 5c: se trata aquí de una máscara de codificación binaria para la cual las zonas negras de la máscara representa las partes opacas a la luz (en un caso de máscara que opera en transmisión: correspondiendo estas zonas a las zonas absorbentes en un caso de máscara que opera en reflexión), que equivalen al valor multiplicativo 0 del flujo de luz que lo atraviesa, y las zonas blancas representan las partes transparentes (en el caso de una máscara que opera en transmisión; correspondiendo estas zonas a las zonas reflectantes en el caso de una máscara que opera en reflexión), que equivale al valor multiplicativo 1. La máscara 51 está constituida de líneas y columnas, en particular aquí el patrón de base, o sub-patrón, incluye $m=16$ columnas y $n=4$ líneas a título de ejemplo: las columnas de la máscara están orientadas siguiendo la dirección relacionada con la dispersión espectral del haz, es decir la dirección vertical en estas figuras (o bien el eje (Oy)), y las líneas son perpendiculares a la dirección de las columnas, es decir orientadas aquí según la dirección transversal horizontal (o bien el eje (Ox)). En el caso de este ejemplo, la máscara 51 codifica los dos haces $F_{\lambda_{\text{min}}}$ y $F_{\lambda_{\text{max}}}$ de manera idéntica. Este ejemplo de codificación presenta por tanto una repetición de un patrón de base (la mitad superior o la mitad inferior de la máscara) según la dirección asociada a la dispersión espectral del haz: en este documento, se hace referencia por ejemplo a este tipo particular de codificación bajo la denominación «codificación doble» o «enmascaramiento doble». El patrón de base de la máscara doble contiene aquí 16 valores binarios de una base canónica de grado 4, clasificadas aquí por orden creciente de izquierda a derecha en las figs. 5a, 5b y 5c (a saber para cada columna a partir de la izquierda según las líneas que parten de la de la parte superior por ejemplo: 0000, 0001, 0010, ..., 1111), cuyos 4 bits están respectivamente asociados a las cuatro líneas del patrón.

El principio de funcionamiento del dispositivo de codificación multiplicativa 5 es presentado en las figs. 8 a 13 sobre la base de este ejemplo de patrón de codificación. Además, para simplificar las explicaciones y aligerar la formulación matemática de la codificación espectral del haz, el aumento del sistema óptico de descomposición espectral 3 y el del sistema óptico de nueva combinación espectral 8 son aquí positivos e iguales a 1 (como se ha representado en la fig. 8), y las transmisiones ópticas de estos dos dispositivos son iguales a 1 sobre el conjunto de sus campos ópticos útiles. La variación de estos aumentos y las transmisiones ópticas con la longitud de onda son igualmente despreciadas. Por las mismas razones, la desviación angular introducida por el sistema óptico de descomposición espectral 3 se supone que es lineal con la longitud de onda y el ángulo $\alpha_{\text{dispersión}}$ de dispersión

espectral introducido entre los haces $F_{\lambda_{\min}}$ y $F_{\lambda_{\max}}$ se considera como que es suficientemente pequeño para expresar la formulación matemática de la codificación espectral del haz en el marco de la aproximación de los pequeños ángulos (es decir que se puede suponer que $\tan(\alpha_{\text{dispersión}}) \approx \alpha_{\text{dispersión}}$). La hipótesis de linealidad de la desviación con la longitud de onda y la aproximación de los pequeños ángulos permiten considerar que el haz de luz corta, encuentra, el plano de la máscara 51 según una sección rectangular cuya posición varía linealmente en función de la longitud de onda entre la posición $S_{\lambda_{\min}}$ y la posición $S_{\lambda_{\max}}$. Sin embargo, la presente invención se aplica también si estos aumentos y transmisiones ópticas son diferentes de 1, si la desviación angular introducida por el sistema óptico de descomposición espectral 3 no es lineal con la longitud de onda (por ejemplo en el caso de un prisma óptico) y si el ángulo $\alpha_{\text{dispersión}}$ es importante.

Las luminancias espectrales de las imágenes formadas al nivel de las secciones $S_{\text{haz-modelo}}$ y $S'_{\text{haz-modelo}}$ son respectivamente indicadas como $F(x_n, y_n, \lambda_n)$ y $F'(x'_n, y'_n, \lambda'_n)$ en la fig. 8. En esta fórmula, λ_n es el valor normalizado de la longitud de onda: $\lambda_n = (\lambda - \lambda_{\min}) / (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$ con $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$. De manera similar, (x_n, y_n) y (x'_n, y'_n) son los valores normalizados de las coordenadas de los puntos localizados sobre las secciones $S_{\text{haz-modelo}}$ y $S'_{\text{haz-modelo}}$ respectivamente (como se ha representado en la fig. 8). Finalmente, la función multiplicativa (incluida entre 0 y 1) del dispositivo de codificación multiplicativa 5 es expresada como $M(x''_n, y''_n)$ en la fig. 8 con (x''_n, y''_n) los valores normalizados de las coordenadas de los puntos localizados sobre la zona útil de codificación (zona rectangular representada en líneas de puntos en la fig. 8), es decir de la máscara. La posición del haz de luz en la zona útil de codificación es representada en esta figura para tres valores de la longitud de onda: $\lambda = \lambda_{\min}$ (caso de la fig. 5b), $\lambda = \lambda_{\max}$ (caso de la fig. 5a) y el caso donde $\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}$, es decir para un valor de longitud de onda λ cualquiera del haz incidente incluido entre estos límites.

Con estas hipótesis y notaciones, la imagen de un punto (x_n, y_n) de la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ se forma en el punto $(x'_n = x_n, y'_n = y_n)$ de la sección $S'_{\text{haz-modelo}}$ y la luminancia $F'(x'_n, y'_n, \lambda'_n)$ de la imagen obtenida a la salida es proporcional al producto $F(x_n, y_n, \lambda_n) \times M(x_n, (y_n + \lambda_n)/2)$, donde $F(x_n, y_n, \lambda_n)$ es la luminancia del haz en la sección $S_{\text{haz-modelo}}$. Este producto constituye la fórmula de codificación espectral del haz. Esta codificación espectral está ilustrada en la fig. 9 a lo largo de una línea de abscisa x'_0 (que corresponde por ejemplo con la 6ª columna de la máscara binaria doble) de la imagen obtenida a la salida del sistema óptico de nueva combinación espectral: la función $F'(x'_0, y'_n, \lambda'_n)$ representa el contenido espectral del haz de luz a lo largo de esta línea (para limitar la representación gráfica al fenómeno físico a ilustrar, la función $F'(x'_0, y'_n, \lambda'_n)$ es representada suponiendo que la función $F(x_n, y_n, \lambda_n)$ constante en cualquier punto de la sección $S_{\text{haz-modelo}}$ y sobre el rango de longitud de onda $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$.

Las figs. 10 a 13 representan ilustraciones gráficas del proceso óptico de codificación. En el caso de las figs. 10 y 11, el espectro de la luz del haz incidente se considera aquí que está constituido de cinco longitudes de onda λ_1 ($=\lambda_{\min}$), λ_2 , λ_3 , λ_4 y λ_5 ($=\lambda_{\max}$) y el sistema óptico de descomposición espectral 3 está configurado para separar geoméricamente los rayos incidentes de la manera siguiente:

- el haz F_1 ($=F_{\lambda_{\min}}$) de longitud de onda λ_1 ($=\lambda_{\min}$) ilumina (es decir atraviesa en el caso de una máscara que opera en transmisión o es reflejado en el caso de una máscara que opera en reflexión) la mitad inferior de la máscara doble (como en las figs. 5b y 5c), ya sean las líneas nº1 a nº4 si sus líneas son numeradas de 1 a $8=2 \times n$, aquí según la dirección (Oy),

- el haz F_2 de longitud de onda λ_2 atraviesa las líneas nº2 a nº5 de la máscara doble,

-,

- el haz F_3 de longitud de onda λ_3 atraviesa las líneas nº3 a nº6 de la máscara doble,

- el haz F_4 de longitud de onda λ_4 atraviesa las líneas nº4 a nº7 de la máscara doble,

- y el haz F_5 ($=F_{\lambda_{\max}}$) de longitud de onda λ_5 ($=\lambda_{\max}$) atraviesa las líneas nº5 a nº8, es decir la mitad superior de la máscara doble (como en las figs. 5a y 5c).

Las zonas de la máscara de codificación doble respectivamente atravesadas por los haces F_1 a F_5 son representadas en la fig. 10 (zonas excluidas de las partes sombreadas). La imagen 91 formada al nivel de la sección $S'_{\text{haz-modelo}}$ del haz de salida 9 (véase la fig. 11) contiene cuatro líneas, indicadas como L1 a L4 de 16 píxeles (se trata de la segmentación introducida por el patrón de base de la máscara doble) formando las $M=16$ columnas. Esta imagen está constituida de la combinación de cinco haces F_1 a F_5 , habiendo sido cada uno codificado por la zona de la máscara doble que ha atravesado. Si se considera, en cada píxel de esta imagen, el valor binario de 5 bits asociado con la presencia o ausencia de una longitud de onda en el orden respectivo $\lambda_5 \lambda_4 \lambda_3 \lambda_2 (\lambda_1)$, se obtiene la tabla de valores colocada a la derecha de la fig. 11. El último bit, correspondiente a (λ_1) está entre paréntesis ya que es siempre igual aquí al primer bit, correspondiente a (λ_5) (atravesando los haces F_1 a F_5 zonas de la máscara que son idénticas aquí). Omitiendo el bit 5 que esta entre paréntesis, cada una de las líneas L1 a L4 contiene el conjunto de números, 0000 a 1111, de la base canónica binaria de grado 4.

Considerando el caso más general donde el espectro de la luz que constituye el haz incidente es continuo (véanse las figs. 12 y 13), y que se supone que este espectro engloba la gama espectral $[\lambda_{\min} - \lambda_{\max}]$, ésta es la configuración del patrón de base de la máscara que permite fijar el número y los anchos espectrales de los canales

espectrales que constituyen la base espectral de la codificación. En el marco del presente ejemplo de la máscara binaria doble, la máscara «corta» naturalmente cuatro canales espectrales expresados aquí como C1 a C4, espectralmente contiguos, cuyas gamas de longitudes de onda son $[\lambda_1 - \lambda_2]$, $[\lambda_2 - \lambda_3]$, $[\lambda_3 - \lambda_4]$ y $[\lambda_4 - \lambda_5]$, respectivamente (con $\lambda_1 = \lambda_{\min}$ y $\lambda_5 = \lambda_{\max}$) y cuyas propiedades ópticas son las siguientes:

- 5 - el haz G_1 asociado al canal C1 = $[\lambda_1 - \lambda_2]$ de longitudes de onda ilumina las líneas nº1 a nº5 de la máscara doble,
- el haz G_2 asociado al canal C2 = $[\lambda_2 - \lambda_3]$ de longitudes de onda ilumina las líneas nº2 a nº6 de la máscara doble,
- 10 - el haz G_3 asociado al canal C3 = $[\lambda_3 - \lambda_4]$ de longitudes de onda ilumina las líneas nº3 a nº7 de la máscara doble,
- el haz G_4 asociado al canal C4 = $[\lambda_4 - \lambda_5]$ de longitudes de onda ilumina las líneas nº4 a nº8 de la máscara doble.

15 La imagen 91 formada al nivel de la sección $S'_{\text{haz-modelo}}$ del haz de salida 9 (véase la fig. 13) es segmentada siempre en 16 columnas como en el caso de la imagen (fig. 11) producida por el haz de luz incidente cuyo espectro luminoso estaba constituido de cinco longitudes de onda discretas λ_1 a λ_5 , sin embargo, la segmentación en línea ya no está presente ya que el contenido espectral de la luz en esta imagen sigue una variación a lo largo del eje vertical (ilustrado en la fig. 9 en una posición de abscisa x'_0 dada) descrita por la fórmula de codificación espectral del haz mencionado precedentemente. En este ejemplo, el número de canales espectrales de codificación puede por tanto ser aumentado o reducido modificando simplemente el número de líneas del patrón de base de la máscara doble.

20 Por ejemplo, si el patrón de base de la máscara binaria doble contiene 10 líneas (es decir $N=10$ en lugar de $n=4$ en el presente ejemplo representado) y representa la base canónica de grado 10, el número de canales espectrales sería de 10. Igualmente, seleccionando alturas diferentes de las líneas en el patrón de base, es posible conservar el número de canales espectrales mientras cambian sus anchos espectrales o para compensar una dispersión espectral no lineal. Por ejemplo, si la línea nº1 de la máscara doble (por tanto también la línea nº5) es más ancha, y la línea nº2 (por tanto también la línea nº6) es proporcionalmente más estrecha para dejar la altura total de la

25 máscara doble sin alterar, la nueva longitud de onda $\lambda_{2\text{bis}}$ es entonces superior a la antigua longitud de onda λ_2 , quedando sin alterar las longitudes de onda λ_1 , λ_3 , λ_4 y λ_5 y, por consiguiente, el nuevo canal $C_{1\text{bis}}$ es más ancho que el antiguo canal C_1 , y el nuevo canal $C_{2\text{bis}}$ es más estrecho que el canal C_2 precedente mientras que los canales C_3 y C_4 quedan idénticos.

30 La máscara doble representada en el presente ejemplo del dispositivo de codificación espectral de los haces de luz 5 y esquematizada en las figs. 5a, 5b, 5c, 9, 10 y 12 presupone también que el sistema óptico de descomposición espectral 3 de este ejemplo funciona en la aproximación lineal en cuanto a la dispersión, como se ha mencionado precedentemente: el ángulo de dispersión, para una longitud de onda dada, se supone en efecto que es constante en el campo óptico del haz-modelo 2, es decir que no varía con la dirección del rayo incidente. En el caso de la no

35 linealidad de esta dispersión, una solución posible es concebir el patrón de la codificación de la máscara a partir del patrón lineal representado aquí aplicando a este último una deformación geométrica que compensa los efectos de ésta no linealidad sobre la forma de la figura luminosa obtenida sobre el dispositivo de codificación multiplicativa 5.

Así, el principio de codificación es ilustrado aquí apoyándose sobre el ejemplo de una máscara binaria, pero una codificación espectral más compleja del haz de luz, por ejemplo con una máscara multiplicativa no binaria (como mucho de dos niveles), es decir cuyos valores cubren niveles de gris entre 0 (opacidad total a la luz) y 1 (transparencia total) sería igualmente considerable.

40

Finalmente, en el ejemplo ilustrado sobre los esquemas de las figs. 5a, 5b y 5c, el sistema óptico de nueva combinación espectral 8 permite «volver a combinar» espectralmente el haz de luz compensando totalmente la separación geométrica de los rayos incidentes que han sido introducidos por el sistema óptico de descomposición espectral 3 en función de las longitudes de onda. Se trata de la configuración preferida de la presente invención ya que asegura una codificación espectral óptima en términos de riqueza de codificación y de rendimiento luminoso de la codificación. Sin embargo, la presente invención se aplica también al caso donde la compensación es parcial, pero en este caso, la riqueza de la codificación espectral no es máxima más que sobre la zona de la imagen de salida en la cual se superponen todas las longitudes de onda de la gama espectral $[\lambda_{\min} - \lambda_{\max}]$. La luz localizada fuera de esta zona, que no está constituida por el conjunto de longitudes de onda del haz incidente, no es codificada espectralmente sobre la totalidad de la gama espectral $[\lambda_{\min} - \lambda_{\max}]$. Además, el nivel de luz es más débil en esta zona que en aquella donde se superponen todas las longitudes de la gama espectral $[\lambda_{\min} - \lambda_{\max}]$.

50

La repetición total del patrón de base es la configuración preferida de la presente invención, pero la invención se aplica también si la repetición del patrón es parcial o eventualmente si no hay repetición en absoluto.

55 Pueden ser elegidos numerosos patrones posibles de manera que aseguren una riqueza de codificación espectral suficientemente elevada. Por ejemplo es posible utilizar un patrón constituido del patrón de base de la máscara binaria doble de la fig. 10 y de un patrón complementario, como es por ejemplo representado en la fig. 14. En este caso, la riqueza de codificación permanece tan elevada como con la máscara binaria doble de la fig. 10, como ilustra

la nueva función $F'(x'_0, y'_n, \lambda'_n)$ obtenida, igualmente representada en la fig. 14.

Otro ejemplo de máscara es representado en la fig. 15. Tal máscara corresponde con la máscara precedentemente representada cuyas columnas han sido mezcladas. Así, todas las columnas permanecen diferentes entre sí, lo que es una configuración preferida de máscara en el marco de la presente invención.

- 5 En efecto, puede considerarse una repetición de la columna, pero presenta el inconveniente de aumentar la ambigüedad lo que complica entonces el algoritmo de reconstrucción.

Finalmente, más generalmente, es también posible utilizar un patrón de codificación que no está organizado en líneas ni en columnas (por ejemplo un patrón de contenido cualquiera conocido). En este caso, la segmentación en canales espectrales no es inducida por el propio patrón de codificación, pero puede ser asegurada por el dispositivo de detección (por ejemplo una cámara multi-espectral) del sistema en el que es utilizado el dispositivo de codificación espectral de haces de luz.

En el marco de la utilización de la presente invención en el dominio de los escáneres tridimensionales llamados «de luz estructurada», un proyector de luz espectralmente estructurada que incluye un acoplamiento óptico entre una fuente de luz, por ejemplo tal como la descrita precedentemente, posicionada a la entrada del proyector y un sistema óptico de proyección configurado para proyectar la imagen producida sobre una escena a observar. Por ejemplo, en el caso de utilización de la máscara binaria doble de la fig. 10 y si el espectro de la luz que constituye el haz incidente es continuo sobre un rango de longitudes de onda entre al menos λ_{min} y λ_{max} , el patrón proyectado está constituido de una multitud de bandas luminosas espectralmente estructuradas cuyo índice de correlación entre las codificaciones espectrales de las diferentes bandas luminosas es suficientemente pequeño para poder distinguir fácilmente las bandas entre sí. Además, para un número de líneas «n» del patrón de base de la máscara doble (considerando que el espectro de la fuente luminosa empleada es continuo), el número de canales espectrales es igual a «n» y la imagen producida por el proyector es segmentada en 2^n bandas luminosas estructuradas. En la práctica, con tal máscara, para asegurar una precisión suficiente sobre el mapa de profundidad de la escena, el número n de líneas del patrón de base es de preferencia como mínimo de 4, o mejor de al menos 5, y ventajosamente superior o igual a 7, por ejemplo comprendido entre 7 y 14.

La fig. 16 presenta esquemáticamente la estructura de un proyector según un ejemplo de realización de la presente invención.

En este ejemplo, el proyector de luz espectralmente estructurada es representado según una vista desde arriba, por ejemplo como si estuviera colocado sobre una mesa óptica de laboratorio. El proyector estaría por tanto dispuesto horizontalmente.

El proyector incluye por ejemplo aquí en serie una fuente de luz 10, un sistema óptico de descomposición espectral 3, un dispositivo de codificación 5, un sistema óptico de nueva combinación espectral 8 y un sistema óptico de proyección 150.

La fuente de luz 10 incluye por ejemplo una lámpara incandescente, por ejemplo de la marca Osram (modelo ECL-669-BO, potencia 210 W).

Por comodidad, particularmente para hacer el proyector más compacto, el proyector incluye aquí un espejo plano de reenvío 20. Incluye además aquí un condensador óptico 30 para optimizar la cantidad de luz recogida de la fuente, y, de manera opcional, un diafragma 40 para facilitar los ajustes y/o para delimitar geoméricamente el haz. Aquí, el condensador 30 está configurado para concentrar la luz sobre el diafragma 40, que es por ejemplo metálico. Su abertura tiene por ejemplo aquí dimensiones de $10 \times 7,5 \text{ mm}^2$ (altura x anchura). Estos elementos son por supuesto opcionales e independientes en el sentido de que solamente una parte de ellos puede estar presente. Estos tres elementos presentes aquí están por ejemplo dispuestos en serie entre la fuente de luz 10 y el sistema óptico de descomposición espectral 3. La abertura rectangular del diafragma 40 permite materializar la sección $S_{haz-modelo}$ precedentemente descrita según un ejemplo de realización.

La lámpara de la fuente de luz 10 y el condensador 30 son por ejemplo los de un video-proyector de la marca ACER (marca registrada), modelo X1173a DLP.

El sistema óptico de descomposición espectral 3 incluye por ejemplo aquí un prisma 70. El prisma 70 está configurado aquí para dispersar espectral y angularmente el haz que lo alcanza.

El prisma 70 es por ejemplo de vidrio Crown LaK10 (Schott) y de ángulo de 60° . En el ejemplo de realización esquematizada en la fig. 16, su cara de entrada está orientada por ejemplo a 25° con relación al eje del haz incidente que lo alcanza.

Además, en el presente ejemplo de realización, el proyector incluye un objetivo 50, que incluye por ejemplo una lente convergente, y un espejo plano 60, dispuesto entre el diafragma 40 y el sistema óptico de descomposición espectral 3.

En el presente ejemplo, la imagen del diafragma 40 es formada en el infinito con la ayuda del objetivo 50. Por ejemplo el diafragma es posicionado en el foco objeto del objetivo 50. El espejo plano 60, que permite mejorar la compacidad del dispositivo, orienta a continuación el haz hacia el prisma 70. En este ejemplo, la normal del espejo está orientada aproximadamente a 26° con relación al eje del haz incidente.

- 5 Además, el proyector incluye un objetivo 80, aquí dispuesto entre el sistema óptico de descomposición espectral 3 y el dispositivo de codificación 5, que está configurado para focalizar la luz dispersada por el sistema óptico de descomposición espectral 3, en un plano dado donde es posicionado el dispositivo de codificación 5.

El plano mencionado anteriormente está por tanto por ejemplo localizado al nivel del foco de la imagen del objetivo 80.

- 10 Los objetivos 50 y 80 son posiblemente idénticos. Son por ejemplo del tipo Clairaut, de abertura numérica igual a $f/3$ y de distancia focal 150 mm.

El dispositivo de codificación multiplicativa 5, igualmente designado de manera ocasional aquí dispositivo de codificación multiplicativa, puede funcionar en reflexión o en transmisión. Aquí, funciona en reflexión. Esto permite por ejemplo hacer el dispositivo más compacto.

- 15 El dispositivo de codificación 5 incluye una máscara 90 que está por ejemplo formada aquí por una célula DMD. La célula DMD es por ejemplo una célula DMD de marca Texas-Instrument, de dimensión del campo óptico útil altura x anchura de $10 \times 15 \text{ mm}^2$, y de resolución SVGA 800×600 .

- 20 La célula DMD es posicionada perpendicularmente al eje medio del haz incidente y orientada de manera a que su altura h (10 mm) sea paralela a la longitud (aproximadamente 10 mm) de la imagen del diafragma sobre la célula DMD y que su anchura (15 mm) sea orientada según la dirección unida a la dispersión espectral de la fuente luminosa.

- 25 La máscara 90 utilizada es una máscara llamada «doble», tal como se ha descrito precedentemente, cuya repetición se efectúa según la dirección unida a la dirección de dispersión espectral, es decir según la dirección horizontal transversal al haz incidente en este ejemplo de realización. Dicho de otro modo, en este ejemplo de realización las «líneas» de la máscara 90 se suceden según la dirección horizontal mientras que las «columnas» de la máscara se suceden según la dirección vertical.

La máscara 90 está configurada además de manera que su anchura ($2 \cdot L$), es decir su dimensión tomada según la dispersión del haz, es igual al doble de la anchura L del diafragma 40 mientras que su altura es igual a la del diafragma 40.

- 30 A título de ejemplo, la máscara 90 representada en la izquierda de la fig. 16 es una máscara doble y binaria, es decir negra (que absorbe la luz) o blanca (que refleja la luz en caso de funcionamiento en reflexión) según la zona (lo que corresponde aquí respectivamente con el valor mínimo o máximo de la gama de los valores de pilotaje de la célula DMD).

- 35 En el marco de la utilización de una célula DMD, este patrón de codificación doble es por ejemplo la imagen presentada en la célula DMD mediante un ordenador conectado al proyector.

- 40 Esta máscara incluye un patrón formado de una serie de $2 \cdot n$ líneas con $n=7$, y que incluye $m=2^7=128$ columnas. En otros términos, la codificación es efectuada así sobre $n=7$ canales espectrales contiguos, llamados C_1 a C_7 , que se extienden a título de ejemplo aquí de $\lambda_{\min}=400 \text{ nm}$ a $\lambda_{\max}=680 \text{ nm}$, lo que permite codificar espectralmente $2^7=128$ bandas luminosas horizontales. Además, teniendo en cuenta la posible no linealidad del ángulo de desviación del prisma 70 utilizado aquí en función de la longitud de onda, los canales espectrales mencionados anteriormente C_1 a C_7 pueden diferir en anchura espectral: los rangos espectrales (en nm) de los canales espectrales C_1 a C_7 son por ejemplo aquí [400-419], [419-442], [442-470], [470-504], [504-547], [547-603] y [603-680] respectivamente.

- 45 Las líneas $n^{\circ}1$ a $n^{\circ}7$, que corresponden a la mitad izquierda de la máscara representada en la fig. 16 que forma un primer sub-patrón, serían entonces iluminadas por el haz de longitud de onda λ_{\min} , mientras que las líneas $n^{\circ}8$ a $n^{\circ}14$, que corresponden a la mitad derecha de la máscara representada en la fig. 16 que forma un segundo sub-patrón, serían entonces iluminadas por el haz de longitud de onda λ_{\max} . Así, la demarcación d_r entre las líneas $n^{\circ}7$ y $n^{\circ}8$, visualizada por una línea mixta, serían superpuestas en la frontera entre los haces de longitud de onda λ_{\min} y λ_{\max} .

- 50 Se observa además aquí que las líneas del primer sub-patrón se han mezclado, en el sentido en que no se suceden según el orden de potencias de 2, están por ejemplo dispuestas en el orden siguiente: 2^2 , 2^4 , 2^6 , 2^7 , 2^5 , 2^3 , 2^1 . En efecto, el patrón de base (mitad izquierda o mitad derecha del patrón de codificación doble representado en la fig. 16 ya que en este ejemplo los dos sub-patrones son idénticos) corresponde con la máscara binaria canónica de grado 7, como se ha explicado precedentemente. Como se ha representado en esta figura, el patrón canónico de base de la máscara binaria doble no tiene necesariamente la necesidad de estar organizado por valores crecientes como en el caso de las figs. 9 a 14: cualquier permutación en la línea y en la columna en este patrón de base no

- 55

reduce la riqueza de la codificación espectral.

Por otra parte, siendo el segundo sub-patrón aquí idéntico al primer sub-patrón, incluye por tanto la misma combinación de líneas.

Así en este ejemplo de realización de la máscara, todas las columnas son diferentes entre sí.

- 5 Con la regulación seleccionada de los micro-espejos de la célula DMD en el presente ejemplo de realización, el haz óptico se refleja en una dirección no coplanaria con el plano del esquema (el haz se dirige un poco hacia abajo). El ángulo entre el eje medio del haz incidente y la proyección horizontal del haz reflejado es de aproximadamente 16°.

10 Aquí, particularmente para compensar el componente angular vertical inducido durante la reflexión del haz sobre la célula DMD con el fin de volver a llevar el haz en un plano horizontal, el proyector incluye un espejo plano 100. Por ejemplo, el ángulo entre las proyecciones horizontales de la normal al espejo plano 100 y del eje medio del haz incidente proveniente del dispositivo de codificación multiplicativa 5 es de aproximadamente 29°.

15 A la salida del dispositivo de codificación 5, el proyector incluye el sistema óptico de nueva combinación espectral 8. El sistema óptico de nueva combinación espectral 8 está configurado para volver a combinar en un haz combinado de nuevo el espectro descompuesto espectralmente y codificado por el dispositivo de codificación 5. Incluye por ejemplo aquí un prisma 130.

20 Además, en el presente ejemplo de realización, el proyector incluye en serie un objetivo 110, el prisma 130 del sistema óptico de nueva combinación espectral 8, un espejo plano 120 y un objetivo 140 que son respectivamente idénticos a los elementos 80, 3, 60 y 50 dispuestos en orden inverso. Es decir, por ejemplo, que los objetivos 110 y 80 son idénticos, el prisma 130 es idéntico al prisma 70 y su cara de entrada está orientada a 25° con relación al eje medio del haz incidente que proviene del objetivo 110, el espejo plano 120, cuya normal está orientada a aproximadamente 47° con relación al eje medio del haz incidente proveniente del prisma 130, es idéntico al espejo plano 60, y el objetivo 140 es idéntico al objetivo 50. El plano donde es posicionada la máscara 90 está localizado al nivel del foco objeto del objetivo 110.

25 En este ejemplo de realización, los elementos 100, 110, 8, 120 y 140 permiten así por una parte volver a combinar la luz dispersada por los elementos 50, 60, 3 y 80 y codificada por el dispositivo de codificación multiplicativa 5, y por otra parte formar una imagen intermedia 40' del diafragma 40 en una posición determinada limitando un volumen del proyector.

30 La imagen 40' obtenida tiene entonces aquí las siguientes propiedades: sus dimensiones son de 10 x 7,5 mm² y está segmentada en 2⁷ bandas horizontales luminosas espectralmente estructuradas. La estructuración espectral es tal que sea cual sea la sección (fina) vertical considerada de esta imagen, está compuesta de 2⁷ elementos/píxeles estructurados de codificaciones espectrales diferentes entre sí.

La imagen intermedia 40' es finalmente proyectada sobre la escena a estudiar con la ayuda del sistema óptico de proyección 150. El sistema óptico de proyección 150 incluye por ejemplo un objetivo cuya distancia focal es de aproximadamente 30 mm.

- 35 En el ejemplo de realización de la fig. 16, el campo proyectado obtenido mide entonces aproximadamente 100 x 75 cm² (altura x anchura) a 3 metros de distancia del objetivo 150.

40 Finalmente, las distancias focales de las ópticas 50, 80, 110 y 140, las dimensiones del diafragma 40, el poder de dispersión angular del sistema de dispersión 3 y las dimensiones del campo óptico de la máscara son elegidos de manera coherente. En este ejemplo, los diferentes elementos citados anteriormente han sido por ejemplo definidos de la siguiente manera:

- La célula DMD y los prismas han sido fijados a priori por su facilidad de utilización, su comodidad y su disponibilidad.

45 - Para que el aumento óptico entre la posición del diafragma 40 y la máscara 90 sea unitario (por simplicidad, aunque no es obligatorio), las ópticas 50, 80, 110 y 140 son idénticas: en consecuencia, en la dirección perpendicular a la dirección asociada con la dispersión espectral (es decir aquí en la dirección vertical), la dimensión del diafragma es fijada a 10 mm para que su imagen se adapte exactamente a una de las dimensiones de la máscara 90, o bien aquí la altura, o bien 10 mm, de la célula DMD.

- La otra dimensión del diafragma ha sido fijada a la mitad de la longitud (15 mm) del campo óptico de la máscara 90, ya sea aquí 7,5 mm en el caso de la célula DMD.

50 - En la dirección asociada con la dispersión espectral, la elección de la distancia focal de las ópticas 50, 80, 110 y 140 está unida al poder de dispersión angular del sistema óptico de descomposición espectral, como ocurre en el caso del prisma 70 utilizado. El valor de la distancia focal es calculado de manera que la imagen de una hendidura infinitamente fina que será colocada en el emplazamiento del diafragma (y orientada perpendicularmente a la dirección asociada con la dispersión espectral, es decir verticalmente) cubriría, después de la dispersión en

longitudes de onda, la mitad de la anchura (15 mm) del campo óptico de la máscara, aquí de la célula DMD, o bien 7,5 mm. La gama de las longitudes de onda considerada a título de ejemplo para este cálculo se extiende aquí de $\lambda_{\min}= 400$ nm a $\lambda_{\max}= 680$ nm. Teniendo en cuenta el aumento óptico unitario entre la posición del diafragma y la máscara y la extensión de la dispersión espectral inducida a la posición de la máscara, la figura luminosa (visible para el ojo) obtenida sobre la máscara cubrirá por tanto el conjunto del campo óptico útil de este último (ya sea 10×15 mm² en el caso de la célula DMD utilizada aquí). Por consiguiente, en este ejemplo, las «trazas» $S_{\lambda_{\min}}$ y $S_{\lambda_{\max}}$ de los haces extremos $F_{\lambda_{\min}}$ y $F_{\lambda_{\max}}$ están yuxtapuestas en el plano del dispositivo de codificación multiplicativa 5.

Este ejemplo de realización ilustra la configuración preferida de la invención: el patrón de codificación del dispositivo de codificación multiplicativa 5 es binario y el sistema óptico de nueva combinación espectral 8 vuelve a combinar espectralmente el haz de luz compensando totalmente la separación geométrica de los rayos incidentes dependientes de la longitud de onda que ha sido introducida por el sistema óptico de descomposición espectral 3.

La fig. 17 representa esquemáticamente un escáner tridimensional de luz estructurada según un ejemplo de realización de la presente invención. Incluye un proyector, posicionado aquí en el lado derecho, y un dispositivo de detección, posicionado aquí en el lado izquierdo, a una distancia b_s del proyector, llamada «base estereoscópica».

Para la adquisición, el dispositivo de detección utilizado es aquí por ejemplo una cámara hiper-espectral de marca SPECIM con un espejo giratorio (modelo Kappa DX4 PS); incluye 256 píxeles (las columnas de la imagen) \times 512 píxeles (las líneas de la imagen). La cámara es por ejemplo posicionada encima del proyector, estando entonces el eje de proyección del proyector y el del objetivo de la cámara en un mismo plano vertical, pero por supuesto, podrían estar dispuestos uno al lado del otro. La base estereoscópica (la distancia b_s) es entonces vertical y, aquí, por ejemplo igual a 10 cm. Una opción interesante es por ejemplo efectuar la adquisición sobre los 7 canales espectrales C_1 a C_7 con el fin de respetar la segmentación en longitud de onda inducida por la geometría de la máscara utilizada.

Sin embargo, para ilustrar el hecho de que la segmentación en longitud de onda puede ser fijada por el dispositivo de detección del escáner en el cual es utilizado el dispositivo de codificación espectral de los haces de luz (particularmente cuando la máscara no está organizada en línea y en columnas), la adquisición ha sido efectuada sobre 7 canales espectrales contiguos, llamados C'_1 a C'_7 , de anchuras espectrales idénticas (40 nm) y que se extiende desde $\lambda_{\min}= 400$ nm hasta $\lambda_{\max}= 680$ nm que son representados en la fig. 18 en referencia al ejemplo detallado a continuación.

Las medidas de evaluación se han efectuado en una sala de aproximadamente 4×5 m², iluminados por una iluminación de techo distribuida de manera uniforme de tipo alojén a y de aproximadamente 600 W de potencia total. Una gran hoja de papel blanco, pegada sobre un soporte rígido para formar una pantalla plana y un objeto metálico cubierto de una pintura beige mate y cuyas dimensiones eran de aproximadamente $20 \times 20 \times 20$ cm³ (se trataba en este caso del bastidor de una fuente de luminosa de laboratorio) fueron sucesivamente utilizados para realizar las pruebas de evaluación. Estaban posicionados a una distancia de aproximadamente 1.5 m de la cámara.

Algunas imágenes de la pantalla blanca (fig. 18c) y del objeto metálico (fig. 18d) obtenidas con la cámara hiper-espectral son proporcionadas en la fig. 18 (canales de adquisición C'_1 a C'_5 únicamente con objeto de simplificación). En este ejemplo, el campo de la cámara es inferior al campo del proyector. En estas imágenes, el desplazamiento de la cámara y el nivel de la señal unidos a la iluminación ambiente han sido restados. Además, el efecto del lóbulo del haz proyectado, es decir la no uniformidad espacial de su flujo, ha sido corregido: la imagen del lóbulo aparente observado por la cámara se obtiene proyectando sobre la pantalla plana un haz incidente no codificado, es decir por ejemplo utilizando la célula DMD como un espejo plano sin ocultar (incluso parcialmente) algunos rayos. El patrón de codificación doble utilizado es representado en la fig. 18a (que es la de base canónica 7 descrita en relación con la fig. 16). La rotación del patrón, con relación a la dirección horizontal de la figura, está destinada a reproducir la rotación inducida por la configuración óptica de adquisición de la cámara hiper-espectral: las «columnas» del sensor de la cámara no eran verticales en las pruebas puestas en práctica. Se constata, para cada canal de adquisición C'_1 a C'_5 , observando la zona encuadrada del patrón de codificación (representado en la fig. 18b) y las dos imágenes correspondientes (figs. 18c y 18d) que se puede poner en evidencia la zona «útil» de la máscara que ha codificado efectivamente el haz de luz en el campo observado por la cámara. Dicho de otra manera, se trata de partes de la máscara efectivamente «vistas» por los diferentes canales espectrales. Estas zonas de la máscara son sometidas a convolución por una imagen borrosa que es inducida por la anchura espectral (aquí 40 nm a título de ejemplo) de los canales espectrales de la cámara. Esta imagen borrosa es similar a una imagen borrosa de movimiento según la dirección asociada a la dirección espectral ya que un desplazamiento en longitud de onda conduce un desplazamiento geométrico de la zona de la máscara proyectada como muestra la fig. 5c (pero también la fig. 10). Es también posible observar deformaciones geométricas notables de estas zonas de las máscaras (presencia de una trama en forma de líneas horizontales) sobre las imágenes de la pantalla plana: son principalmente debidas a los defectos de uniformidad espacial introducidos por la motorización del espejo giratorio de la cámara hiper-espectral utilizada (se trata de un modelo bastante antiguo). Finalmente, la deformación de la figura proyectada con el relieve se observa fácilmente comparando las imágenes obtenidas con el objeto metálico (fig. 18d) y las obtenidas con la pantalla plana (fig. 18c).

REIVINDICACIONES

- 1.- Un proyector de luz estructurada que comprende sucesivamente:
- una fuente de luz (10) configurada para emitir un haz de un espectro continuo entre una longitud de onda mínima (λ_{min}) y una longitud de onda máxima (λ_{max}),
- 5
- un sistema óptico de descomposición espectral (3), configurado para captar el espectro del haz emitido por la fuente y descomponerlo espectralmente con una imagen del haz en la longitud de onda mínima (λ_{min}) contigua a una imagen del haz en la longitud de onda máxima (λ_{max}) en al menos un plano predeterminado transversal a un camino óptico del haz y a lo largo de una línea de este plano que constituye una frontera,
 - un dispositivo de codificación (5) configurado para codificar el espectro descompuesto espectralmente,
- 10
- incluyendo el dispositivo de codificación una máscara (51, 90),
estando posicionada la máscara (51, 90) en el plano de predeterminado, e
incluyendo la máscara (51, 90) un patrón matricial de codificación binaria formado de una serie de 2^n líneas y de una serie de m columnas, donde « n » es igual o superior a 4, y donde « m » es igual o superior a 16,
estando superpuesta una demarcación entre las líneas « n » y « $n+1$ » a dicha frontera,
- 15
- estando iluminado un sub-patrón definido por las líneas «1» a « n » por la imagen del haz en la longitud de onda λ_{min} y estando iluminado un sub-patrón definido por las líneas « $n+1$ » a « 2^n » por la imagen del haz en la longitud de onda λ_{max} ,
siendo el sub-patrón definido por las líneas «1» a « n » idéntico o complementario del sub-patrón definido por las líneas « $n+1$ » a « 2^n », y
- 20
- estando iluminado un sub-patrón definido por las líneas « i » a « $i+n-1$ », estando i comprendido entre 2 y n , por una imagen del haz en una longitud de onda λ dada comprendida entre λ_{min} y λ_{max} ,
siendo las m columnas perpendiculares a esta demarcación e incluyendo cada una de las dos columnas vecinas una codificación binaria diferente de la otra,
- 25
- un sistema óptico de nueva combinación espectral (8) configurado para volver a combinar en un haz combinado de nuevo el espectro descompuesto espectralmente y codificado, y
 - un sistema óptico de proyección (150) configurado para proyectar el haz combinado de nuevo sobre una escena a observar.
- 2.- Un proyector según la reivindicación 1 en el cual la máscara (51, 90) incluye al menos $m/5$ codificaciones diferentes en las m columnas.
- 30
- 3.- Un proyector de según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2 en el cual una codificación es repetida en un máximo de 5 columnas.
- 4.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 en el cual las m columnas del sub-patrón definido por las líneas «1» a « n » incluyen un máximo de 5 repeticiones de una misma secuencia de codificaciones diferentes entre sí.
- 35
- 5.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en el cual las m columnas del sub-patrón definido por las líneas «1» a « n » incluyen codificaciones todas diferentes entre sí.
- 6.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 en el cual el número de columnas « m » es igual a « 2^n ».
- 7.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 en el cual las líneas del sub-patrón definido por las líneas «1» a « n » incluyen codificaciones que representan una sucesión de potencias de 2.
- 40
- 8.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 en el cual la fuente de luz (10) incluye una fuente de luz natural o una fuente de luz artificial, por ejemplo una fuente de luz artificial continua, por ejemplo una lámpara de filamento o incandescente, una lámpara halógena, un LED.
- 9.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 en el cual el dispositivo de codificación (5) incluye una disposición matricial de zonas reflectantes y de zonas absorbentes.
- 45
- 10.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 en el cual el dispositivo de codificación (5) incluye una disposición matricial de zonas transparentes y de zonas opacas.

- 11.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 o 10 en el cual el dispositivo de codificación (5) incluye un sistema opto-electrónico constituido de píxeles cuya transparencia óptica se puede pilotar electrónicamente, estando formada la máscara (51, 90) por el sistema opto-electrónico.
- 5 12.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9 en el cual el dispositivo de codificación (5) incluye un sistema opto-electrónico constituido de píxeles cuya reflectancia óptica se puede pilotar electrónicamente, estando formada la máscara (51, 90) por el sistema opto-electrónico.
- 13.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 en el cual el sistema óptico de descomposición espectral (3) incluye un prisma óptico (70) o una red óptica.
- 10 14.- Un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13 en el cual el sistema óptico de nueva combinación espectral (8) incluye un prisma óptico (130) o una red óptica.
- 15.- Un escáner tridimensional de luz estructurada que incluye un proyector y un dispositivo de detección, caracterizado por que el proyector es un proyector según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 y por que el dispositivo de detección es una cámara multi-espectral que incluye al menos 4 canales espectrales, estando dispuesta la cámara a una distancia determinada del proyector, llamada «base estereoscópica».
- 15 16.- Un escáner tridimensional de luz estructurada según la reivindicación 15, caracterizado por que incluye una fuente de luz secundaria que se puede pilotar electrónicamente y cuyo espectro es continuo entre la longitud de onda mínima (λ_{\min}) y la longitud de onda máxima (λ_{\max}).

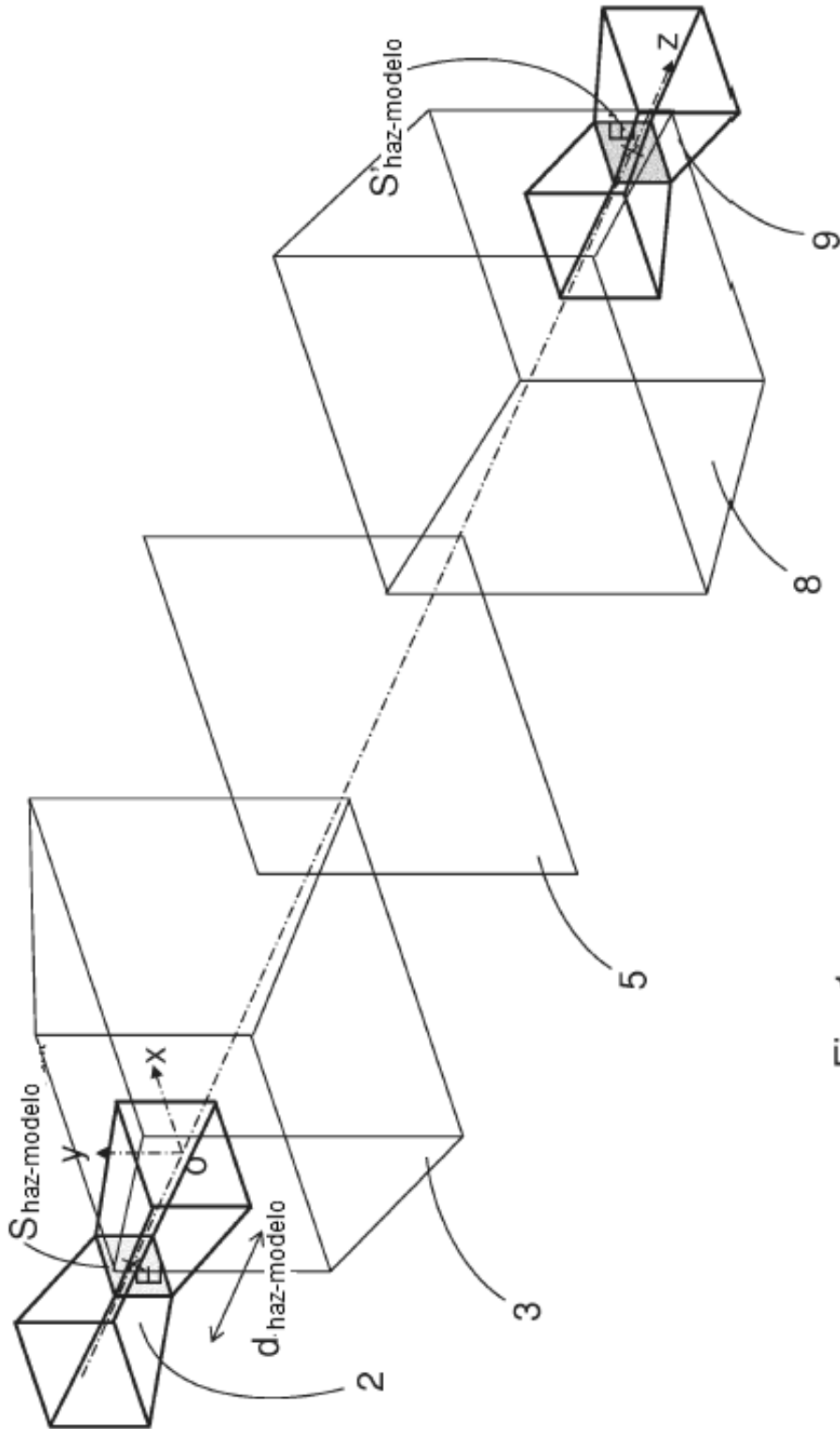


Fig. 1

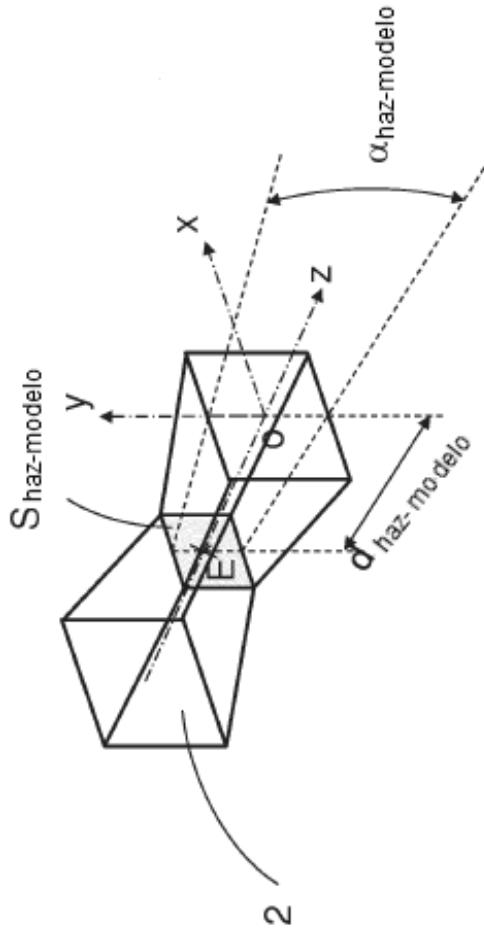


Fig. 2a

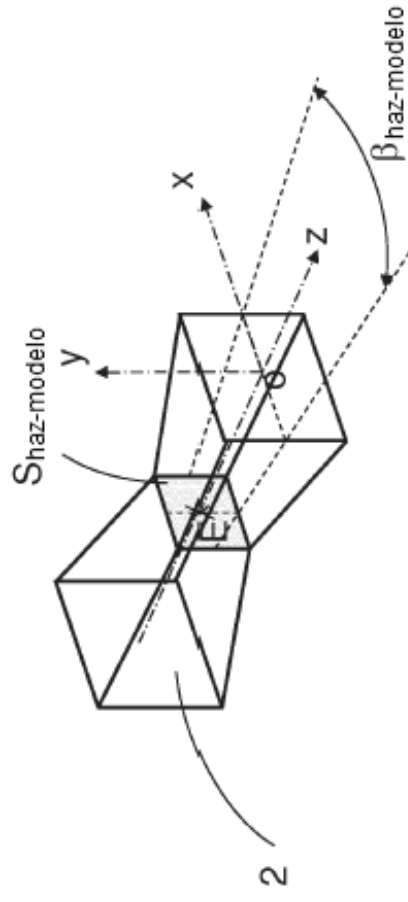


Fig. 2b

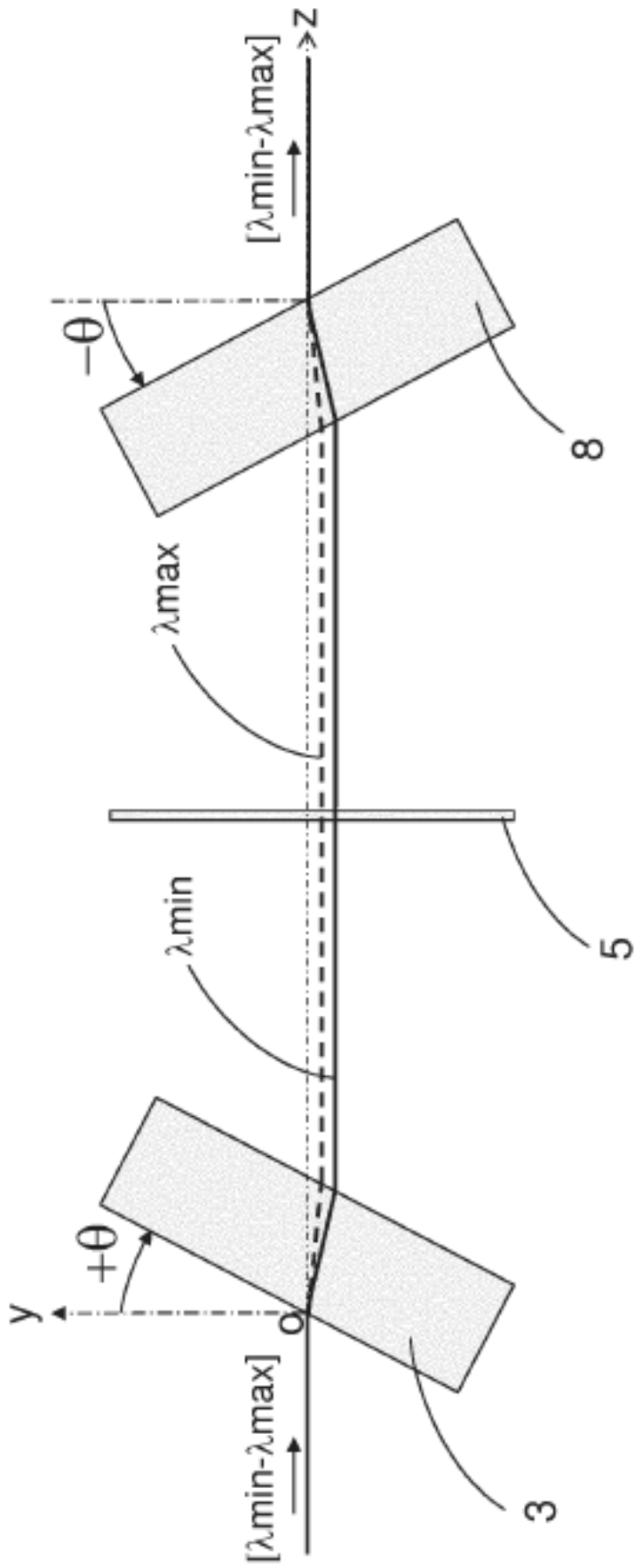


Fig. 3

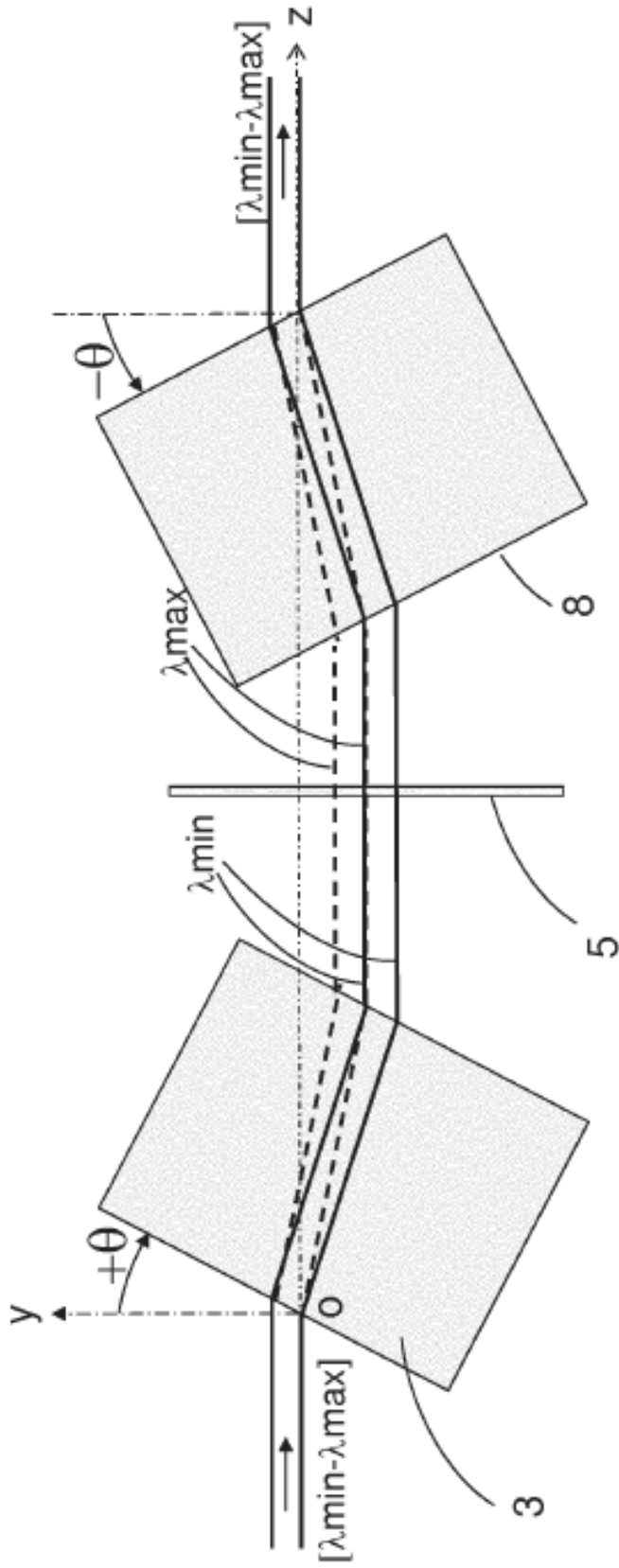


Fig. 4

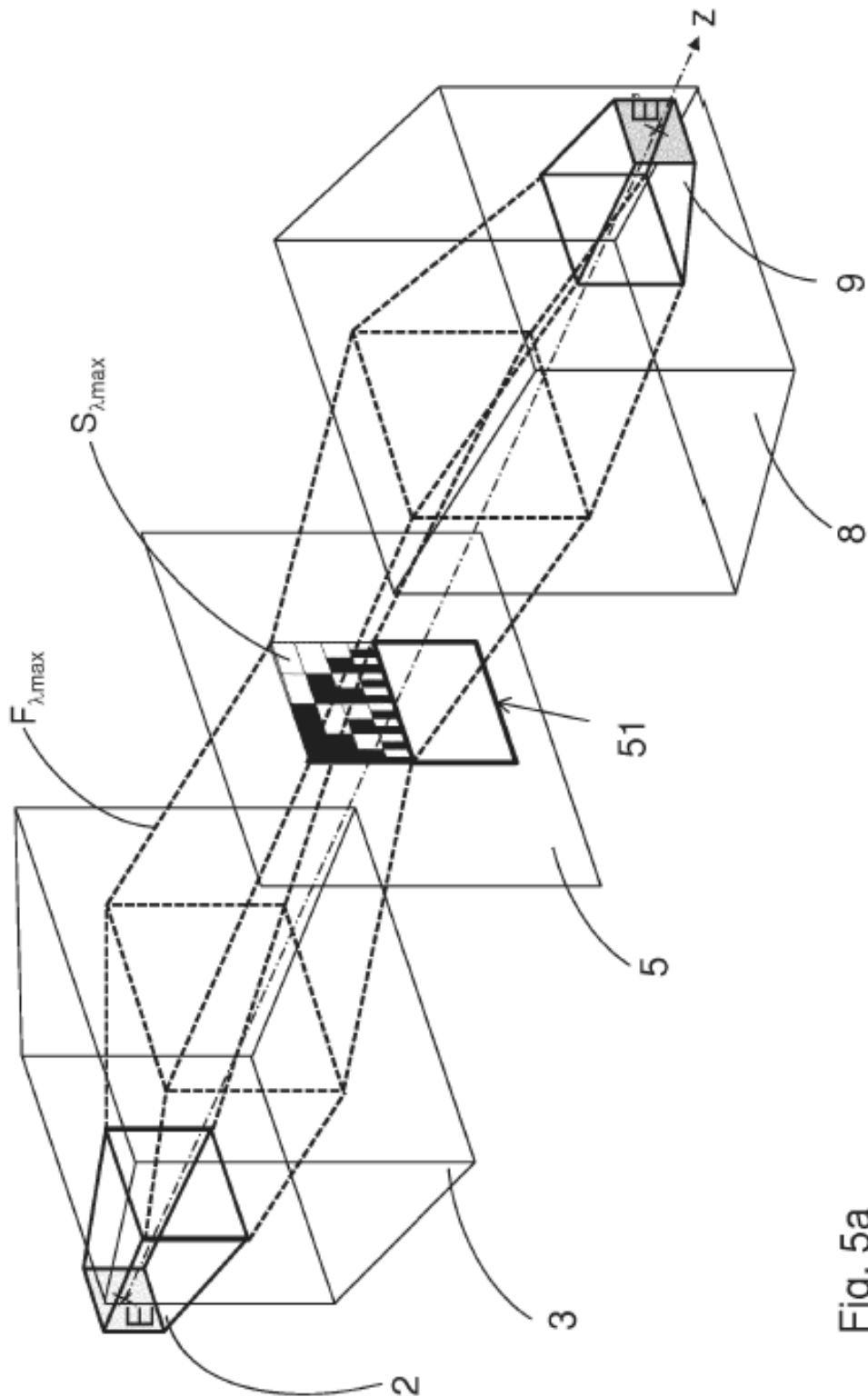


Fig. 5a

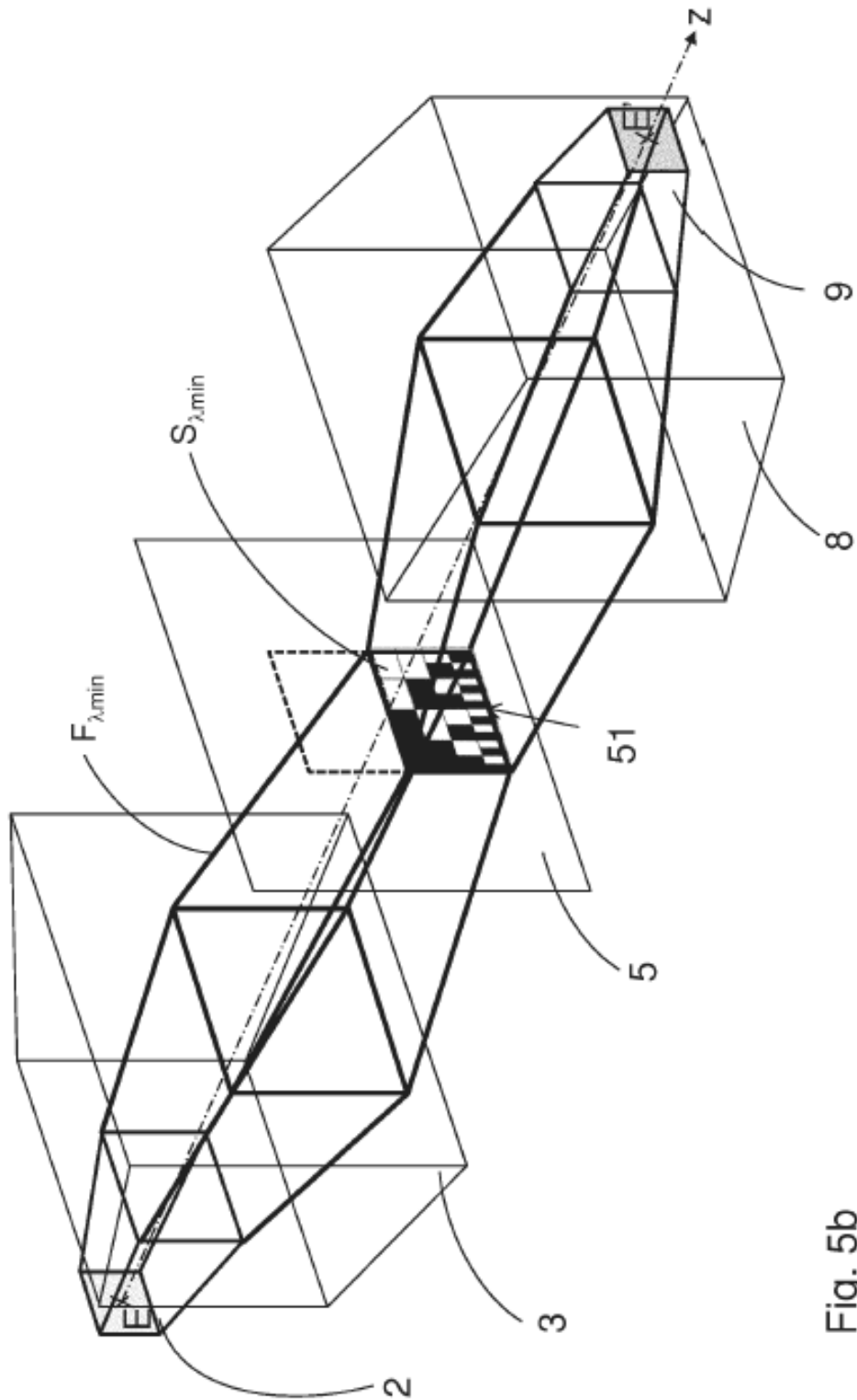


Fig. 5b

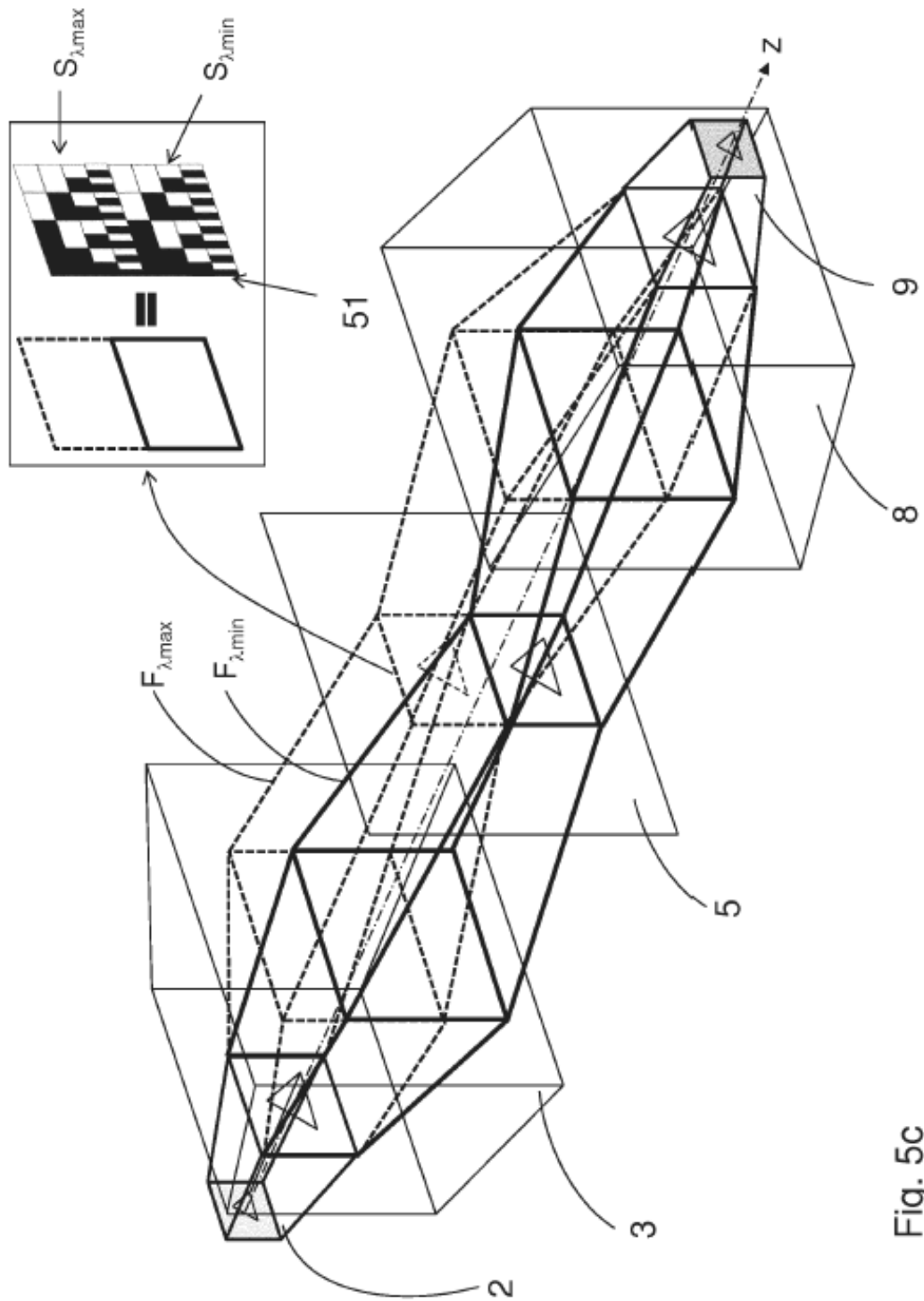


Fig. 5c

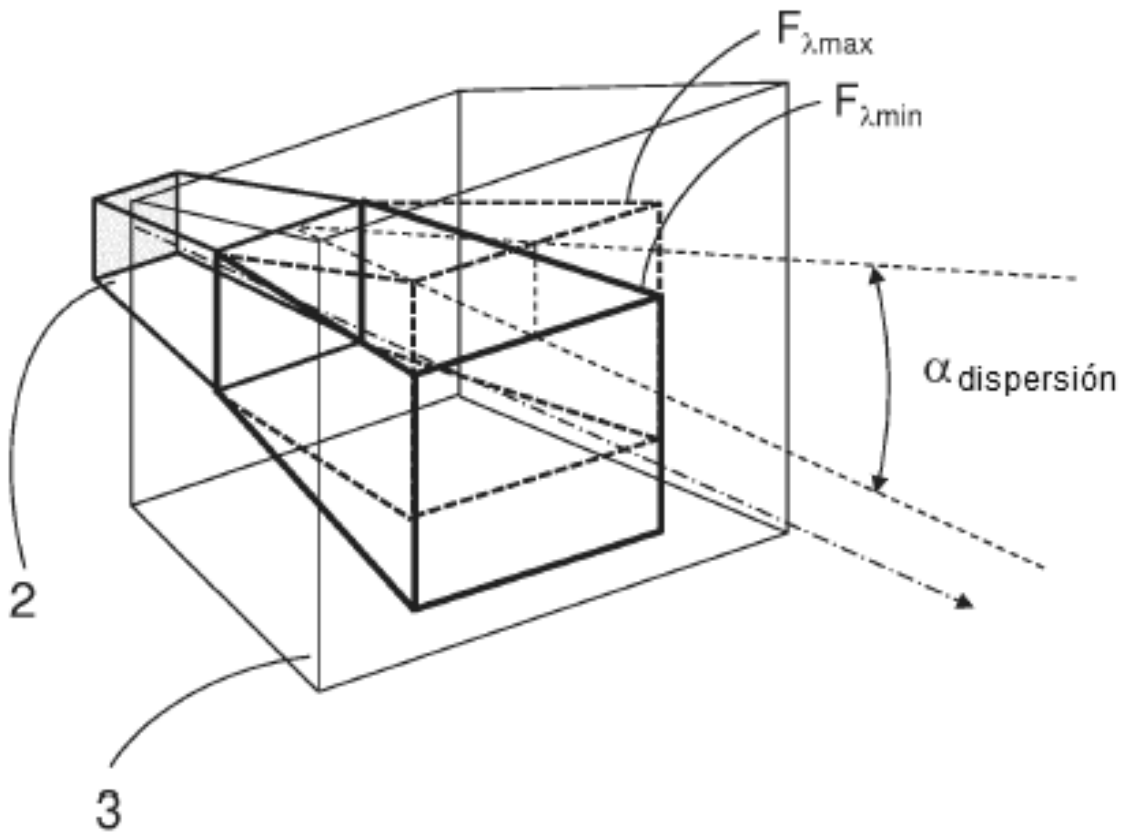


Fig. 6

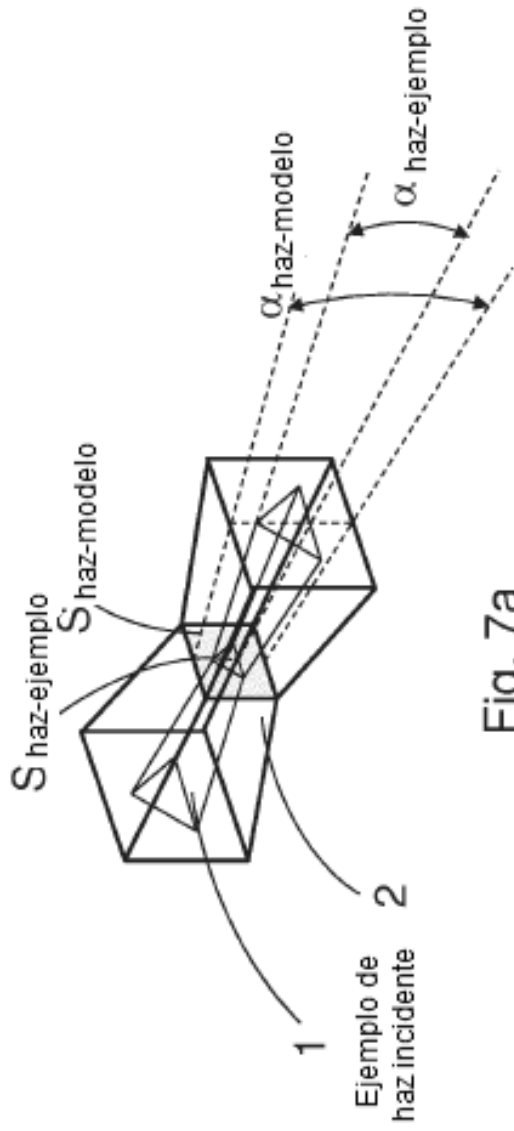


Fig. 7a

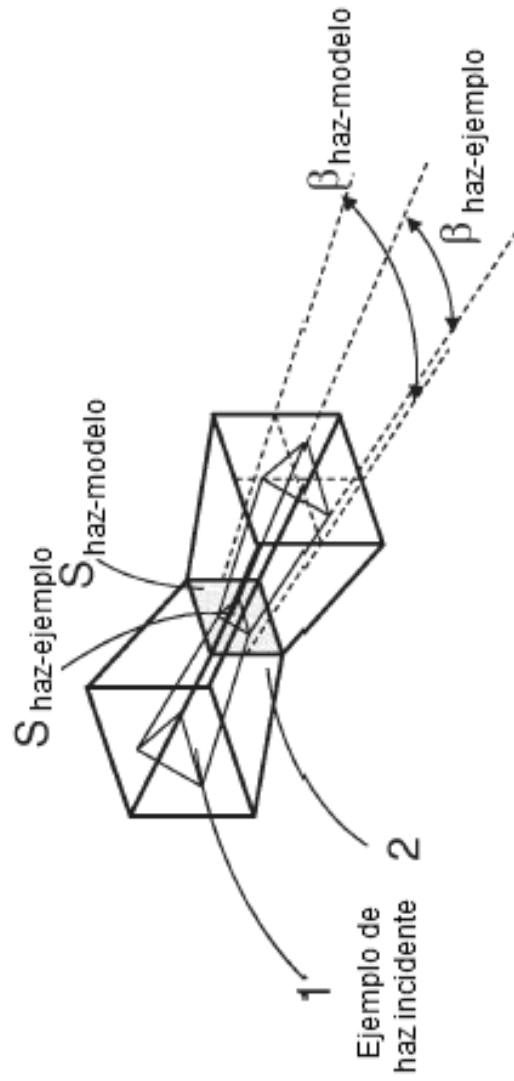


Fig. 7b

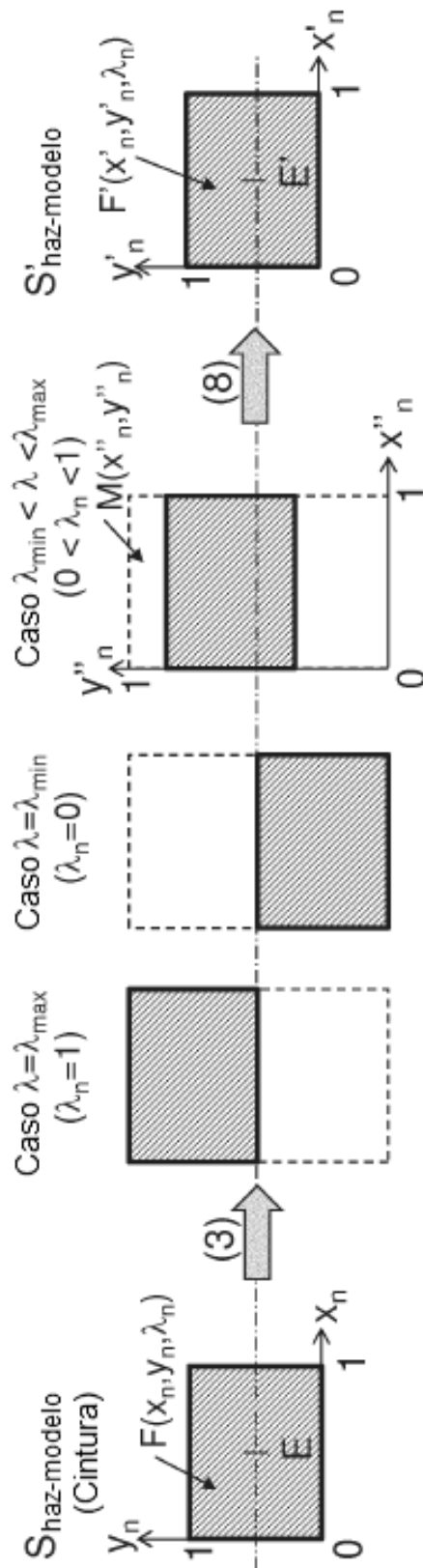


Fig. 8

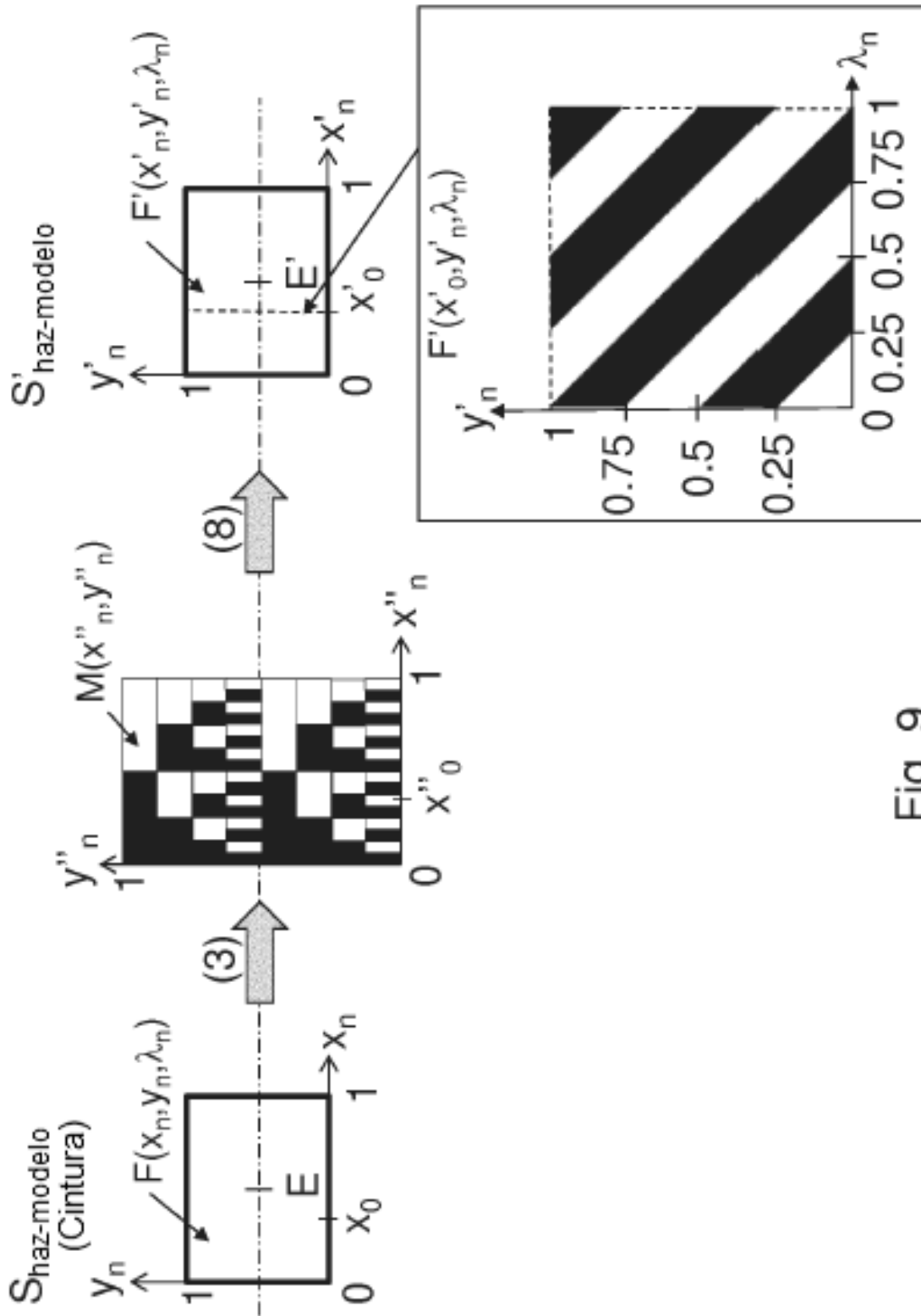


Fig. 9

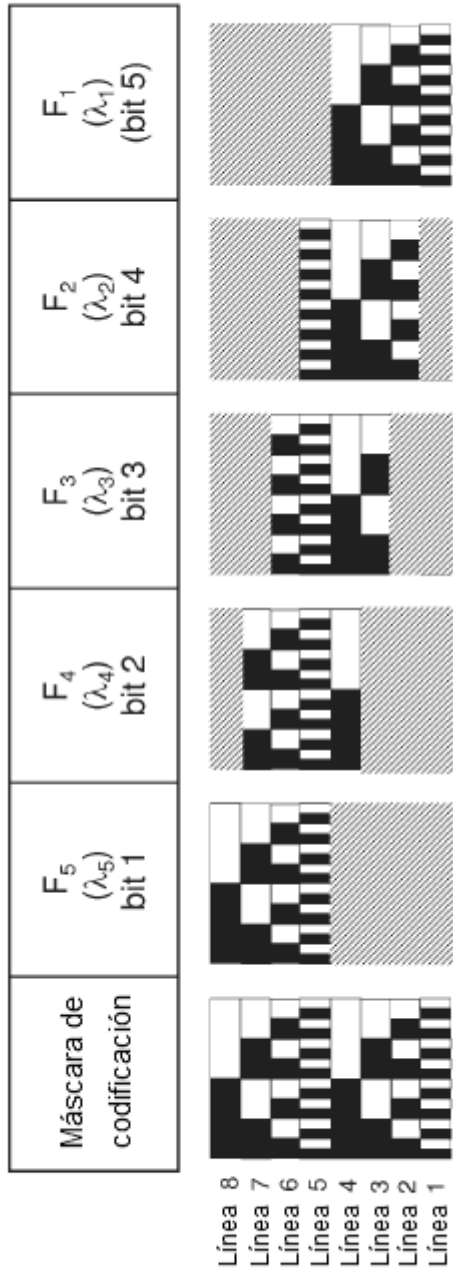


Fig. 10

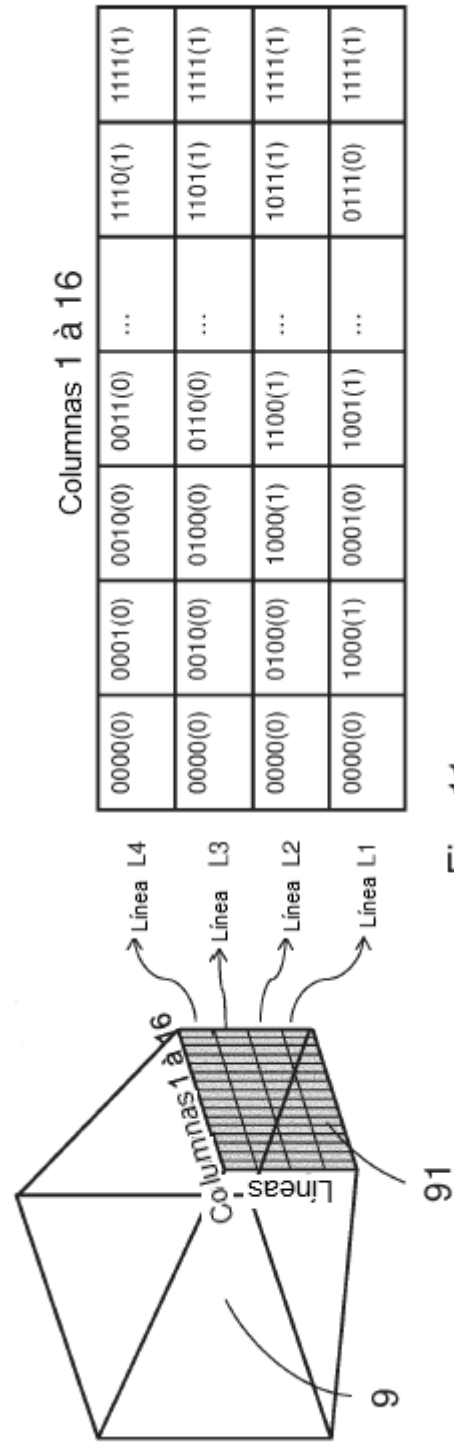


Fig. 11

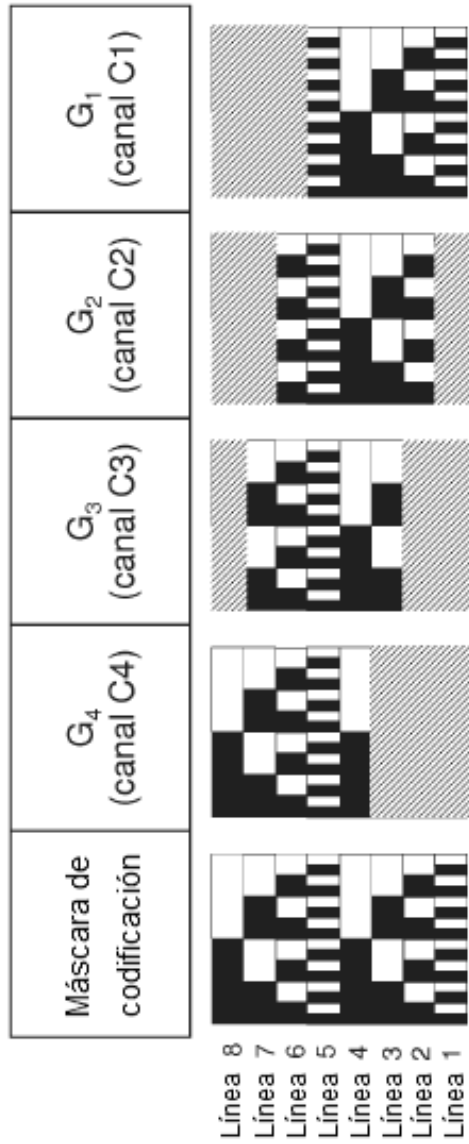


Fig. 12

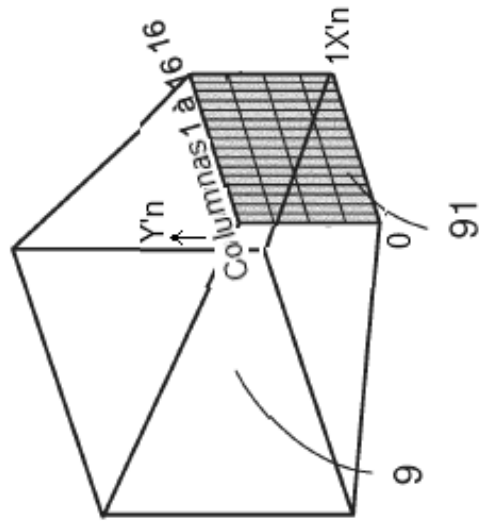


Fig. 13

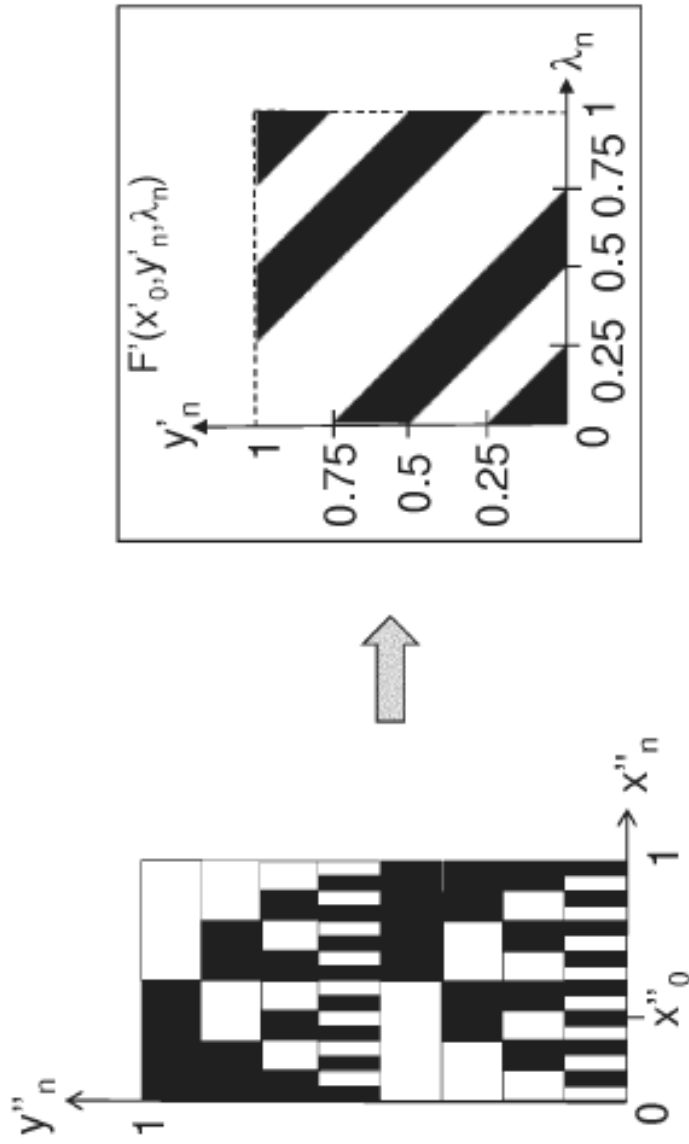


Fig. 14

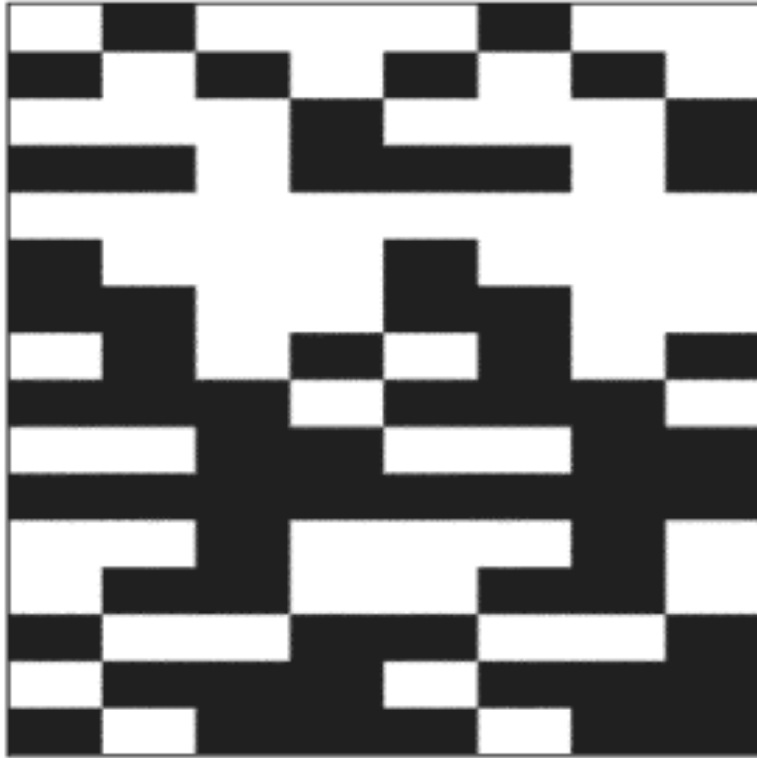


Fig. 15

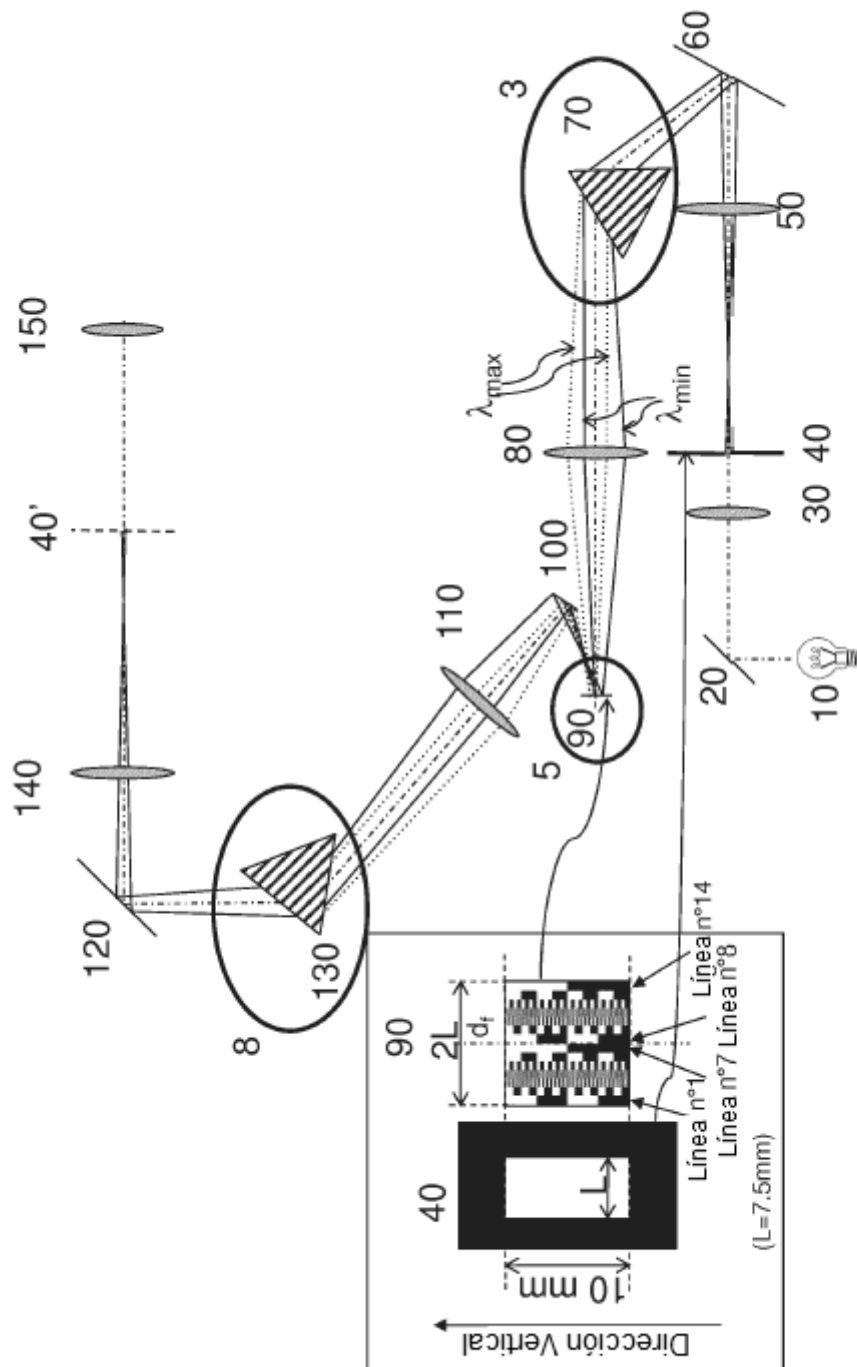


Fig. 16

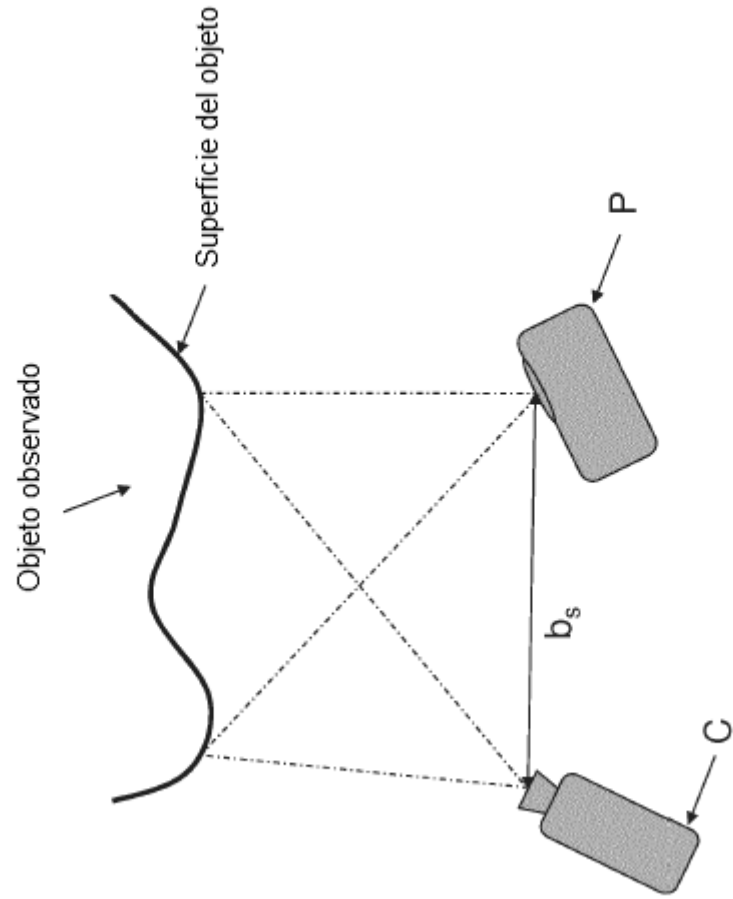


Fig. 17

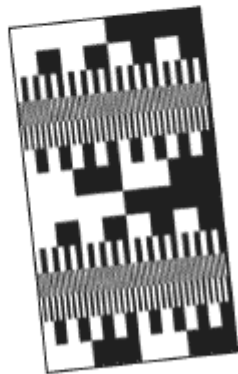
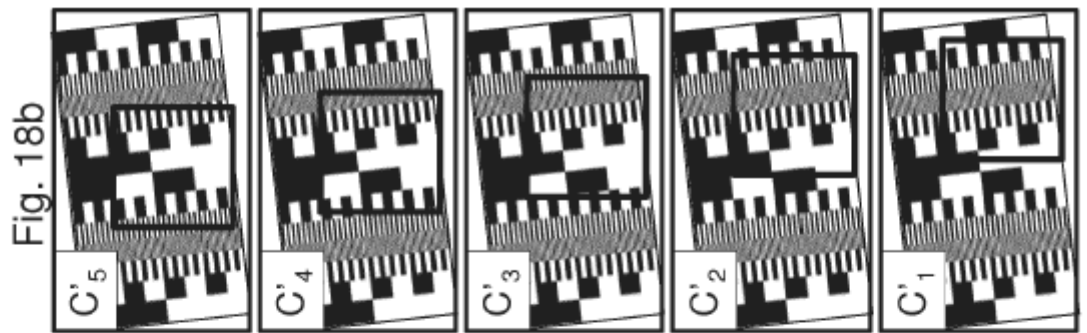
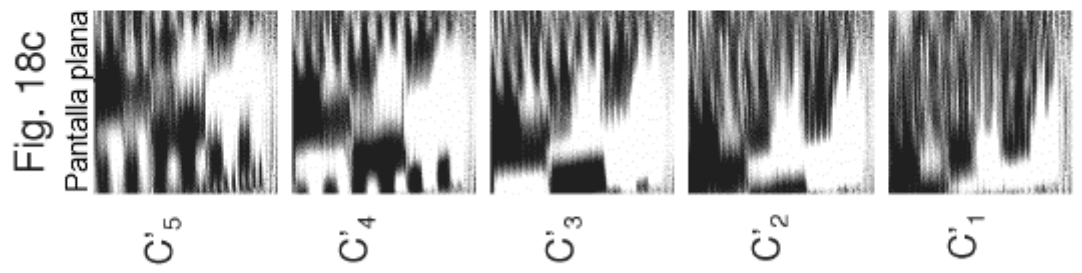
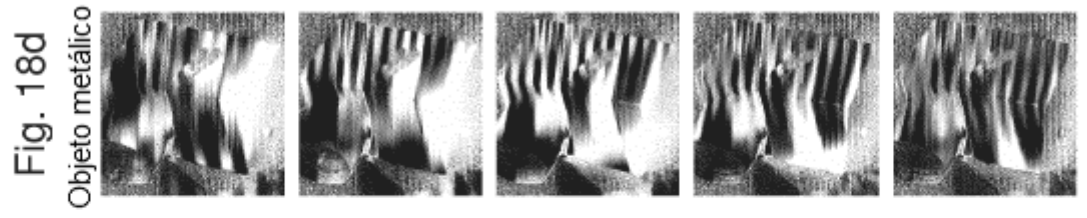


Fig. 18a

Fig. 18