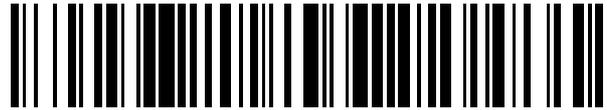


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 633 975**

51 Int. Cl.:

**H04N 5/335** (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.03.2014** E 14160933 (9)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.06.2017** EP 2800354

54 Título: **Adquisición y procesamiento de imagen de escaneo de línea 3D para visión artificial**

30 Prioridad:

**20.03.2013 US 201313847939**

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

**26.09.2017**

73 Titular/es:

**COGNEX CORPORATION (100.0%)  
One Vision Drive  
Natick, MA 01760-2059, US**

72 Inventor/es:

**JOHN, MCGARRY**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 633 975 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**

Adquisición y procesamiento de imagen de escaneo de línea 3D para visión artificial

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere en general a la visión artificial y, más en concreto, a sistemas de visión artificial para detectar información detallada de una escena iluminada mediante un plano de luz.

Antecedentes de la invención

10 Un método bien conocido para adquirir imágenes de rango 3D incluye las etapas de: proporcionar una fuente de luz con óptica de generación de líneas para iluminar un solo plano de una escena, colocar una cámara digital para ver el plano de luz de manera que los objetos iluminados por la fuente de luz aparezcan en la imagen óptica formada por la lente de la cámara, capturar una imagen digital de la escena, procesar la imagen digital para extraer las coordenadas de imagen de puntos en la escena iluminada por la fuente de luz y procesar las coordenadas de imagen de acuerdo con la geometría de triangulación del sistema óptico para formar un conjunto de coordenadas físicas adecuadas para la medición de objetos en la escena.

15 Una limitación importante asociada a tal proceso de visión artificial convencional es que una imagen de intensidad bidimensional de tamaño sustancial debe ser capturada por la cámara digital para cada una y todas las líneas de coordenadas físicas formadas por el sistema. Esto puede hacer que el tiempo de captura de la imagen 3D de una escena sea de hasta 100 veces más largo que el tiempo necesario para adquirir una imagen de intensidad de una escena con el mismo tamaño, haciendo así que los métodos de formación de imagen 3D basados en línea láser sean demasiado lentos para muchas aplicaciones industriales de visión artificial.

20 Se hace referencia al documento US 2012/162457 que se refiere a un método de reconstrucción de cámara y video programables y a un "Sensor de imagen CMOS con ADC por columna y Detección Comprimida Programable" de Yusuke Oike et al., IEEE Journal of Solid State Circuits, vol. 48, nº 1, 1 de enero de 2013, que se refiere a una arquitectura de sensor de imagen CMOS con detección comprimida de un solo disparo integrada.

25 Breve resumen de la invención

Los aspectos de la invención proporcionan sistemas de visión artificial y métodos que se pueden aplicar para colocar la intersección de un plano o varios planos de iluminación con un objeto o varios objetos en una escena.

30 Los aspectos de la presente invención introducen métodos y aparatos que hacen posible la realización práctica de un sistema de visión que tiene ventajas significativas con respecto a los sistemas de visión convencionales en el dominio de aplicación indicado. En algunos aspectos, la invención realiza sustancialmente la misma función que los sistemas de visión convencionales de la figura 1a y la figura 1b, es decir, extraer parámetros asociados a las características de imagen de la curva formada por la intersección de un plano de iluminación con objetos de interés en una escena física, aunque realiza las funciones, incluyendo cálculos, de manera que se realice una ventaja de producción en la implementación real.

35 En un aspecto, la invención proporciona un método útil para determinar información de una imagen, de acuerdo con la reivindicación 1.

40 De acuerdo con algunos de tales aspectos, la acumulación de las primeras señales de píxel comienza antes de la aplicación de los conjuntos de señales de control y continúa a lo largo de la aplicación de los conjuntos de señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la acumulación de las primeras señales de píxel comienza antes de la aplicación de los conjuntos de señales de control y la aplicación de los conjuntos de señales de control se interrumpe temporalmente, y el restablecimiento y reanudación de la acumulación de las primeras señales de píxel se produce durante la interrupción. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la agrupación, de acuerdo con las señales de control, de señales de salida basadas en las primeras señales de píxel para columnas de elementos de píxel, comprende, para cada columna de elementos de píxel, acoplar las primeras señales seleccionadas de las primeras señales de píxel a una primera línea de salida de columna para esa columna y acoplar las segundas señales seleccionadas de las primeras señales de píxel a una segunda línea de salida de columna para esa columna, siendo determinadas las primeras señales seleccionadas de las primeras señales de píxel y las segundas señales seleccionadas de las primeras señales de píxel por las señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la digitalización de cada una de las señales de salida agrupadas de las columnas de los elementos de píxel comprende, para cada una de las columnas de los elementos de píxel, comparar señales de la primera línea de salida de columna y la segunda línea de salida de columna. De acuerdo con algunos de tales aspectos, las primeras señales de píxel comprenden señales de tensión y en el que las señales de salida comprenden señales de corriente. De acuerdo con algunos de tales aspectos, el conjunto de píxeles incluye  $N_1$  hileras de elementos de píxel,  $N_2$  columnas de elementos de píxel y  $M$  conjuntos de señales de control se aplican a hileras de los elementos de píxel para formar una medición indicativa de la imagen de la escena,  $M$  mucho menor que  $N_1$ . De acuerdo con algunos de tales aspectos, la función de filtrado se basa en una aproximación por diferencia central. De acuerdo con algunos de tales aspectos, las señales de salida agrupadas digitalizadas se escriben en un búfer, almacenando el búfer una

medición indicativa de la imagen de la escena. De acuerdo con algunos de tales aspectos, una estimación se determina formando un producto de una transposición de la función de base aleatoria y la medición, la estimación se ajusta y los bordes de las líneas se colocan en la estimación.

5 En otro aspecto, la invención proporciona un método útil para determinar información de una imagen, comprendiendo: acumular una primera señal de píxel basada en energía luminosa incidente para cada uno de una pluralidad de elementos de píxel de una matriz de píxeles, incluyendo cada elemento de píxel un sensor de luz; y obtener información de una medición indicativa de la imagen de la escena:

10 aplicando conjuntos de señales de control a hileras de elementos de píxel, estando los elementos de píxel de cada hilera agrupados en subconjuntos de píxeles, cada uno incluyendo una pluralidad de píxeles de esa hilera, perteneciendo los elementos de píxel de cada hilera a cada subconjunto de píxeles que comparten señales de control comunes, estando cada uno de los conjuntos de señales de control sustancialmente sin correlación entre sí, para cada conjunto de señales de control,

agrupando, de acuerdo con las señales de control, señales de salida de columnas de elementos de píxel, en base a las señales de salida en las primeras señales de píxel, y

15 digitalizando cada una de las señales de salida agrupadas de las columnas de los elementos de píxel.

De acuerdo con algunos de tales aspectos para cada hilera, los elementos de píxel en un primer subconjunto de píxeles están separados por elementos de píxel de al menos otro subconjunto de píxeles. De acuerdo con algunos de tales aspectos, cada columna de elementos de píxel incluye solamente elementos de píxel pertenecientes al mismo subconjunto de píxeles. De acuerdo con algunos de tales aspectos, los conjuntos de señales de control comprenden grupos de conjuntos de señales de control, basándose cada grupo de conjuntos de señales de control en una función de muestreo diferente. De acuerdo con algunos de tales aspectos, cada función de muestreo está sustancialmente no correlacionada con las otras funciones de muestreo. De acuerdo con algunos de tales aspectos, los elementos de píxel en cada subconjunto reciben señales de control basadas en diferentes funciones de muestreo. De acuerdo con algunos de tales aspectos, las señales de control se basan en al menos nueve funciones de muestreo diferentes, siendo aplicadas señales de control basadas en al menos tres funciones de muestreo diferentes durante un primer periodo de tiempo, siendo aplicadas las señales de control basadas en al menos otras tres funciones de muestreo diferentes durante un segundo periodo de tiempo, y siendo aplicadas señales de control basadas en al menos otras tres funciones de muestreo diferentes durante un tercer periodo de tiempo. De acuerdo con algunos de tales aspectos, cada función de muestreo comprende un producto de una función de base aleatoria y una función de filtrado que tiene una respuesta de frecuencia sintonizada a frecuencias espaciales deseadas de interés en una señal de imagen esperada. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la acumulación de las primeras señales de píxel se produce asincrónicamente con respecto a la aplicación de los conjuntos de señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la acumulación de las primeras señales de píxel se produce de forma sincrónica con respecto a la aplicación de los conjuntos de señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la agrupación, de acuerdo con las señales de control, de señales de salida basadas en las primeras señales de píxel para columnas de elementos de píxel, comprende, para cada columna de elementos de píxel, acoplar las primeras señales seleccionadas de las primeras señales de píxel a una primera línea de salida de columna para tal columna y acoplar las segundas señales seleccionadas de las primeras señales de píxel a una segunda línea de salida de columna para esa columna, siendo determinadas las primeras señales seleccionadas de las primeras señales de píxel y las segundas señales seleccionadas de las primeras señales de píxel por las señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la digitalización de cada una de las señales de salida agrupadas de las columnas de los elementos de píxel comprende, para cada una de las columnas de los elementos de píxel, comparar señales de la primera línea de salida de columna y la segunda línea de salida de columna. De acuerdo con algunos de tales aspectos, las primeras señales de píxel comprenden señales de tensión y en el que, las señales de salida comprenden señales de corriente. De acuerdo con algunos de tales aspectos, la matriz de píxeles incluye  $N_1$  hileras de elementos de píxel,  $N_2$  columnas de elementos de píxel, y  $M$  conjuntos de señales de control basadas en cada función de muestreo,  $M$  es mucho menor que  $N_1$ .

En otro aspecto, la invención proporciona un método útil para determinar información de una imagen, comprendiendo: proporcionar un sensor de imagen que comprende: una matriz de píxeles que incluye una pluralidad de elementos de píxel divididos en hileras y columnas, comprendiendo cada uno de los elementos de píxel un sensor de luz, perteneciendo los elementos de píxel de cada hilera a uno de una pluralidad de conjuntos diferentes, perteneciendo los elementos de píxel de cada hilera a cada conjunto que tiene acoplamientos comunes para recibir señales de control para elementos de píxel de ese conjunto para esa hilera, comprendiendo los elementos de píxel de cada columna de elementos de píxel acoplamientos comunes para proporcionar una señal de salida de columna para esa columna, siendo las contribuciones de los elementos de píxel a la señal de salida de columna dependientes de las señales de control y la energía luminosa acumulada por los elementos de píxel; y una matriz de digitalizadores acoplados en correspondencia uno a uno con columnas de la matriz de píxeles, los digitalizadores acoplados para recibir las señales de salida de columna desde su correspondiente columna de la matriz de píxeles; obtener una medición de las señales de intensidad de imagen en los elementos de píxel: aplicando vectores de señal de entrada de hilera a las líneas de control de la matriz de píxeles, aplicándose un vector de señal de entrada de hilera diferente para cada conjunto, siendo cada vector de señal de entrada de hilera uno de un subconjunto de

un conjunto de todos los vectores de señal de entrada de hilera posibles que está sustancialmente sin correlación con todos los vectores de señal de entrada de hilera aplicados previamente para un periodo de tiempo actual, leyendo salidas de la matriz de digitalizadores y repitiendo, para una pluralidad de tiempos, la aplicación de los vectores de señal de entrada de hilera y leyendo salidas de la matriz de digitalizadores.

5 De acuerdo con algunos de tales aspectos, los vectores de señal de entrada de hilera se basan en vectores de una pluralidad de funciones de muestreo. De acuerdo con algunos de tales aspectos, cada función de muestreo comprende un producto de una función de base aleatoria y una función de filtrado que tiene una respuesta de frecuencia sintonizada a frecuencias espaciales deseadas de interés en una señal de imagen esperada.

10 En otro aspecto, la presente descripción proporciona un sensor de imagen que comprende: una matriz de píxeles que incluye una pluralidad de elementos de píxel divididos en hileras y columnas, comprendiendo cada uno de los elementos de píxel un sensor de luz; perteneciendo los elementos de píxel de cada hilera a uno de una pluralidad de conjuntos diferentes, perteneciendo los elementos de píxel de cada hilera a cada conjunto de acoplamientos comunes para recibir señales de control para elementos de píxel de ese conjunto para esa hilera; teniendo los elementos de píxel de cada columna de elementos de píxel acoplamientos comunes para proporcionar cada una de  
15 una primera señal de salida de columna y una segunda señal de salida de columna para esa columna, siendo las contribuciones de los elementos de píxel a las señales de salida de columna dependientes de las señales de control y la energía luminosa acumulada por los elementos de píxel; y una matriz de digitalizadores acoplados en correspondencia uno a uno con columnas de la matriz de píxeles, los digitalizadores acoplados para recibir una indicación de las señales de salida de columna desde su correspondiente columna de la matriz de píxeles.

20 De acuerdo con algunos de tales aspectos, un primer elemento de almacenamiento está alrededor de un lado de la matriz de píxeles para almacenar información para su uso en la generación de algunas de las señales de control y un segundo elemento de almacenamiento está alrededor de otro lado de la matriz de píxeles para almacenar información para su uso en la generación de otras de las señales de control. De acuerdo con algunos de tales aspectos, el primer elemento de almacenamiento y el segundo elemento de almacenamiento comprenden cada uno  
25 un conjunto de células de almacenamiento, comprendiendo cada célula de almacenamiento al menos dos bits de información. De acuerdo con algunos de tales aspectos, los acoplamientos comunes para recibir señales de control de cada píxel elemental incluyen un primer acoplamiento para recibir una señal indicativa de un primero de los dos bits y un segundo acoplamiento para recibir una señal indicativa de un segundo de los dos bits. De acuerdo con algunos de tales aspectos, el digitalizador está acoplado a columnas de la matriz de píxeles mediante un  
30 transportador de corriente y un limitador de corriente.

Estos y otros aspectos de la invención se comprenden mejor tras la revisión de esta descripción.

#### Breve descripción de los dibujos

La figura 1a es un diagrama de semibloques que semiilustra aspectos de un sistema de visión artificial en un entorno operativo.

35 La figura 1b es un diagrama de los cálculos de un sistema de visión de la técnica anterior.

La figura 2a es un organigrama de un proceso que representa cálculos realizados por un sistema de visión artificial de acuerdo con ciertos aspectos de la presente invención.

La figura 2b es un organigrama de otro proceso que representa cálculos realizados por el sistema de visión artificial de acuerdo con ciertos aspectos de la presente invención.

40 La figura 3 es un diagrama de bloques de alto nivel de una arquitectura de sensor de imagen representativa de ciertos aspectos de la presente invención.

La figura 4 es un diagrama de circuito que muestra aspectos más detallados de un sensor de imagen de acuerdo con aspectos de la invención.

45 La figura 5 es un diagrama de bloques de una arquitectura de procesamiento compatible con ciertos aspectos de la presente invención.

La figura 6 es un gráfico que ilustra curvas de respuesta de sensor.

La figura 7 es un diagrama que ilustra un método para formar aproximaciones de una señal de imagen de acuerdo con aspectos de la invención.

50 La figura 8 es un diagrama de relaciones de tiempo que ilustra la adquisición de un alto rango dinámico de sensor de acuerdo con aspectos de la invención.

#### Descripción detallada

La figura 1a es un diagrama de un sistema de visión para implementar un método conocido para capturar imágenes de rango 3D. La figura 1a comprende un generador de línea láser 101, un transportador de objeto 102, un objeto de

interés 103, un plano de objeto iluminado por láser 104, una cámara digital 105, un canal de comunicación digital 109 y un ordenador digital 111 para almacenar, procesar, interpretar y mostrar datos de rango 3D extraídos del objeto de interés, que se representan gráficamente en la figura 1a mediante el resultado 110. La cámara digital 105 comprende además una lente de formación de imágenes 106, un sensor de imagen 107 y un procesador de imagen local 108.

En operación, un plano estrecho de iluminación 112, formado por el generador de líneas láser 101, corta una escena 3D que incluye el transportador 102 y el objeto de interés 103. El plano estrecho de iluminación formado por el generador de línea láser 101 coincide con el plano de objeto 104 de la lente de formación de imágenes 106. La lente de formación de imágenes 106 recoge luz dispersada por la escena 3D y la enfoca en el sensor de imagen 107. El sensor de imagen 107, que comprende una matriz rectangular de píxeles fotosensibles, captura una señal eléctrica representativa de la señal de intensidad luminosa media formada por la lente 106 durante un período de tiempo de exposición. La señal eléctrica formada en el sensor de imagen 107 se convierte en un flujo de información digital, que es recibido por un procesador digital local 108. El procesador digital 108 formatea la información de imagen digital para su transmisión a un ordenador digital 111. En algunas implementaciones, el procesador digital local 108 también procesa la imagen para formar una representación alternativa de la imagen o extraer características relevantes para llegar a una medición crítica o a alguna otra forma de clasificación compacta basada en la información de la imagen digital.

En general, la imagen capturada por la cámara digital 105 es procesada, ya sea por el procesador digital local 108 o por el ordenador digital 111, para medir el desplazamiento de la línea formada por la intersección del plano de iluminación con el objeto en la escena. Cada medición de desplazamiento representa una coordenada de imagen que puede transformarse en una coordenada de superficie de objeto en el plano de objeto 104, de acuerdo con una calibración de cámara predeterminada. En algunas aplicaciones, el objeto 103 es movido a través del plano del generador de línea láser 101, mientras que sucesivamente captura imágenes y extrae coordenadas de desvío a intervalos regulares. De esta manera, en función del tiempo, se puede construir un mapa de la superficie del objeto 103 que sea visible para el sistema de visión de la figura 1a mediante el ordenador digital 111.

Con el fin de facilitar una mejor comprensión de los aspectos de la presente invención, ya que se refiere a sistemas de visión convencionales de la técnica conocida, se describe un ejemplo basado generalmente en la técnica anterior con respecto a la figura 1b. Sin embargo, la descripción se expresa en términos compatibles con la siguiente descripción con respecto a la presente invención.

En las siguientes descripciones, los símbolos en mayúsculas, en general, representan cantidades de matriz, los números de hilera de una matriz se identifican mediante el subíndice  $i$ , los números de columna mediante el subíndice  $j$  y el periodo de tiempo mediante el subíndice  $t$ . Los símbolos en minúscula representan valores escalares o vectoriales, por ejemplo,  $x_{i,j}$  se refiere a un elemento de  $X$  y  $x_j$  se refiere a un vector de columna de  $X$ . Los paréntesis se utilizan para hacer referencia en conjunto a todos los vectores o elementos de una matriz, por ejemplo  $X = (x_j) = (x_{i,j})$ .

En los cálculos indicados en la figura 1b:

- El símbolo  $X$ ,  $X \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$ , representa una señal de intensidad de imagen, tal como existe en las  $N_1$  hileras de píxeles y  $N_2$  columnas de píxeles de la matriz de píxeles.

- El símbolo  $Y$ ,  $Y \in \{0,1,2...255\}^{N_1 \times N_2}$ , representa el producto de la señal de imagen  $X$  y la función de muestreo canónico cuantificado por  $Q_{256}(\cdot)$  a 256 niveles.

- El símbolo  $X$ ,  $X \in \{0,1,2...255\}^{N_1 \times N_2}$ , representa las señales de intensidad de imagen recuperadas de una medición  $Y$ .

- El símbolo  $f$  representa un núcleo de convolución, que puede ser un filtro de paso de banda, creado por la combinación lineal de coeficientes de suavizado  $\alpha$  y coeficientes de detección de borde  $\psi$ .

- El símbolo  $\hat{Z}$ ,  $\hat{Z} \in \{-256...255\}^{N_1 \times N_2}$ , representa la señal de imagen recuperada  $X$  convolucionada por  $f$ , lo que puede dar como resultado que  $\hat{Z}$  sea, por ejemplo, la derivada parcial aproximada de la señal de imagen recuperada  $X$  con respecto a hileras.

- El símbolo  $\Delta$ ,  $\Delta \in \{0,1,2...N_1\}^{p \times N_2}$ , representa parámetros de desviación de imagen de los extremos de señal local, es decir, los picos de señal relevantes  $P$  de la señal  $\hat{Z}$  en cada columna.

En la figura 1b, el proceso recibe información representativa de la energía luminosa de una escena. La información puede considerarse señales de intensidad de imagen, por ejemplo,  $X$ , donde  $X \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$  y representa las señales de intensidad de imagen tal como existen en las  $N_1$  hileras de píxeles y  $N_2$  columnas de píxeles de la matriz de píxeles. La información puede ser recibida por un sensor de imagen, por ejemplo, el sensor de imagen 107 de la figura 1a.

La señal de imagen  $X$  de la figura 1b incluye tres segmentos de una línea láser, estando un tercer segmento horizontalmente entre y desviado verticalmente de un primer segmento y un segundo segmento, representativo, por ejemplo, de la imagen de la intersección del plano de iluminación 112 con el transportador 102 y el objeto 103 de la figura 1a. La señal de imagen  $X$  puede incluir también artefactos de iluminación fuera del plano no deseados y ruido (no mostrado). Los artefactos de iluminación pueden ser luz internamente difundida de una parte de un objeto a otro, por ejemplo, luz de la línea láser, y el ruido puede ser introducido por la luz ambiente o por el sensor de imagen.

En general, la función de los cálculos presentados en la figura 1b es extraer parámetros de desviación de hilera asociados con las características de imagen de la curva formada por la intersección de un plano de iluminación con objetos de interés en una escena física. El método convencional incluye etapas de muestreo de la señal de imagen, de formación de una imagen digital, de filtración de la imagen digital y de extracción características de imagen de la imagen digital filtrada.

Una limitación importante asociada al proceso convencional de visión artificial descrito en la figura 1b es que una imagen de intensidad bidimensional de tamaño sustancial debe ser capturada por la cámara digital para cada línea de coordenadas físicas formadas por el sistema. Esto puede hacer que el tiempo de captura de la imagen 3D de una escena sea de hasta 100 veces más largo que el tiempo necesario para adquirir una imagen de intensidad de una escena con el mismo tamaño, haciendo así que los métodos de formación de imagen 3D basados en línea láser sean demasiado lentos para muchas aplicaciones industriales de visión artificial.

El tiempo que se tarda en generar una representación digital convencional de una señal de imagen captada por un sensor de imagen es una función del tamaño de la imagen, la velocidad del digitalizador y el número de digitalizadores. Los sensores de imagen convencionales funcionan muestreando señales de tensión generadas por cada píxel de la matriz; cuantificando la tensión en cientos, o incluso miles, de niveles para formar una imagen de intensidad digital. El proceso de lectura digital incluye cambiar la señal de tensión de un píxel a un conductor conectado al dispositivo de muestreo, esperar a que la señal se desarrolle y estabilice, muestrear la señal de tensión, comparar la señal de tensión muestreada en múltiples etapas discretas con una señal o varias señales de referencia para llegar a un valor digital. Los métodos conocidos para mejorar la velocidad de captura de imágenes implican restringir el número de hileras (o columnas) a un mínimo requerido para adaptarse al desplazamiento esperado de la línea láser mediante objetos en la escena, aunque en la práctica las imágenes de desplazamiento útiles requieren aún la lectura de cientos de hileras de píxeles. Otros métodos para mejorar la velocidad de captura de imágenes implican el uso de múltiples convertidores analógico-digital. En la práctica, sin embargo, el número de convertidores analógico-digital está restringido por los conductores necesarios para acceder a las tensiones de píxeles individuales. En un sensor de imagen CMOS convencional, los conductores no son transparentes, normalmente están situados en el trayecto óptico cerca de áreas fotosensibles y sólo pueden ser apilados en un número finito de capas. Lo anterior limita normalmente el número útil de digitalizadores para que sea menor o igual al número de columnas o hileras de la matriz de píxeles. Se sabe mucho sobre métodos de alta velocidad para digitalizar imágenes, aunque, últimamente, hay ciertos límites prácticos para que la velocidad se pueda lograr usando métodos convencionales de adquisición de imágenes digitales.

En la presente aplicación de visión artificial, observamos que una escena iluminada por un plano de luz será vista por una cámara como una imagen relativamente dispersa, es decir, una imagen en la que la gran mayoría de los píxeles del sensor de imagen pueden ser representados por el valor numérico cero, habiendo recibido muy poca (o ninguna) luz de la escena. Observamos además que, la intersección del plano de iluminación visible con objetos de interés prácticos que se mueven a través del campo de visión de la cámara son, por lo general, funciones por tramos suaves y continuas, y el contenido de información de imagen que buscamos podría representarse adecuadamente mediante unos pocos bits por columna de la imagen. Dada la aplicación prevista, es evidente que el contenido de información útil del flujo de señal de imagen es excesivamente pequeño en relación a la dimensión de la señal, lo que implica que los métodos de digitalización de imágenes convencionales pasan la mayor parte de su tiempo muestreando y convirtiendo información de señal redundante. Sería posible mejorar de manera significativa el rendimiento del sistema de visión si pudiera evitarse tal lectura redundante y la conversión de la señal de imagen analógica.

En el campo de la detección compresiva, se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, un vector de señal  $x \in \mathbb{R}^N$  que consiste en ceros y  $K$  coeficientes que no consisten en ceros, se puede recuperar de únicamente mediciones  $M = O\left(K \log\left(\frac{N}{K}\right)\right)$ . En esta formulación:

$$y = Ax, y \in \mathbb{R}^M \text{ donde } A \in \mathbb{R}^{M \times N}, M \ll N.$$

Las condiciones mencionadas anteriormente son que cualquier variación relevante del vector de señal  $x$  debe dar como resultado la formación de un único vector de medición  $y$ , tal como:

$$Ax_1 - Ax_2 \neq 0 \text{ para todo } x_1 \neq x_2$$

Teniendo en cuenta lo anterior,  $x$  puede ser recuperada de  $y$  y  $A$  buscando el vector de dispersión máximo  $\hat{x}$  que genera un vector de medición coincidente  $y$ .

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_0 \quad \text{Sujeto a} \quad y = Ax$$

5 La complejidad computacional de esta búsqueda aumenta exponencialmente con la dimensionalidad del espacio de búsqueda, que es directamente proporcional a  $K$ , la dispersión del vector de señal  $x$ . Este hecho hace que la solución sea generalmente intratable para valores mayores de  $K$ , es decir, a menos que 1)  $x$  esté suficientemente dispersa y 2) la matriz de medición  $A$  se adapte a la denominada propiedad isométrica restringida, que requiere la existencia de una constante  $\delta$  tal como para vectores de señal  $x$  de dispersión  $K$ .

$$(1 - \delta)\|x\|_2^2 \leq \|Ax\|_2^2 \leq (1 + \delta)\|x\|_2^2$$

10 Lo anterior implica que para constantes pequeñas  $\delta$ , la medición  $y$  y la señal tienen normas  $\ell_2$  suficientemente similares, en cuyo caso se aplican métodos de optimización convexos en los que  $\hat{x}$  se puede encontrar en su  $\ell_1$  mínimo, sujeto a la limitación que es compatible con la medición

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_1 \quad \text{sujeto a} \quad y = Ax$$

Suponiendo el vector de ruido aditivo  $n$ , donde  $\|n\|_2 \leq \epsilon$

15 
$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_1, \quad \text{sujeto a} \quad \|y - Ax\| \leq \epsilon$$

Independientemente del método de recuperación, el elemento esencial del modelo de detección compresiva es un conocimiento previo de la dispersión de señal, sin la cual es difícil o imposible garantizar una asignación única desde el vector de señal  $x$  al vector de medición  $y$  o proporcionar una recuperación eficiente, incluso aunque exista una asignación única.

20 En vista de la dispersión de la señal de imagen anticipada, el modelo anterior de detección compresiva parece prometedor. Sin embargo, existen, evidentemente, dificultades significativas relativas a métodos conocidos de diseño y fabricación de sensores de imagen. Una dificultad es que tanto el vector de medición  $y$  como la función de muestreo  $A$  se supone que consisten en coeficientes pertenecientes al conjunto de números reales. Para conseguir una mejora de la velocidad con respecto a los métodos convencionales se requeriría un gran número de cálculos analógicos de alto rango dinámico realizados en paralelo, más la digitalización de precisión de la señal analógica resultante.

25 Algunas de las dificultades asociadas a la implementación práctica mencionada anteriormente son abordadas por las teorías de detección compresiva de 1 bit, que es, esencialmente, la teoría convencional de detección compresiva con cuantificación extrema de la señal de medición  $y$ . En la detección compresiva de 1 bit cada medición es cuantificada a 1 bit por el signo de función ( $\cdot$ ), y sólo los signos de las mediciones son almacenados en el vector de medición  $y$ .

30 
$$y = \text{signo}(Ax), \quad \text{donde} \quad y \in \{1, -1\}^M$$

Lo anterior representa una simplificación del proceso de conversión analógico a digital, lo que proporciona cierta esperanza para una implementación realista. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la naturaleza del proceso de medición es destruir la información de escala de la señal original. Por tanto, en esta formulación sólo es posible la reconstrucción parcial dentro de un factor de escala. Este hecho tiene importancia en relación al diseño del sensor de imagen de la presente invención que se explicará más adelante.

35 Para estimar el potencial real de la detección compresiva de 1 bit con relación a la aceleración de la captura digital de información contenida dentro de la imagen de una escena iluminada por un plano de luz, es necesario apreciar la naturaleza de la relación que existe entre el vector de señal  $x$ , la matriz de muestreo  $A$  y el vector de medición  $y$ .

40 Si dejamos que  $x_1$  y  $x_2$  representen cualquiera de los dos vectores de señal  $x_1 \neq x_2$  normalizados a la esfera unitaria, y que la medición  $y_1 = \text{signo}(Ax_1)$  y la medición  $y_2 = \text{signo}(Ax_2)$ , entonces, el  $\text{signo}(Ax)$ , que asigna

$\mathbb{R}^N \rightarrow \mathcal{B}^M$ , es una, denominada, incorporación binaria  $\epsilon$ -estable de orden  $K$  para una señal dispersa- $K$   $x$  si

$$d_{ang}(x_1, x_2) - \epsilon \leq d_{ham}(y_1, y_2) \leq d_{ang}(x_1, x_2) + \epsilon$$

45 Dicho de otro modo, el ángulo vectorial normalizado entre dos señales cualesquiera es igual a la distancia normalizada de Hamming entre sus mediciones, dentro de alguna tolerancia  $\epsilon$ .

En la detección compresiva de 1 bit, se ha demostrado que si  $A$  consiste en variables aleatorias I.I.D (Independientes y Distribuidas Idénticamente), por ejemplo, una distribución de Bernoulli y  $\epsilon > 0$ , entonces  $y = \text{signo}(Ax)$  es una incorporación binaria  $\epsilon$ -stable con probabilidad  $\Pr > 1 - \rho$  para

$$M \geq \frac{2}{\epsilon^2} \left( K \log(N) + 2K \log\left(\frac{50}{\epsilon}\right) + \log\left(\frac{2}{\rho}\right) \right)$$

5 La ecuación anterior predice el límite inferior en el número de muestras requeridas para asegurar el reconocimiento de una señal de cierto tamaño y la dispersión a una resolución indicada.

Para llegar a una estimación del número mínimo de muestras  $M$  requeridas para codificar una columna de una imagen formada de una escena iluminada por un plano de luz, comenzamos suponiendo que la señal  $x$  puede ser modelada como un vector de imagen dispersa que comprende un pulso de línea láser estrecho desplazado una desviación determinada de hilera  $\theta$ . Tal señal de pulso de línea láser ideal sería  $K = 1$  dispersa en cada vector de columna de la imagen.

Suponiendo que se desee estimar  $\theta$  dentro de alguna tolerancia de desplazamiento  $\delta = 1$ , esto implica que  $\epsilon < 0,50$  es necesario para garantizar un nivel mínimo de precisión.

Por tanto, para garantizar

$$15 \quad d_{ang}(x_\theta, x_{\theta+\delta}) - \epsilon \leq d_{ham}(y_\theta, y_{\theta+\delta}) \leq d_{ang}(x_\theta, x_{\theta+\delta}) + \epsilon$$

en una probabilidad mayor de 0,90, dado  $K = 1$ ,  $N = 512$ ,  $\epsilon < 0,50$  teóricamente sólo se requiere:

$$M \geq \frac{2}{0,50^2} \left( 1 \log(512) + 2 \log\left(\frac{50}{0,50}\right) + \log\left(\frac{2}{0,10}\right) \right) = 148 \quad \text{Bits/columna de imagen}$$

20 El cálculo anterior implica el potencial para una reducción sustancial de datos con relación a la imagen digital de 8 bits / píxeles, formada típicamente por sensores de imagen CMOS convencionales. En la medida en el que el rendimiento, es decir, la velocidad de imagen, del sensor de imagen, se rija por la cantidad de información procesada, no es irracional prever mejoras de velocidad del mismo orden de magnitud.

25 Desafortunadamente, algunas de las suposiciones asociadas al caso de ejemplo ideal descrito anteriormente se apartan significativamente de la realidad práctica. Por ejemplo, los vectores de columna de una imagen formada de un plano de luz que ilumina la superficie de un objeto, aunque generalmente contienen menos elementos distintos de cero que una imagen normalmente iluminada, contienen todavía muchos más valores distintos de cero que los necesarios para codificar la posición de la línea láser al píxel más próximo. Esto se debe a que, incluso en el mejor de los casos, la imagen de la línea láser tiene un grosor finito y variable en lo que se refiere al número de hileras que ocupa en cualquier columna dada de la imagen. Además, es común que parte de la luz dispersa o difundida por el objeto ilumine otros puntos de la superficie del objeto que no estén en el plano del láser, aunque estén sin embargo en el campo de visión de la cámara, y por ello contribuyen a la adición de valores distintos de cero en la imagen. Dado que la imagen de línea láser típica ya está relativamente dispersa, una transformación lineal a una base diferente típicamente no proporciona una reducción significativa de coeficientes de señal distintos de cero. El ruido y ciertos parámetros molestos inevitables asociados a la imagen de línea láser contribuyen directamente al número de valores distintos de cero en la señal de imagen e indirectamente al número de muestras  $M$  que son necesarias para capturar una medición que codifica con precisión las coordenadas de línea láser en la medición. Además, dependiendo de la implementación del procesador digital, la tarea de restaurar la señal digital a partir de la medición puede aumentar rápidamente para dominar el tiempo de ciclo efectivo, haciendo que los métodos de detección compresiva sean inútiles para mejorar la producción del sistema de visión.

40 Un aspecto de la presente invención es que, a diferencia del sistema de la figura 1b, la señal de imagen original  $X$  no está codificada en la medición  $Y$ , ya que hacerlo así requeriría necesariamente la codificación de información de imagen adicional que no es directamente relevante para extraer los parámetros de desviación de la intersección del plano de iluminación con objetos de interés en la escena física. En su lugar, una señal de imagen filtrada  $Z$  se codifica en la medición  $Y$ . Una razón para esto es que, como se explicó anteriormente, el número de muestras requeridas para incorporar toda la variación de la señal a una tolerancia de error específica  $\epsilon$  es de orden  $O(K \log(N))$ . Si se filtra la señal de imagen  $X$  para atenuar frecuencias espaciales que no contienen información esencial para la extracción de los parámetros de desviación de línea láser, aumenta la dispersión de  $Z$ , de tal manera que  $K_z < K_x$  y el número de muestras requeridas para codificar de forma robusta la señal filtrada en la medición  $Y$  será, en la práctica, siempre menor (a menudo mucho menor) que el número de muestras requeridas para codificar la señal de imagen sin procesar  $X$ , suponiendo que la tolerancia de error  $\epsilon$  permanece igual.

La figura 2a representa un semiorgranigrama de un proceso, en concreto cálculos del proceso, realizado por un sistema de visión artificial de acuerdo con aspectos de la invención. El sistema de visión artificial puede ser, por ejemplo, un sistema que incluye parte o la totalidad del hardware del sistema de la figura 1a.

En los cálculos indicados en la figura 2a:

- 5 - El símbolo  $X$ ,  $X \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$ , representa una señal de intensidad de imagen tal como existe en  $N_1 \times N_2$  elementos de píxel de un sensor de imagen, con, por ejemplo, elementos de píxel del sensor de imagen que forman una matriz de píxeles que puede tener  $N_1$  hileras de píxeles y  $N_2$  columnas de píxeles.
- El símbolo  $\Psi$ ,  $\Psi \in \{-1,0,1\}^{N_1 \times N_1}$ , representa una función de filtrado de imagen compuesta por, y en algunas realizaciones que consiste en, coeficientes usados para calcular una aproximación por diferencia central de la primera derivada parcial con respecto a hileras de la señal de imagen  $X$ .
- 10 - El símbolo  $r \in \{-1,0,1\}^{M^3}$ , representa una secuencia aleatoria dispersa, que en algunas realizaciones se basa en una cadena de Markov de orden  $m$ , donde  $m > 1$ .
- El símbolo  $\Theta$ ,  $\Theta \in \{-1,0,1\}^{M \times N_1}$ , representa una función de base aleatoria, creada dibujando vectores de hilera a partir de  $r$ .
- 15 - El símbolo  $\Phi$ ,  $\Phi \in \{-1,0,1\}^{M \times N_1}$ , representa una función de muestreo de imagen, formada a partir del producto de la base aleatoria  $\Theta$  y de la función de filtrado  $\Psi$ .
- El símbolo  $Y$ ,  $Y \in \{-1,1\}^{M \times N_2}$ , representa una medición de la señal de intensidad de imagen filtrada, formada a partir del producto de la función de muestreo  $\Phi$  y la señal de imagen  $X$ , cuantificada por el signo ( $\cdot$ ) a dos niveles  $\{-1,1\}$ .
- 20 - El símbolo  $W$ ,  $W \in \{-M \dots M\}^{N_1 \times N_2}$ , representa una estimación de la señal de imagen filtrada, formada a partir del producto de la medición  $Y$  y la transposición de la función de base aleatoria  $\Theta$ .
- El símbolo  $\hat{Z}$ ,  $\hat{Z} \in \{-M \dots M\}^{N_1 \times N_2}$ , representa una estimación del producto de la señal de imagen original  $X$  y de la función de filtrado  $\Psi$ .
- El símbolo  $\Delta$ ,  $\Delta \in \{0,1,2 \dots N_1\}^{P \times N_2}$  representa parámetros de desviación de imagen de los extremos de señal local, es decir, los  $P$  picos de señal relevantes de la señal  $Z$  en cada columna.
- 25 En la figura 2b, el bloque 215 representa información de la señal de imagen  $X$ , que es información representativa de la energía luminosa de una escena. La información puede ser recibida por un sensor de imagen, por ejemplo, el sensor de imagen 107 de la figura 1a. La energía luminosa puede ser luz dispersada desde la escena, con al menos parte de la luz enfocada por una lente sobre el sensor de imagen. La imagen también puede incluir artefactos de iluminación fuera de plano no deseados y ruido (no mostrados). Los artefactos de iluminación pueden ser luz internamente dispersada desde una parte de un objeto a otro, por ejemplo, luz de la línea láser, y el ruido puede ser introducido por luz ambiente o, por ejemplo, por el sensor de imagen.
- 30 Un bloque 217 incluye una representación de un proceso que genera una medición  $Y$  de la señal de intensidad de imagen  $X$ . La medición  $Y$  representa un producto de la señal de imagen  $X$  y la función de muestreo  $\Phi$ , cuantificada a dos niveles. En la mayoría de las realizaciones, la función de muestreo es un producto de una función de base aleatoria y una función de filtrado espacial. En algunas realizaciones, la función de base aleatoria es dispersa, los elementos distintos de cero se extraen de una distribución de Bernoulli o de alguna otra distribución generalmente aleatoria. En algunas realizaciones se espera que la función de muestreo pase generalmente frecuencias espaciales asociadas con partes de una imagen que forma una línea láser y rechace sustancialmente frecuencias espaciales asociadas con partes de una imagen que incluye ruido y otra información de imagen no deseada. En algunas realizaciones, el proceso del bloque 217 extrae información de la señal de imagen  $X$  mediante la generación iterativa de elementos de una medición  $Y$ . En algunas realizaciones, la generación de la información de la medición  $Y$  puede realizarse mediante un dispositivo de detección de imagen y / o un dispositivo de detección de imagen en combinación con circuitos asociados.
- 35 En algunas realizaciones, se generan elementos de  $Y$  en  $M$  repeticiones, por ejemplo, con cada una de las  $M$  repeticiones que generan elementos de un  $y_i$  diferente. En algunas realizaciones, por ejemplo, realizaciones con un sensor de imagen que tiene elementos de píxel dispuestos en  $N_1$  hileras y  $N_2$  columnas y una función de muestreo que tiene  $M$  hileras y  $N_1$  columnas, en cada repetición, se aplica de manera efectiva información de una hilera particular diferente de la función de muestreo a columnas del sensor de imagen para obtener, después de realizar operaciones de signo en una base por columna, un  $y_i$ . En algunas realizaciones, se obtienen elementos de un  $y_i$  de manera sustancialmente simultánea. En algunas realizaciones, se utilizan comparadores para realizar operaciones de signo.
- 45 En algunas realizaciones, para cada repetición, se utiliza información de cada hilera  $\phi_i$  de la función de muestreo para generar señales de control aplicadas a elementos de píxel del sensor de imagen, con cada hilera de elementos de píxel recibiendo la misma señal o señales de control. De acuerdo con esto, en algunas realizaciones, para una
- 50

primera señal de control o varias primeras señales de control de repetición basadas en información de  $\varphi_{1,1}$ , se puede aplicar a elementos de píxel de una primera hilera de elementos de píxel, una señal o varias señales de control basadas en información de  $\varphi_{1,2}$  se pueden aplicar a elementos de píxel de una segunda hilera, y así sucesivamente. De manera similar, para una repetición  $M$ , se puede aplicar una señal o varias señales de control basadas en información de  $\varphi_{M,1}$  a elementos de píxel de la primera hilera, se puede aplicar una señal o varias señales de control basadas en información de  $\varphi_{M,2}$  a elementos de píxel de la segunda hilera, y así sucesivamente.

En algunas realizaciones, y como se muestra en la figura 2a, la información de muestreo de señal de imagen se proporciona desde un bloque generador de función de muestreo 260. Como se ilustra en la figura 2a, el bloque generador de función de muestreo está asociado a un procesador de imagen 220, que en diversas realizaciones puede ser, de manera diferente, el procesador digital local 108 o el ordenador digital 112 de la figura 1a. Sin embargo, debe reconocerse que, en varias realizaciones, el generador de función de muestreo, o partes del mismo, puede estar incluido en el sensor de imagen 211. En algunas realizaciones, el sensor de imagen, o memoria o circuitos asociados con el sensor de imagen, proporciona un dispositivo de almacenamiento para almacenar la información de muestreo de señal de imagen, por ejemplo, como se ilustra mediante el bloque 216 de la figura 2a. En algunas realizaciones, ni el sensor de imagen ni el procesador de imagen incluyen un bloque generador de función de muestreo, teniendo en su lugar información de muestreo de señal de imagen previamente generada almacenada en un dispositivo de almacenamiento o asociada al sensor de imagen. En algunas realizaciones, la información de muestreo de señal de imagen puede almacenarse en ambos elementos de almacenamiento, con un primer elemento de almacenamiento físicamente más cercano a algunos elementos de píxel y un segundo elemento de almacenamiento físicamente más cercano a otros elementos de píxel. Por ejemplo, si las columnas de elementos de píxel que forman la matriz de píxeles se consideran dispuestas de una manera que definen un cuadrado o un rectángulo, el primer elemento de almacenamiento puede ser aproximadamente lo que puede considerarse un lado de la matriz de píxeles, y el segundo elemento de almacenamiento puede ser aproximadamente un lado opuesto de la matriz de píxeles. En algunas de tales realizaciones, los elementos de píxel más próximos al primer elemento de almacenamiento pueden recibir señales de control asociadas al primer elemento de almacenamiento, y los elementos de píxel más próximos al segundo elemento de almacenamiento pueden recibir señales de control asociadas al segundo elemento de almacenamiento.

La figura 6 es un gráfico ejemplar que ilustra la respuesta de frecuencia espacial, tomada aquí con respecto a hileras de imágenes, representativa de algunas realizaciones de acuerdo con aspectos de la invención. La figura 6 incluye un eje de respuesta de frecuencia 601, un eje de frecuencia 602, una línea de respuesta de frecuencia plana 605 y una curva de respuesta de frecuencia 603 de una función de muestreo compresivo convencional y una curva de respuesta de frecuencia 604 que es ejemplar de algunas realizaciones de la presente invención.

Generalmente, un aparato de detección de señal, por ejemplo, un sensor de imagen, proporciona un conjunto de vectores de base capaces de muestrear una señal para codificar, de la manera más completa posible, la información de una señal en una medición. Una función de muestreo canónico, conforme a un criterio de frecuencia de muestreo regular mínimo (por ejemplo, el criterio de Nyquist), representa, de hecho, una curva de respuesta de frecuencia perfectamente plana, como se ilustra en la curva de respuesta de frecuencia 605 y, en teoría, cualquier señal correspondiente puede ser reconstruida perfectamente a partir de su vector de medición.

Los métodos de detección compresiva permiten que los criterios tradicionales de frecuencia de muestreo se relajen en base a un conocimiento a priori del contenido informativo de la señal, representada en términos de dispersión o compresibilidad, que es el número mínimo de coeficientes necesarios para representar con precisión la señal según una base lineal ortogonal posiblemente desconocida. Con el fin de proporcionar esta generalización, la función de muestreo compresivo debe tener una respuesta de frecuencia aproximadamente plana, tal como se muestra en la curva de respuesta de frecuencia 603, que se derivó de una función de muestreo compresivo convencional en base a proyecciones aleatorias. Este requisito es evidente por sí mismo en vista del hecho de que, en general, el conocimiento de la cantidad de información incluida en una señal no transmite ninguna información sobre la distribución de frecuencia. Por tanto, la respuesta de frecuencia de la función de muestreo compresivo convencional debe ser aproximadamente plana para garantizar la recuperación de la señal dispersa general.

A diferencia de la curva de respuesta de frecuencia de la función de muestreo canónico 605 y la función de muestreo compresivo convencional 603, la respuesta de frecuencia representada en la curva 604, que es un ejemplo de algunas realizaciones de la presente invención, sin duda no es plana. Esto es porque, en este ejemplo, la función de muestreo se formó, no sólo con un conocimiento a priori del contenido de información general de la señal, sino también con un conocimiento previo de la distribución de frecuencia espacial, no sólo de la señal, sino del contenido de la información de la señal.

Volviendo a la figura 2a, y a los bloques 261, 262, 259 del generador de función de muestreo, en algunas realizaciones, el vector  $r$ ,  $r \in \{-1,0,1\}^{N_3}$ , donde  $N_3 = N_1 + 2Md$  y  $d = \text{soporte}(\psi)$ , el tamaño del núcleo de filtrado espacial  $\psi$ . En algunas realizaciones, la información del vector  $r$  puede entenderse como formado a partir del producto elemento a elemento de dos vectores  $b$ ,  $b \in \{-1,1\}^{N_3}$  y  $c$ ,  $c \in \{0,1\}^{N_3}$ , como en lo siguiente:

$$r = (r_i) = (b_i c_i)$$

donde  $b$  se basa en una distribución aleatoria:

$$P(b_i = 1) = P(b_i = -1) = 1/2$$

y  $c$  se basa en una cadena de Markov de orden  $m = 2d$ :

$$P(c_i = 1 | c_{i-r} = 1) = \frac{\sum_{r=1}^m F(r)(r-d)}{d}, \text{ donde } \begin{cases} F(r) = 0, r \leq d \\ F(r) = 1, r > d \end{cases}$$

5 Las funciones de base aleatoria  $\Theta$  se derivan muestreando el vector  $r$  de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\theta_{i,j} = r_{i_{r_\Theta}} \text{ donde } i_{r_\Theta} = m(i-1) + (j-1)$$

Dicho con palabras, las hileras de funciones de base aleatoria  $\Theta$  son  $N_r$  segmentos de elemento de  $r$  que son desplazados entre sí no menos de  $m$ .

10 Se puede pensar que las funciones de muestreo  $\Phi$  se han formado a partir de la convolución de las hileras de  $\Theta$  con un núcleo de filtrado  $\psi$  como sigue:

$$\phi_i = \theta_i * \psi$$

que en la figura 2a se expresa como:

$$\Phi = \Theta \Psi, \text{ donde } \nu = I * \psi$$

15 En algunas realizaciones, el núcleo de convolución  $\psi$  realiza un filtrado espacial basado en una aproximación por diferencia central de la primera derivada, por ejemplo,  $\psi = (+1, +1, +1, 0, -1, -1, -1)$ , en cuyo caso:

$$m \geq 2d = 14$$

20 En general,  $m$  debe tener un tamaño suficiente para asegurar que el rango de la función de muestreo  $\Phi$ , que está limitado por el hardware del sensor de imagen a niveles discretos, esté garantizado. En la realización preferida, los elementos de  $\Phi$  están todos en el rango, es decir,  $\phi_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}$  y las hileras de la función de muestreo  $\Phi$  están suficientemente correlacionadas.

25 En el bloque 223, el proceso almacena temporalmente una medición  $Y$  de la señal de imagen. La medición se compone de los vectores de columna  $y_j$  de la medición de las señales de intensidad de imagen. En la mayoría de las realizaciones, la medición de la señal de imagen está formada por circuitos de, o asociada al sensor de imagen, y la medición se puede almacenar en la memoria de, o asociar al procesador de imagen. El sensor de imagen y el procesador de imagen para la realización de la figura 2b y las otras realizaciones, pueden acoplarse mediante un enlace de datos en serie, en algunas realizaciones, o un enlace de datos paralelos, en otras realizaciones. Además, las operaciones de los bloques 225-231, que se describen a continuación, también pueden ser realizadas por circuitos de, o asociadas al procesador de imagen.

30 En el bloque 225, el proceso forma  $W$  una primera estimación de la imagen filtrada  $Z$ . En la realización de la figura 2a, la estimación se determina por el producto de la transposición de la función de base aleatoria  $\Theta$  y la medición  $Y$ . En el bloque 227, el proceso ajusta la estimación de la imagen filtrada  $Z$ . En alguna realización, y como se muestra en la figura 2a, la estimación de la imagen filtrada formada por el proceso del bloque 255 se ajusta por convolución con un núcleo  $\alpha$ .

35 En algunas aplicaciones que implican iluminación de línea láser, la línea láser a veces puede ser modelada por un pulso cuadrado de anchura finita donde la anchura del pulso de línea láser es mayor que (o igual que) el soporte del núcleo de filtración  $\psi$ . De acuerdo con el modelo descrito anteriormente, el núcleo de promediación de imagen a veces se adapta a la salida esperada del núcleo de filtrado  $\psi$ . Por ejemplo, si el núcleo de filtrado viene dado por  $\psi = (+1, +1, +1, 0, -1, -1, -1)$  entonces el núcleo de convolución del bloque 227 puede ser  $\alpha = (1, 2, 3, 3, 2, 1)$ .

40 Puede observarse que la etapa de ajuste del bloque 227 se podría realizar en el bloque 225 plegando el núcleo  $\alpha$  a la transposición de la función de base aleatoria  $\Theta$  antes de calcular su producto con la medición  $Y$ . Sin embargo, la realización de la operación de convolución en el bloque 227 proporciona una ventaja computacional significativa en algunas realizaciones en las que la multiplicación de la matriz del bloque 225 se realiza mediante métodos de multiplicación de matriz dispersa.

45 El bloque 229 almacena temporalmente una estimación final de la imagen filtrada  $\hat{Z}$ . Las ubicaciones de los bordes de las líneas láser en la estimación se determinan mediante el proceso en el bloque 231, por ejemplo, usando un algoritmo de detección de pico.

La figura 2b representa un semiorganigrama de un proceso, en particular cálculos del proceso, realizado por un sistema de visión artificial de acuerdo con ciertos aspectos de la presente invención. El sistema de visión artificial puede ser, por ejemplo, un sistema que incluye una parte del hardware o todo el hardware del sistema de la figura 1a.

- 5 El proceso de la figura 2b, aprovecha el conocimiento a priori de que el flujo de imagen temporal formado por un plano de iluminación que pasa sobre un objeto tridimensional de interés es generalmente más disperso de lo previsto por los métodos de la figura 2a; siendo la señal de imagen dispersa y / o compresible, no sólo con respecto a la dimensión de hilera de la señal  $X$ , sino también con respecto a las columnas y con respecto al tiempo. Es decir, es probable que las columnas adyacentes  $j$  de  $X$  sean muy similares, es decir, altamente correlacionados entre sí.
- 10 Del mismo modo, la señal de imagen  $X$  es típicamente muy similar de un periodo de tiempo a otro. Un periodo de tiempo puede ser, por ejemplo, un período de tiempo en el que se obtienen  $M$  muestras para cada una de las columnas de la señal de imagen.

La figura 2b muestra cálculos de un sistema de visión, similares a los de la figura 2a, excepto que la función de base aleatoria  $\Theta$  y la función de muestreo  $\Phi$  se dividen en varios segmentos independientes, y estos segmentos se utilizan de una manera espaciotemporalmente intercalada. Preferiblemente, y en algunas realizaciones, el intercalado espaciotemporal garantiza que, en cualquier periodo de tiempo  $t$ , ninguna columna  $j$  de la imagen sea muestreada con el mismo patrón que cualquiera de sus semejantes adyacentes  $j - 1$  o  $j + 1$  y que el patrón de muestreo usado en el actual periodo de tiempo sea diferente del patrón de muestreo del periodo de tiempo anterior y el patrón de muestreo del siguiente periodo de tiempo.

20 En comparación con la figura 2a, los cálculos indicados en la figura 2b muestran, lo que puede pensarse como, 9 funciones de muestreo más pequeñas utilizadas en 3 periodos de tiempo, siendo aplicadas 3 funciones de muestreo simultáneamente a  $X$  en cualquier tiempo dado  $t$ . En la práctica, este método permite que el número de muestras  $M$  por periodo de tiempo  $t$  sea reducido con respecto a los métodos indicados en la figura 2a, manteniendo al mismo tiempo la misma tolerancia de error asociada a la incorporación binaria  $\epsilon$ -estable de la señal  $Z$ , y de ese modo proporcionar de manera significativa más eficiencia computacional con respecto al sistema de visión de la figura 2a.

25 Aunque la figura 2b muestra el uso tanto de intercalado espacial como temporal de la función de muestreo, en realizaciones alternativas, sin embargo, el uso de funciones de muestreo puede ser intercalado en el espacio solamente, o en el tiempo solamente.

En el proceso indicado en la figura 2b:

- 30 - El símbolo  $X_t$ ,  $X \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$ , representa una señal de intensidad de imagen tal como existe en las  $N_1$  hileras de píxeles y las  $N_2$  columnas de píxeles de la matriz de píxeles en el tiempo  $t$ .
- El símbolo  $\Psi$ ,  $\Psi \in \{-1,0,1\}^{N_1 \times N_1}$ , representa una función de filtrado de imagen compuesta de, y en algunas realizaciones que consiste en, coeficientes utilizados para calcular una aproximación por diferencia central de la primera derivada parcial.
- 35 - El símbolo  $r \in \{-1,0,1\}^{N_3}$ , representa una secuencia aleatoria dispersa, que en algunas realizaciones se basa en una cadena de Markov de orden  $m$ , donde  $m > 1$ .
- El símbolo  $\Theta_{h,k}$ ,  $\Theta \in \{-1,0,1\}^{M \times N_1}$ ,  $h = (j\%3 + 1)$ , y  $k = (t\%3 + 1)$  representa una matriz de funciones de base aleatoria  $\Theta$ , que se crea dibujando vectores de hilera a partir de  $r$ .
- 40 - El símbolo  $\Phi_{h,k}$ ,  $\Phi \in \{-1,0,1\}^{M \times N_1}$  representa una matriz de función de muestreo de imagen, formada a partir del producto de la base aleatoria  $\Theta_{h,k}$ , y la función de filtrado  $\Psi$ .
- El símbolo  $Y_t$ ,  $Y \in \{-1,1\}^{M \times N_2}$  representa una medición de la señal de intensidad de imagen filtrada en el tiempo  $t$ , formada a partir del producto de la función de muestreo  $\Phi_{1,k}$ ,  $\Phi_{2,k}$  and  $\Phi_{3,k}$ , y la señal de imagen  $X_t$ , cuantificada por el signo ( $\cdot$ ) a dos niveles  $\{-1,1\}$ .
- 45 - El símbolo  $W_t$ ,  $W \in \{-M \dots M\}^{N_1 \times N_2}$ , representa una estimación de la señal de imagen filtrada, formada a partir del producto de la medición  $Y_t$  y la transposición de las funciones de base aleatoria  $\Theta_{1,k}$ ,  $\Theta_{2,k}$  y  $\Theta_{3,k}$  convolucionadas por  $\alpha$ .
- El símbolo  $\hat{Z}_{t-1}$ ,  $\hat{Z} \in \{-M \dots M\}^{N_1 \times N_2}$ , representa una estimación del producto de la señal de imagen original  $X$  y la función de filtrado  $\Psi$ , formado a partir de la adición de  $W_t$ ,  $W_{t-1}$  y  $W_{t-2}$ .
- 50 - El símbolo  $\Delta_{t-1}$ ,  $\Delta \in \{0,1,2 \dots N_i\}^{P \times N_2}$  representa parámetros de desviación de imagen de los extremos de señal local, es decir, los  $P$  picos de señal correspondientes de la señal  $Z$  de cada columna en el tiempo  $t - 1$ .

En consecuencia, al igual que con el proceso de la figura 2a, en el bloque 255, el proceso de la figura 2b recibe información representativa de energía luminosa de una escena, y en el bloque 256, el proceso genera de manera iterativa vectores de una medición de señales de intensidad de imagen en base a la energía luminosa

correspondiente de la imagen de la escena. Al igual que en el proceso de la figura 2a, las funciones proporcionadas por los bloques 255 y 256 se pueden realizar usando un sensor de imagen 251.

Sin embargo, en el proceso de la figura 2b, la generación de la medición se realiza usando una pluralidad de funciones de muestreo. En la realización de la figura 2b, se utilizan tres funciones de muestreo diferentes en cualquier periodo de tiempo  $t$ , con un periodo de tiempo anterior y un periodo de tiempo posterior, utilizando diferentes conjuntos de tres funciones de muestreo. Las nueve funciones de muestreo, o información, para generar las funciones de muestreo, pueden generarse de forma dinámica y / o almacenarse en la memoria 291 del sensor de imagen o asociarse con el mismo.

En el bloque 263, el proceso almacena temporalmente una medición  $Y_t$  de la señal de imagen  $X$  en un periodo de tiempo  $t$ . En la mayoría de realizaciones, la medición  $Y$  de la señal de imagen está formada por circuitos de, o asociados a, un sensor de imagen y almacenada en la memoria de, o asociada a, un procesador de imagen. Además, las operaciones de los bloques 265-281, que se describen a continuación, también pueden ser realizadas por circuitos de, o asociados con, el procesador de imagen.

En el bloque 265, el proceso calcula estimaciones parciales de la señal de imagen filtrada  $Z$ . En la realización de la figura 2b, la estimación  $W$  se determina tomando el producto de la transposición de la función de base aleatoria correspondiente  $\Theta_{h,k}$  y la medición  $Y_t$ , con una nueva estimación  $W$  formada para cada periodo de tiempo  $t$ .

En el bloque 267 el proceso convoluciona las adiciones parciales emitidas por el núcleo  $\alpha$  de bloque 265, que además de ajustar la estimación de la imagen filtrada como se ha descrito anteriormente, con respecto a la figura 2a, combina vectores de columna adyacentes, de modo que cada vector de columna se sustituye por la adición de sí mismo y sus adyacentes inmediatos a la izquierda y a la derecha.

En el bloque 279, el proceso combina las adiciones parciales emitidas por el bloque 267 a través de los tres periodos de tiempo anteriores para formar la estimación final de la señal de imagen filtrada  $Z$  en el periodo de tiempo  $t - 1$ , almacenando el resultado en el bloque 280. Al igual que en la figura 2a, los parámetros del plano de iluminación se determinan mediante el proceso del bloque 281, por ejemplo, usando un algoritmo de detección de pico.

La figura 3 es un diagrama de bloques de alto nivel que representa una arquitectura de sensor de imagen representativa de ciertos aspectos de la presente invención. El sensor de imagen de la figura 3 comprende: un búfer de almacenamiento de función de muestreo 300; búferes de entrada de registro de desplazamiento de función de muestreo 311, 312, 313; registros de desplazamiento de función de muestreo 321, 322, 323; una matriz de píxeles 301 con columnas de píxeles 331, 332, 333, 334 incluidas en la misma; una matriz de comparador de señales analógicas 340, incluyendo comparadores de señal analógica 341, 342, 343 y 344; líneas de señal de salida digital de 1 bit 351, 352, 353, 354; y un multiplexor de datos de salida 302. Cada una de las columnas de píxeles incluye una pluralidad de elementos de píxel. Generalmente, cada elemento de píxel incluye un sensor sensible a la radiación (sensible a la luz en la mayoría de las realizaciones) y circuitos asociados.

Los elementos de píxel de la matriz de píxeles 301 acumulan carga eléctrica fotogenerada en los sitios de almacenamiento de carga local. La carga fotogenerada en los píxeles de sensor de imagen puede considerarse una señal de intensidad de imagen en algunos aspectos. En algunas realizaciones, cada elemento de píxel incluye una capacitancia fija que convierte carga acumulada en una señal de tensión de píxel. Cada señal de tensión de píxel controla una fuente de corriente local, para proporcionar una señal de corriente de píxel. La fuente de corriente de píxel puede seleccionarse y conectarse, bajo el control de una función de muestreo, a una de las dos líneas de salida de señal disponibles por columna de píxeles. Las líneas de salida son compartidas por todos los píxeles de una columna, de manera que cada una de dos señales de salida de corriente formadas sobre una columna representa la adición de la corriente suministrada por los píxeles seleccionados.

Como puede verse a partir del uso de los tres registros de desplazamiento de función de muestreo, la realización de la figura 3 es adecuada para su uso en un sistema que implementa intercalado espacial (e intercalado espacio-temporal) como se ha descrito con respecto a la figura 2b. La arquitectura de la figura 3 también puede ser utilizada para la realización no intercalada de la figura 2a, bien con los tres registros de desplazamiento llenos de información idéntica, o con los tres registros de desplazamiento reemplazados por un único registro.

En algunas realizaciones de la presente invención, las hileras de la función de muestreo  $\phi_i$  se forman dinámicamente a partir de los contenidos de un búfer de memoria usando registros de desplazamiento. Hay tres hileras de función de muestreo diferentes activas en cualquier momento. El registro de desplazamiento de función de muestreo 321, que contiene  $\phi_{i,1,k}$ , proporciona las señales de control de salida para todos los píxeles en las columnas {1, 4, 7 ...}. El registro de desplazamiento de función de muestreo 322, que contiene  $\phi_{i,2,k}$ , proporciona el control de salida para todos los píxeles en las columnas {2, 5, 8 ...}. El registro de desplazamiento de función de muestreo 323, que contiene  $\phi_{i,3,k}$ , proporciona las señales de control de salida para todos los píxeles en las columnas {3, 6, 9 ...}. En algunas realizaciones de la presente invención, el búfer de almacenamiento de función de muestreo 300 es un búfer de memoria digital que contiene señales de control de píxel, consistiendo cada señal de control de píxel en 2-bits que representa cada una, si las hay, de las dos líneas de salida de corriente a seleccionar. En algunas realizaciones, a la memoria digital que contiene las señales de control se accede como palabras de 2 ( $m$ ) bits de longitud, donde  $m$

$\geq 2(\text{supp}(\psi))$ . En algunas realizaciones de la presente invención  $m = 16 \geq 2(\text{support}(\psi))$  y el ancho de datos de memoria es de 32-bits.

Para generar dinámicamente una nueva hilera  $i$  de las funciones de muestreo, el sensor de imagen de la figura 3 copia 3 palabras del búfer de almacenamiento 300 en búferes de entrada de registro de desplazamiento 311, 312, 313, a continuación, hace que el contenido de los búferes de entrada 311, 312, 313 y los registros de desplazamiento 321, 322, 323 desplacen conjuntamente  $m$  lugares. En algunas realizaciones, los registros de desplazamiento de función de muestreo 321, 322, 323 comprenden además un  $N_1$  registro duplicado largo de elemento para proporcionar un medio para mantener el estado de las señales de control de píxel aplicadas a la matriz de píxeles 301, mientras se produce la siguiente operación de desplazamiento. En algunas realizaciones de la presente invención, al búfer de memoria de función de muestreo 300 se accede según un patrón cíclico de manera que el proceso de llenado de registros de desplazamiento 321, 322, 323 con la primera hilera sólo tendrá que realizarse una vez, en la inicialización desde cero.

Después de la inicialización, se forman y se aplican nuevas hileras de la función de muestreo a la matriz de píxeles 301 para cada ciclo del registro de desplazamiento, creando así dos nuevas señales de salida de corriente por columna, indicativo de la adición de salidas de píxeles seleccionadas, para formar en las entradas de la matriz de comparador de corriente 340. Las dos señales de salida de corriente de una columna se comparan para formar un valor de 1 bit que es representativo de su magnitud relativa. Los bits de salida de columna, tomados juntos, representan una hilera de salida digital, y forman un vector de hilera de una medición de señales de intensidad de imagen en los píxeles de sensor de imagen de la matriz de píxeles. Las hileras de salida digital se multiplexan mediante el multiplexor 302 en palabras más pequeñas para formar un flujo de salida digital.

En operación, se generan  $M$  hileras de 3 funciones de muestreo diferentes para cada periodo de tiempo  $t$  a fin de formar una matriz de medición  $Y_t$ , consistiendo en algunas realizaciones en  $M$  bits para cada una de las  $N_2$  columnas de la matriz de píxeles. De acuerdo con las figuras 2a y 2b, cada bit de la matriz de medición  $y_{i,j}$  puede considerarse como el signo del producto vectorial de una columna de la matriz de píxeles  $x_{j,t}$  y una hilera de una de las funciones de muestreo  $\phi_{i,h,k}$ , como se explica anteriormente con respecto a la figura 2b.

Como se ha indicado anteriormente, un efecto de la cuantificación de signo (.) utilizada en la ecuación anterior es que la medición es generalmente incapaz de codificar el coeficiente DC de las frecuencias espaciales presentes en la señal de imagen. Por esta razón, algunas realizaciones de la presente invención proporcionan múltiples hileras de píxeles inactivos que pueden configurarse para proporcionar una ayuda conocida anterior a la salida de corriente cuando son seleccionados por la función de muestreo. De esta manera, creamos una expectativa de que ciertos píxeles en cada columna tendrán un valor constante conocido en una señal de imagen totalmente recuperada y correctamente a escala. Esto permite el cálculo de un factor de escala, para cada columna, que puede derivarse de la relación entre el valor esperado y el valor de señal reconstruida. Se pueden utilizar múltiples hileras porque el ruido en el coeficiente de escala reconstruida, que debe ser relativamente bajo para evitar ruido de amplificación en el cálculo de ajuste, se reduce en un factor proporcional a la raíz cuadrada del número de hileras que contienen la información de escala.

La figura 4 es un diagrama de circuito que muestra aspectos más detallados de partes de un sensor de imagen de acuerdo con aspectos de la invención. Las partes del sensor de imagen de la figura 4 son, en algunas realizaciones, partes del sensor de imagen de la figura 3. La realización de la figura 4 incluye una matriz de píxeles 400 (únicamente con cuatro elementos de la matriz de píxeles mostrados por motivos de claridad), un transportador de corriente 401, un limitador de corriente 402, un espejo de corriente 403, un comparador de corriente 404, líneas de control de salida de píxeles 405, un fotodiodo inmovilizado 406, un transistor de puesta a cero 407, una compuerta de transferencia 408, un transconductor 409, transistores de selección de salida 410, 411 y un nodo de difusión flotante 412.

En algunas realizaciones, cada píxel comprende el fotodiodo inmovilizado 406. El fotodiodo inmovilizado se puede poner a cero mediante el transistor de puesta a cero 407, dejando que acumule carga eléctrica fotogenerada durante un período de exposición, con la carga transferida al nodo de difusión flotante 412 a través de la compuerta de transferencia 408 para un almacenamiento temporal. La tensión en el nodo de difusión flotante  $V_{FD}$  controla el transconductor 409 para proporcionar una fuente de corriente que es proporcional a la señal de tensión. Dependiendo del estado de las líneas de control de píxeles 405, la corriente procedente de un píxel puede cambiarse a través de transistores 410 o 411 a una de dos líneas de salida de corriente compartidas por todos los píxeles de una columna. En términos conceptuales, las corrientes de salida de columna representan la adición simple de las corrientes procedentes de píxeles seleccionados, aunque en la práctica existen otros factores. Una estimación más realista incluye error de desviación y ganancia introducido por bloques de circuitos de lectura y el error de no linealidad introducido por el transductor 409, de la siguiente manera:

$$y_{i,j} = \text{signo} \left( \sum_{l=1}^{N_1} \phi_l (aV_{FD}(i,j)^2 + bV_{FD}(i,j) + c) \right)$$

donde a, b, y c son los coeficientes del segundo ajuste de orden para  $I = f(V_{FD})$ , siendo  $V_{FD}$  la tensión almacenada en la difusión flotante 412 de un píxel. Los coeficientes dependen del punto de funcionamiento del transistor ( $V_{dd}$ ,  $V_{0+}$  y  $V_{0-}$ ). Aunque los coeficientes a, b y c son aproximadamente iguales para todos los píxeles, puede ser necesario tener en cuenta cierto desajuste.

- 5 Las tensiones  $V_{0+}$  y  $V_{0-}$  de cada columna se fijan usando ambos transportadores de corriente. En algunas realizaciones, el transportador de corriente está basado en un solo transistor PMOS, donde.

$$V_{0-} = V_{gw} + V_t + \sqrt{\frac{I_{CC} + I_-}{\beta}} \quad y \quad V_{0+} = V_{gw} + V_t + \sqrt{\frac{I_{CC} + I_+}{\beta}}$$

- 10 El transportador de corriente 401 es polarizado con una corriente  $I_{CC}$  para asegurar la velocidad mínima necesaria para cumplir los requisitos de estabilización. Los ramales positivo y negativo se equilibran usando un espejo de corriente 403 y la señal se obtiene usando un comparador de corriente 404. Se incluye un limitador de corriente 402 para evitar problemas de interrupción causados por columnas de imagen que tienen un número excesivo de píxeles brillantes que accionan las líneas de salida de columna.

- 15 Otro aspecto de la presente invención es que las hileras de la medición  $Y_t$ , en algunas realizaciones, pueden formarse simultáneamente al desarrollo temporal de la señal de imagen  $X_t$  de manera que cada vector de hilera de la medición  $Y_t$  sea representativo del estado instantáneo de la señal de imagen  $Z_t$  cuando está integrada en los píxeles del sensor de imagen durante el intervalo de tiempo entre el restablecimiento de píxeles y el muestreo. En la mayoría de las realizaciones, cada elemento  $y_{i,j}$  de la medición  $Y$  es, efectivamente, normalizado por la función de signo (.). Sin embargo, dada la relación entre vectores de señal y de medición, tal como se explica en los antecedentes de la invención, la medición  $Y$  puede conceptualizarse basándose en la adición de  $M$  vectores de  
20 señal normalizados, como en lo siguiente:

$$y_{j,t} \sim \Phi \sum_{k=1}^M \frac{x_{j,t_k}}{\|x_{j,t_k}\|_2}$$

- 25 La formulación conceptual anterior sugiere que los elementos de los vectores de columnas de  $Z_t$  tenderán a conservar su relación correspondiente, en lo que se refiere a la magnitud, incluso después de que los dispositivos de almacenamiento de señales intrínsecas del sensor de imagen se hayan saturado. Este comportamiento puede entenderse intuitivamente a partir del hecho de que un porcentaje finito de la medición  $Y_t$  se genera durante un periodo de tiempo en el que los píxeles del sensor de imagen siguen funcionando en su rango lineal.

- 30 La figura 8 es un diagrama de relaciones de tiempo que ilustra la adquisición extendida de rango dinámico de acuerdo con aspectos de la invención. El diagrama de relaciones de tiempo incluye una señal de disparo TRIG, 841, una señal de restablecimiento RST, 842 y una señal de selección SEL, 843. Una vez que el fotodiodo se restablece, si la compuerta de transferencia del fotodiodo se mantiene activa durante  $M$  muestras de una determinada imagen, cada vector de la matriz de muestreo  $\Phi$  se aplica a señales de imagen asociadas a un tiempo de exposición cada vez mayor.

- 35 La señal de disparo indica el inicio de la adquisición de imágenes por un sensor. La señal de restablecimiento restablece nodos de difusión flotantes de píxeles en el sensor. La señal de selección selecciona la salida de píxeles seleccionados del sensor. Como se ilustra en la figura 8, la señal de selección obtiene  $M$  muestras de varios píxeles seleccionados, comenzando en el tiempo  $t_i$  y continuando hasta el tiempo  $t_m$ , 845. El tiempo  $t_i$  es generalmente algo después de que la señal de restablecimiento vaya lenta, para permitir un tiempo de exposición suficiente, y así, un tiempo de acumulación de carga, para que el píxel obtenga una respuesta válida. Este requisito de tiempo se designa  $T_{exp\_min}$ , tiempo mínimo de exposición, 844. Los píxeles permanecen expuestos durante el período de  $t_i$  a  $t_m$ .  
40 Por tanto, generalmente durante cada tiempo de muestreo sucesivo, de  $l$  a  $m$ , los píxeles tienen una duración de exposición aumentada, aumentando, de hecho, el rango dinámico del sensor.

- 45 En algunas realizaciones la obtención de la muestra y la acumulación de carga pueden producirse de forma sincrónica, por ejemplo, como se ilustra en el diagrama de relaciones de tiempo de la figura 8, con  $M$  muestras para que se obtenga una medición entre aplicaciones de la señal de restablecimiento. En otras realizaciones, la obtención de las  $M$  muestras para una medición puede ser interrumpida, con la señal de restablecimiento aplicada durante el período en el que se obtienen las  $M$  muestras, y el período de acumulación de carga puede ser asíncrono con respecto al período durante el cual se obtienen muestras para una medición.

- 50 En algunas implementaciones de la presente invención, un dispositivo de procesamiento paralelo, que tiene una arquitectura similar a la mostrada en la figura 5, se proporciona para procesar el flujo de medición. La figura 5 es un diagrama de bloques de una arquitectura de procesamiento compatible con aspectos de la presente invención.

La figura 5 incluye un búfer de entrada de medición 501; un búfer de procesamiento de medición 502; un buffer de función de base 504; un multiplicador de matriz 500 que incluye: un registro de medición 503, multiplicadores 505,

uniones aditivas 506 y registros de acumulación 507. También se incluyen en el procesador de la figura 5, un registro de adición parcial 508; un búfer de adición parcial 509; un procesador promediador de señal 510; un registro de hilera de reconstrucción de señal 511; un buffer de hilera de reconstrucción de señal 512; un procesador de detección de pico 513; un registro de parámetros de señal 514 y un búfer de salida 515.

- 5 En operación, un flujo de medición de entrada se escribe en el búfer de entrada de medición 501. Cuando una medición de periodo de tiempo completo  $Y_t$  está dispuesta en el búfer de entrada 501, se transfiere al búfer de procesamiento de medición 502. En la implementación aquí considerada, hileras de bits de mediciones son transferidas desde el búfer de medición 502 hasta el búfer de procesamiento de medición 503, una hilera cada vez para su procesamiento. Para formar cada elemento de  $w_{i,t}$  en el búfer 508, cada bit de cada columna  $y_j$  de la medición  $Y$  en el búfer 502 se multiplica por el bit correspondiente de un vector de columna  $\theta_{j,h,k}$  de la siguiente manera:

$$w_{i,j,t} = \sum_{l=1}^M \theta_{l,i,h,k} y_{l,j,t} \quad \text{donde } h = j\%3 + 1 \quad \text{y } k = t\%3 + 1$$

- 15 El vector de hilera de señal reconstruida  $\hat{z}_{i,t-1}$  en el registro 511 se forma en el procesador promediador de señal 510 sumando  $w_{i,t}$ , la salida del multiplicador de matriz 500, con la hilera correspondiente de los dos periodos de tiempo anteriores  $w_{i,t-1}$  y  $w_{i,t-2}$ , convolucionando después mediante el núcleo  $\alpha$ , como se ha explicado anteriormente con respecto a la figura 2a y la figura 2b. Los métodos para la implementación eficaz de tal funcionalidad de promediado de imagen serán bien conocidos por los expertos en la técnica de procesamiento de imagen digital de alta velocidad.

- 20 El procesador de detección de pico 513 procesa hileras de la señal reconstruida almacenada en el búfer 512 estimando los parámetros de desviación asociados con los puntos de intersección del plano de iluminación con objetos de interés. Recordemos que la señal reconstruida  $\hat{Z}$  es una estimación de la señal de imagen original  $X$  procesada por la función de filtrado espacial  $\Psi$ , que, en algunas implementaciones, es una aproximación por diferencia central de la primera derivada de la señal de imagen con respecto a las hileras. Los métodos conocidos para extraer desviaciones de tal señal de imagen filtrada  $Z = \Psi X$  incluyen etapas para encontrar y clasificar mínimos y máximos locales encontrados en cada columna de la imagen reconstruida, emparejar pares mín / máx adyacentes para encontrar puntos de interés, clasificar puntos de interés en cada columna en orden de magnitud diferencial y formar el vector de coordenadas de desvío  $\Delta \in \{1, 2, 3 \dots N_j\}^{P \times N_2}$  a partir de  $P \times N_2$  coordenadas de desvío de hilera de esos  $P$  puntos de interés. Otras etapas pueden incluir interpolación para estimar parámetros de subpíxeles y reducir el conjunto de coordenadas para eliminar aquellos puntos que sean incompatibles con respecto a una expectativa a priori relativa a la superficie del objeto de interés. Los métodos para la implementación eficiente de tal funcionalidad de detección de pico serán bien conocidos por los expertos en la técnica de la visión artificial.

- 30 En algunas realizaciones, se puede formar una aproximación más precisa de la señal  $Z$  en base a la función de base  $\Theta$  y a la medición  $Y$ .

- 35 La figura 7 es un diagrama que muestra un método para formar sucesivamente aproximaciones más exactas de la señal de imagen  $\hat{Z}$ . La figura 7 incluye un organigrama 700 y una ilustración explicativa 750. El organigrama 700 incluye: 701 inicializar el búfer de imagen reconstruido, 702 filtrar espacialmente la imagen reconstruida, 703 calcular un error de reconstrucción, 704 probar el error de reconstrucción, 705 calcular un gradiente de señal 706 formando una nueva imagen reconstruida en el búfer de almacenamiento 707 y 708 leyendo el resultado final a partir del búfer de almacenamiento 707.

- 40 El método de reconstrucción del organigrama 700 se puede explicar con la ayuda del dibujo ilustrativo 750 como sigue:

701. El vector de medición original  $Y$  se transforma desde el espacio de medición hasta el espacio de señal para formar una primera aproximación de la señal  $Z_1$ .

- 45 702. La primera aproximación de la señal  $Z_1$  se filtra para formar una segunda aproximación  $Z_2$  (no mostrada). El filtrado comprende la transformación lineal o no lineal de la señal destinada a proteger la información relevante de la señal, atenuando al mismo tiempo el ruido de la reconstrucción.

703. La segunda aproximación  $Z_2$  se transforma de nuevo en el dominio de medición para formar un segundo vector de medición que se resta del vector de medición original  $Y$  para formar un gradiente de medición  $dY$ .

704. Si la magnitud del gradiente de medición  $\|dY\|_2$  es suficientemente pequeña, la primera aproximación de corriente de la señal  $\hat{Z} = Z_1$  se informa como la mejor aproximación de la señal  $Z$ .

- 50 705. A falta de 704, el gradiente de medición  $dY$  se transforma en espacio de señal para formar un gradiente de señal  $dZ$ .

706. El gradiente de señal  $dZ$  se añade a la segunda aproximación de la señal  $Z_2$  para crear una nueva primera aproximación de la señal  $Z_1$  y el proceso de reconstrucción vuelve a la etapa 702.

- 5 El método del organigrama 700 se basa en el conocimiento a priori de la señal de imagen  $Z$ , en concreto el conocimiento de que el contenido de información es pequeño en comparación con la dimensión de la señal. La primera aproximación de la señal, calculada en 701, se supone que comprende una señal dispersa más el ruido de muestreo y otro ruido asumido para aumentar la complejidad. El proceso de filtrado de 702 está diseñado para restringir la aproximación de señal al nivel de contenido de información o de dispersión que se anticipa en la señal original. Aunque la segunda aproximación de señal puede tener la misma dispersión que la señal original, no se garantiza que esté suficientemente cerca de la señal original para representar una aproximación suficientemente precisa. Puesto que la señal original  $Z$  es desconocida, no hay manera directa de probar la exactitud de la aproximación  $Z_2$ . Sin embargo, existe un método indirecto, que consiste en transformar la aproximación de la señal de nuevo en espacio de medición y calcular la distancia al vector de medición, siendo el vector de medición conocido con precisión. Puesto que existe una relación conocida entre la distancia en el espacio de medición y la distancia en el espacio de señal (como se explica en los antecedentes de la invención) se puede deducir, a partir del vector de gradiente en el espacio de medición, un vector de gradiente en el espacio de señal que, en efecto, apunta en la dirección de la señal original. Mediante la adición del vector de gradiente de señal a la aproximación de corriente, formamos una nueva aproximación de señal que está más cerca de la señal original. El proceso anterior de filtrado, formación y aplicación de gradientes puede repetirse hasta que el vector de medición formado a partir de la imagen filtrada esté suficientemente cerca del vector de medición real o hasta que el vector de gradiente formado en el espacio de medición deje de hacerse más pequeño, indicando que se han sobrepasado los límites de exactitud de la función de muestreo.
- 10
- 15
- 20 En la literatura de detección compresiva, los métodos conocidos similares a los anteriores incluyen BIHT (Umbralización Dura Binaria), denominada en relación al proceso de filtrar la señal reconstruida mediante un método de puesta a cero de todos los coeficientes excepto  $K$ , donde  $K$  es la dispersión conocida de la señal en una base específica. Aunque este método de filtrado puede ser eficaz, en la práctica puede ser difícil de implementar eficazmente. En algunas aplicaciones, un filtro mediano simple aplicado a  $Z_1$  puede desempeñar el mismo papel que métodos más complicados de truncamiento de coeficientes, aunque es más fácil de implementar y no depende del conocimiento exacto de la dispersión  $K$  de la señal de imagen original o del conocimiento de (o una búsqueda de) una base compresiva máxima en la que aplicar el proceso umbral.
- 25

Aunque la invención se ha descrito con respecto a diversas realizaciones, debe reconocerse que la invención está definida por las reivindicaciones.

30

**REIVINDICACIONES**

1. Método útil para determinar información de una imagen de una escena iluminada por un plano de luz formado por un generador de línea láser, que comprende:
  - 5 acumular una primera señal de píxel basada en energía luminosa incidente para cada uno de una pluralidad de elementos de píxel de una matriz de píxeles (301, 400), en el que la matriz de píxeles incluye  $N_1$  hileras de elementos de píxel,  $N_2$  columnas (331, 332, 333, 334) de elementos de píxel, comprendiendo cada uno de los elementos de píxel
    - un sensor de luz (406), siendo las primeras señales de píxel indicativas de una imagen (X) de la escena iluminada por el plano de luz, y
    - 10 una fuente de corriente (409) para proporcionar una corriente que es proporcional a la primera señal de píxel acumulada en el elemento de píxel correspondiente; y
    - obtener una medición (Y) indicativa de la imagen de la escena iluminada por el plano de luz mediante:
      - la aplicación, en  $M$  repeticiones, de  $M$  conjuntos de  $N_1$  señales de control a  $N_1$  líneas de control de píxeles (405) correspondientes a  $N_1$  hileras de los elementos de píxel para controlar un estado de las  $N_1$  líneas de control de píxeles (405), compartiendo los elementos de píxel de cada hilera señales de control comunes, no estando cada uno de los  $M$  conjuntos de  $N_1$  señales de control sustancialmente correlacionado con los otros, siendo cada uno de  $M$  conjuntos de  $N_1$  señales de control representativo de un vector diferente de una matriz de muestreo ( $\Phi$ ) que comprende un producto de una función de base aleatoria ( $\Theta$ ) y una función de filtrado ( $\Psi$ ) para hacer pasar generalmente frecuencias espaciales asociadas a partes de la imagen correspondiente a la línea láser y para rechazar sustancialmente frecuencias espaciales asociadas a partes de la imagen que incluyen ruido y otra información de imagen no deseada,
      - 15 la agrupación, de acuerdo con las señales de control, para cada uno de los  $M$  conjuntos de  $N_1$  señales de control, de dos señales de salida de corriente basadas en las primeras señales de píxel para cada una de las  $N_2$  columnas de elementos de píxel, en el que la agrupación comprende, para cada columna de elementos de píxel,
      - 20 seleccionar elementos de píxel de la columna en base al estado de las líneas de control de píxeles (405) controladas por la matriz de muestreo, y
      - cambiar la corriente procedente de cada elemento de píxel seleccionado de la columna, en base al estado de una línea de control de píxeles correspondiente, a una de dos líneas de salida de corriente compartidas por todos los elementos de píxel de la columna, de manera que cada una de las dos señales de salida de corriente formadas en la columna represente una adición de corriente procedente de los elementos de píxel seleccionados, y
      - 30 obtener una hilera de la medición (Y) indicativa de la imagen de la escena iluminada por el plano de luz digitalizando, para cada columna de elementos de píxel, las dos señales de salida de corriente formadas en las dos líneas de salida de corriente compartidas por todos los elementos de píxel de la columna, en el que la digitalización comprende comparar las dos señales de salida de corriente y formar un valor de 1 bit que sea representativo de su magnitud relativa.
      - 35
  2. Método según la reivindicación 1, en el que las primeras señales de píxel comprenden señales de tensión.
  3. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que  $M$  es mucho menor que  $N_1$ .
  4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además escribir un flujo de medición que comprende las hileras obtenidas de la medición (Y) en un búfer (501), almacenando el búfer (501) la medición (Y) indicativa de la imagen de la escena.
  - 40
  5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la función de filtrado se basa en una aproximación por diferencia central de la primera derivada parcial con respecto a hileras de la señal de imagen (X).
  6. Método según la reivindicación 5, que comprende, además
    - determinar una estimación (W) de una imagen filtrada de la escena iluminada por el plano de luz mediante la formación de un producto de una transposición de la función de base aleatoria y la medición,
    - 45
    - ajustar la estimación de la imagen filtrada mediante convolución con un núcleo ( $\alpha$ ) para obtener una estimación ajustada (Z) de la imagen filtrada, y
    - determinar, usando un algoritmo de detección de pico, picos ( $\Delta$ ) de la estimación ajustada.

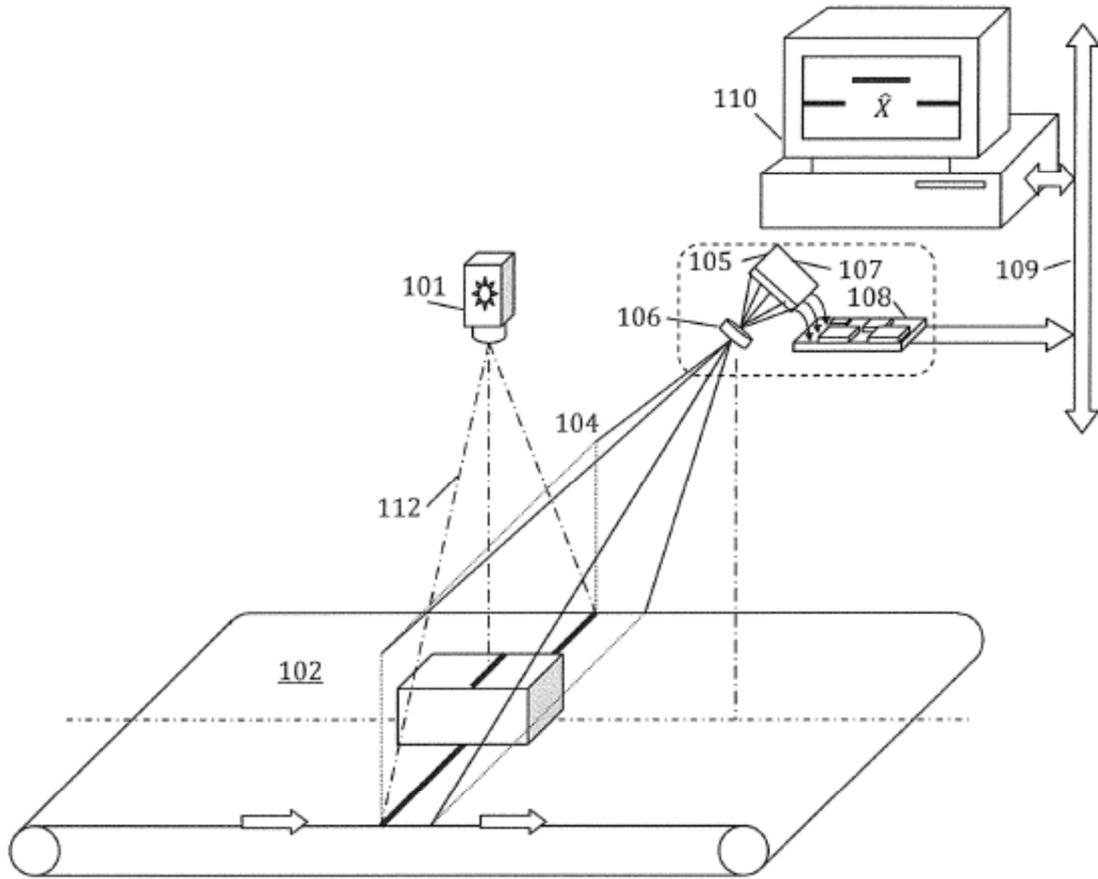


Fig. 1a

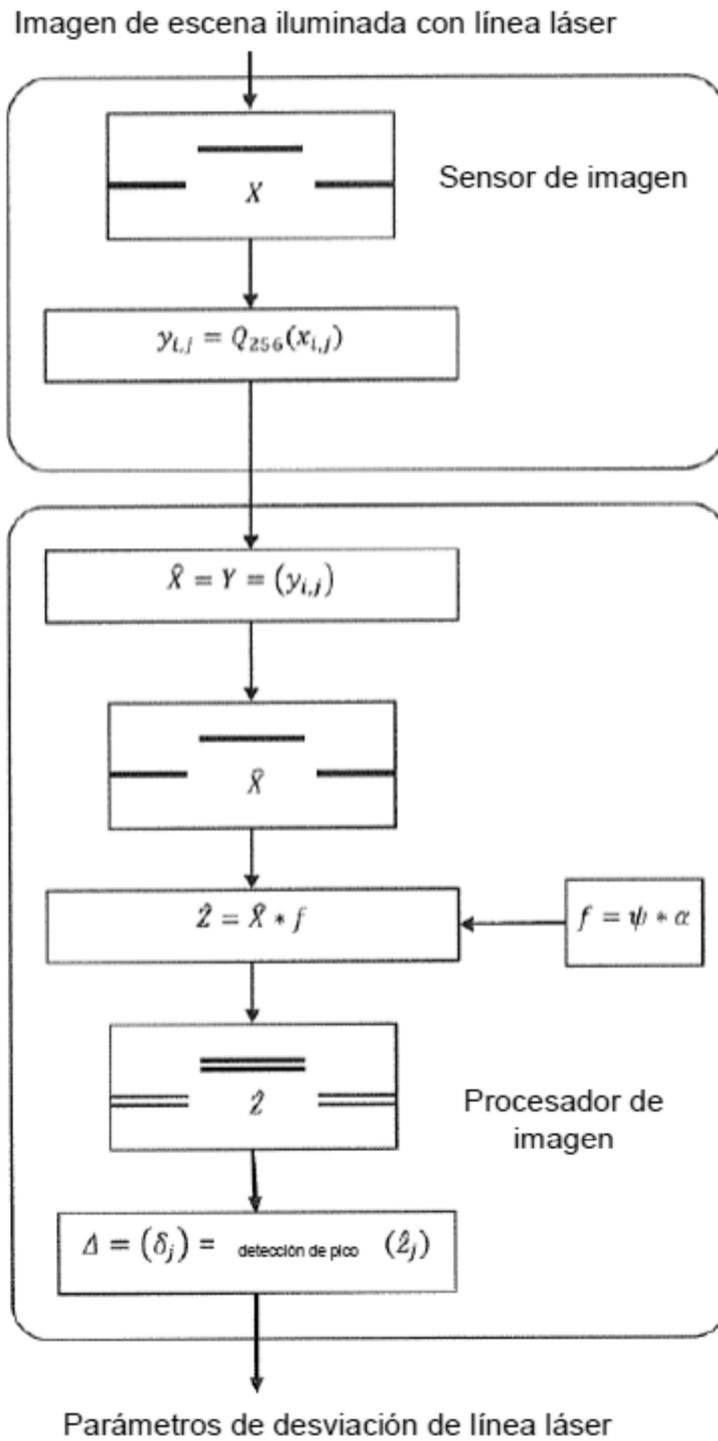


Fig. 1b

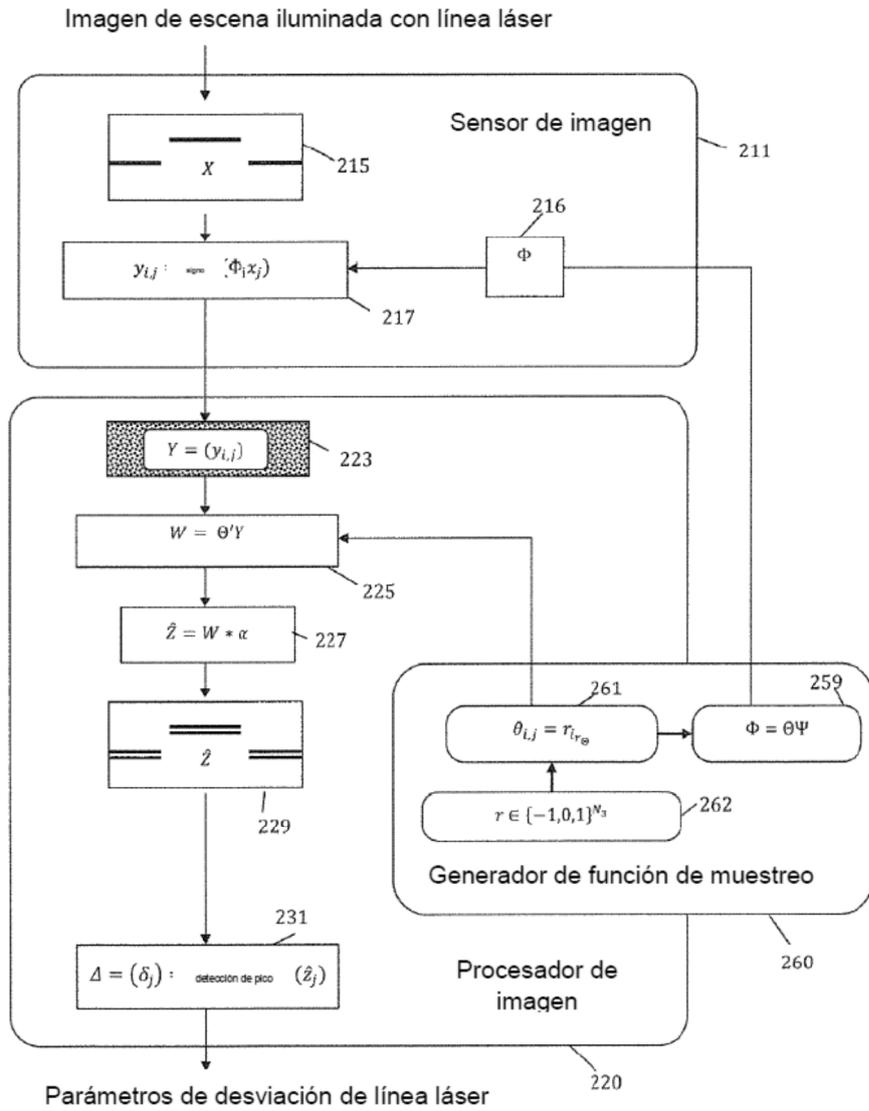
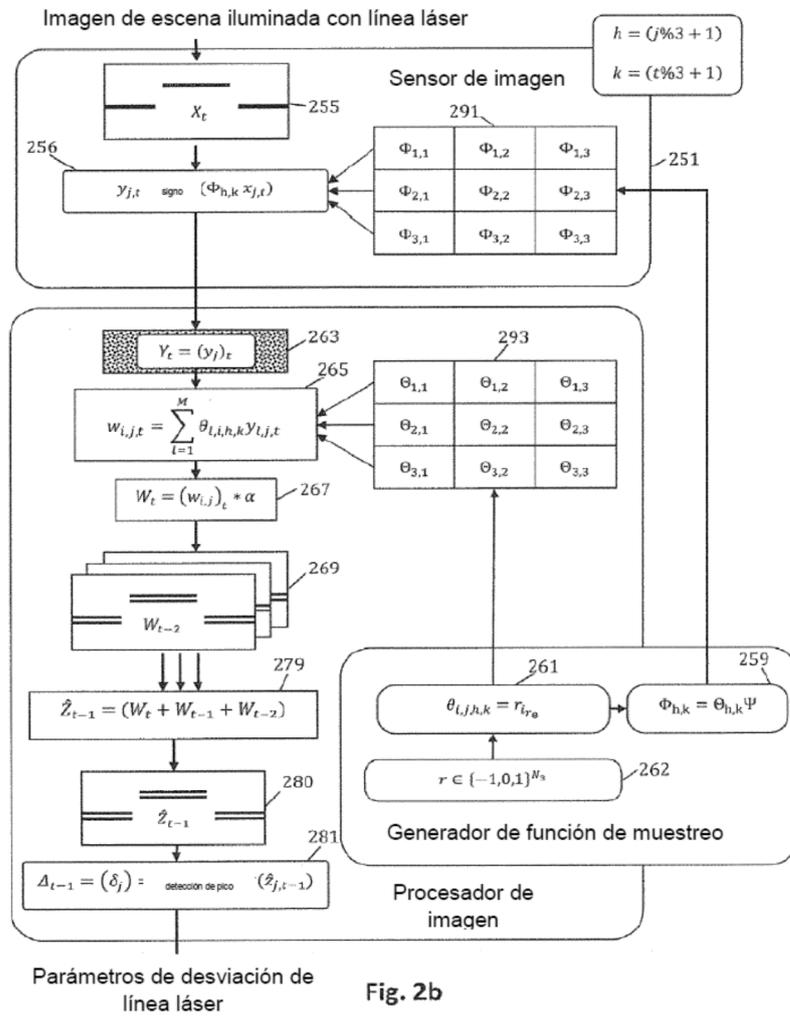


Fig. 2a



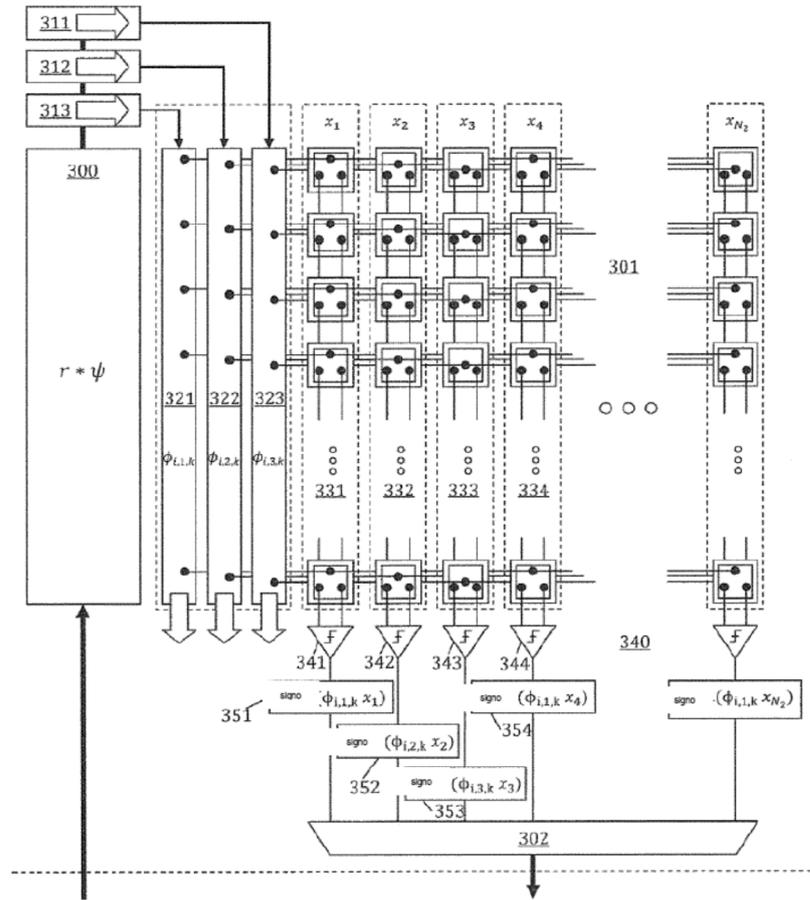


Fig. 3

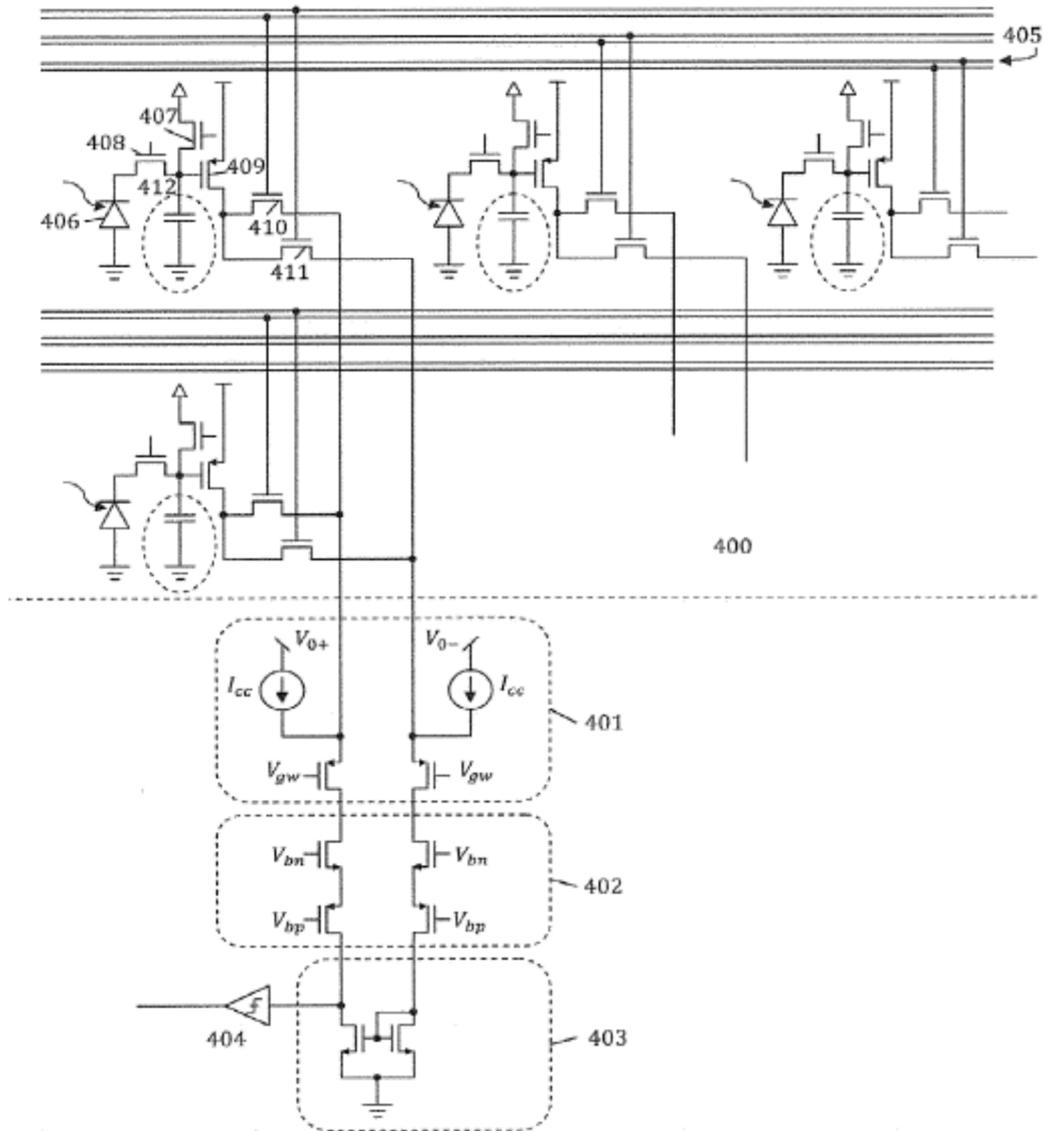


Fig. 4

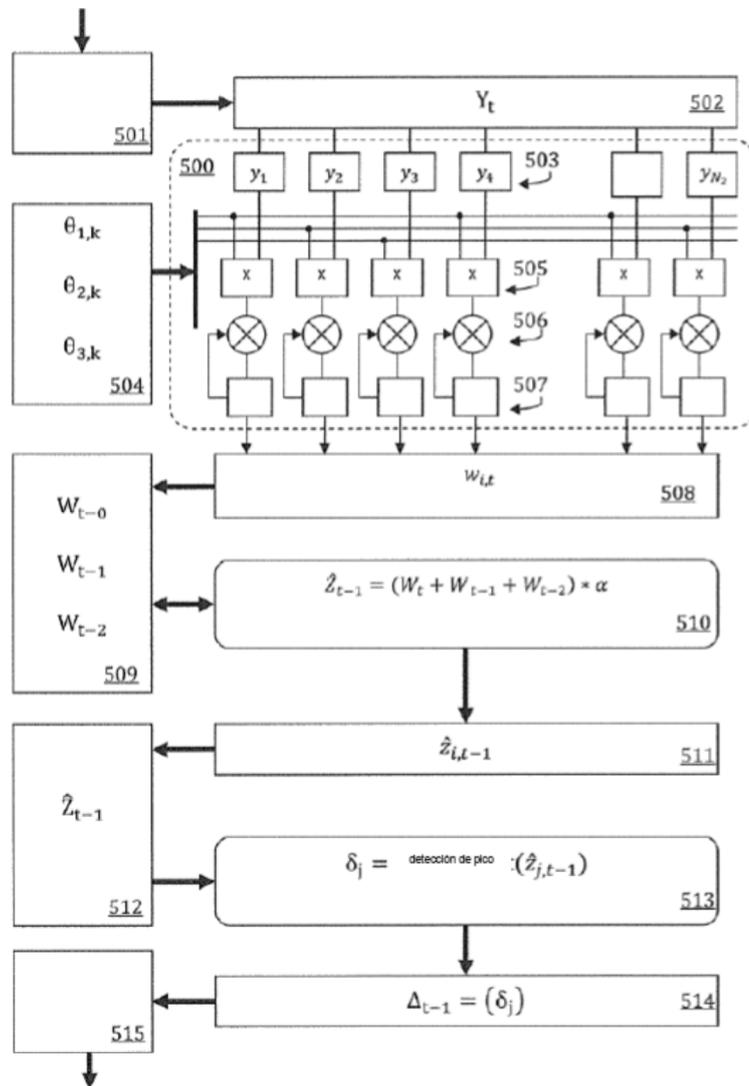


Fig. 5

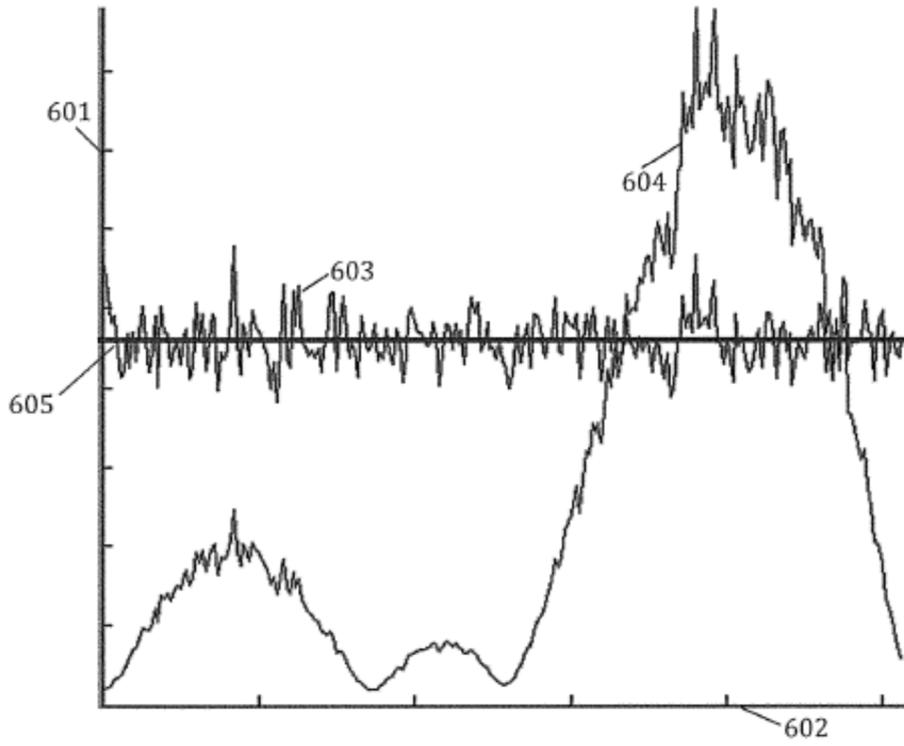


Fig. 6

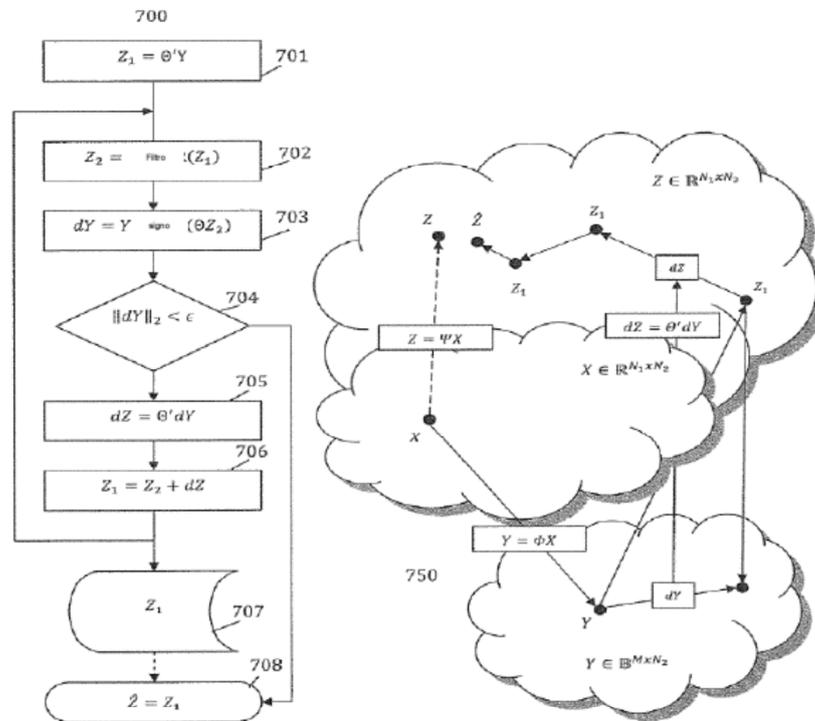


Fig. 7

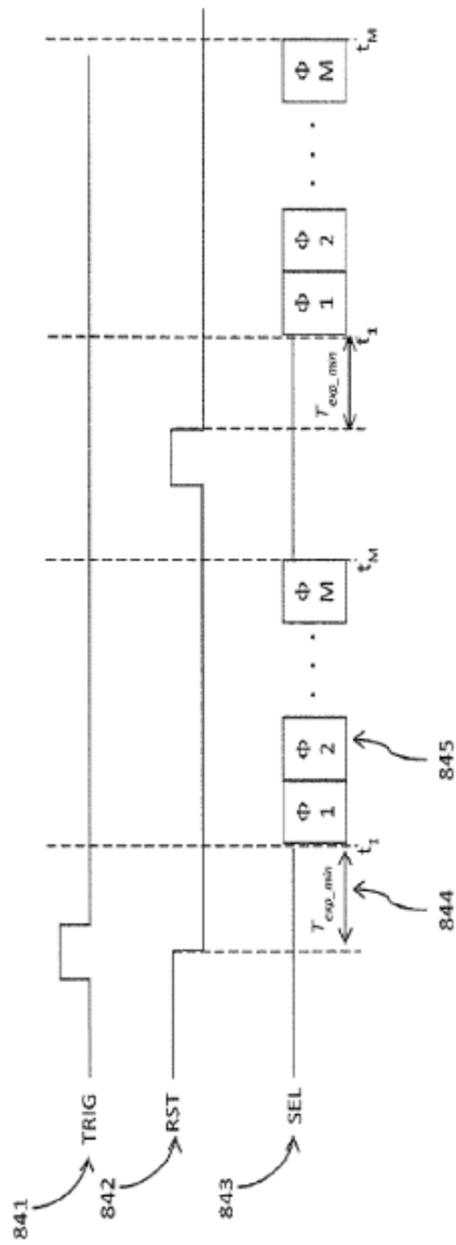


Fig. 8