

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 512 502**

51 Int. Cl.:

G01T 1/167 (2006.01)

G01V 5/00 (2006.01)

G01T 1/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.02.2006 E 06848837 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.07.2014 EP 1891463**

54 Título: **Aparato y método para la detección de materiales radiactivos**

30 Prioridad:

28.02.2005 US 656980 P

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

24.10.2014

73 Titular/es:

**IMAGE INSIGHT INC. (100.0%)
87 Church Street
East Hartford, CT 06108-3728, US**

72 Inventor/es:

RUBENSTEIN, ERIC P.

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 512 502 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

Aparato y método para la detección de materiales radiactivos

Antecedentes

5 La capacidad para detectar el transporte no autorizado de materiales radiactivos se podría facilitar mediante una red a gran escala de detectores de radiación. Sin embargo, la instalación de tal red de detectores de radiación podría ser costosa y retrasar la preparación del sistema.

10 Las redes de detección de radiación se están desarrollando en Europa para el caso de un accidente de una central de energía nuclear. Por ejemplo, el sistema de ayuda de decisión en línea en tiempo real (Real-time On-line Decision Support, RODOS) para la gestión exterior de emergencias de Europa se está planificando para que proporcione información coherente y completa de situaciones radiológicas presentes y futuras, la extensión, beneficios y desventajas de las acciones y contramedidas de emergencia, y ayuda metodológica para tomar decisiones en estrategias de respuesta a emergencias. RODOS incluye módulos de detección de propagación geográfica, meteorológica y la radiación; también sirve como punto de acumulación de datos para redes de monitorización radiológica y atmosférica. Los datos de detección de radiación proporcionados por los detectores de la red podrían complementar y enriquecer las bases de datos de radiación tales como RODOS disponibles para las autoridades de seguridad y las agencias de recuperación de desastres.

20 La capacidad de detectar el transporte no autorizado de materiales radiactivos en grandes áreas es apremiante debido a la disgregación de países que poseen armas nucleares y reactores nucleares. El contrabando de radioisótopos y la venta de material radiactivo en el mercado negro han aumentado considerablemente en un pasado reciente. Un informe de la Oficina General de Cuentas (General Accounting Office) documenta algunos de los 181 casos confirmados por la Agencia de Energía Atómica Internacional (International Atomic Energy Agency, IAEA) de venta ilegal de material nuclear desde 1992. Veinte de estos incidentes implicaron la transferencia o el intento de transferencia de material utilizable en armas nucleares, en concreto Pu-239 y Uranio Altamente Enriquecido (Highly Enriched Uranium, HEU) en un 20 %-90 %. Aunque el riesgo más preocupante del material radiológico clandestino está relacionado con el uso de HEU en la construcción de una bomba nuclear, también se podría utilizar el HEU como materia prima para un Dispositivo de Dispersión Radiológica (Radiological Dispersal Device) o "bomba sucia". En realidad, se puede usar cualquier radioisótopo en la construcción de una bomba sucia. Sin embargo, algunos radioisótopos, por ejemplo Cs-137, Sr-90, o Co-60, son más peligrosos que los demás para esta aplicación. Por ejemplo, el U-235, debido a su nivel de actividad de rayos gamma comparativamente inferior, es mucho menos peligroso que una masa comparable de Co-60. Las bombas sucias podrían ser económicamente devastadoras para una región debido al elevado gasto de descontaminación, limpieza, y la pérdida económica que producirían si se detonaran.

35 El material radiactivo dispersado a través de la detonación de un explosivo convencional podría ser económicamente devastador para la región afectada. El acceso a material nuclear no utilizable en armas es habitualmente más fácil que a HEU o Pu-239, aumentando la amenaza de bombas sucias que surge de los materiales no utilizables en armas. Esta amenaza se acrecienta por el hecho de que el contrabando nuclear se produce habitualmente en cantidades que casi nunca exceden de un kilogramo y que casi todos los casos de contrabando se detectaron debido a investigaciones policiales. Los costes de limpieza de incluso esta pequeña cantidad de material radiactivo podrían ser enormes. Es mejor detectar el transporte ilegal de materiales radiológicos e interceptarlo en una etapa inicial.

40 Existe la necesidad de detectar el transporte ilegal de material radiactivo. Existe la necesidad de una red de detectores rentable y de amplia difusión que pueda detectar material radiactivo, identificar su localización, y proporcionar una alerta cuando se detecte este tipo de material.

45 En el documento de solicitud de patente internacional WO95/14245 se desvela un dispositivo para monitorizar un área de una central de energía nuclear. Este dispositivo usa un detector que comprende una máscara codificada, un centelleador y un conjunto de dispositivos CCD. El documento menciona la posibilidad de crear una superposición de la imagen visual del área y de la imagen de radiación.

50 El documento A. M. Chugg *et al.*, "A CCD Miniature Radiation Monitor", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, No. 3, pp. 1327-1332, desvela un detector de radiación para uso en entornos espaciales. El dispositivo comprende un CCD dispuesto detrás de un agujero de aguja y protegido de la luz solar.

Sumario

Realizaciones de la presente invención incluyen un sistema que incluye un generador de imágenes con uno o más píxeles que son capaces de interactuar con partículas de alta energía y transmitir información con referencia a la

interacción de la partícula de alta energía con el píxel mientras que obtiene simultáneamente una imagen. El sistema también incluye al menos un procesador que está en comunicación con el generador de imágenes, que es capaz de determinar que un píxel o píxeles han interactuado con una o más partículas de alta energía. El sistema incluye además un dispositivo de salida que informa de la presencia de la partícula de alta energía.

5 Los generadores de imágenes pueden ser cualquier generador de imágenes que contenga un detector de fotones pixelado incluyendo generadores de imágenes con dispositivos de carga acoplada (CCD), generadores de imágenes con semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), y generadores de imágenes que contienen sustratos de silicio-germanio, germanio, silicio sobre zafiro, indio-galio-arseniuro, cadmio-mercurio-telururo o galio-arseniuro, y similares, o combinaciones de estos generadores de imágenes. En las realizaciones de la presente invención también se pueden usar cámaras de seguridad, cámaras de tráfico, cámaras de tránsito, cámaras de mano, cámaras móviles de tráfico o para el cumplimiento de la ley, cámaras de teléfonos móviles, cámaras térmicas de infrarrojo, y cualquier combinación de estas cámaras. Los generadores de imágenes usados en la presente invención pueden ser estacionarios o móviles. En una realización preferente de la invención, los generadores de imágenes pueden rotar alrededor de un eje vertical, o panorámico, y rotar alrededor de un eje horizontal, o de inclinación. Esto permite
10
15 al generador de imágenes rastrear la fuente radiactiva de las partículas de alta energía.

En ciertas realizaciones, las partículas de alta energía detectadas por el generador o generadores de imágenes pueden ser producto de una fuente de partículas de alta energía que pueden ser la fuente del decaimiento nuclear de material radiactivo. La fuente de partículas de alta energía incluye, pero no se limita a, radiación ambiental, radiación de fuentes naturales, materiales radiactivos, dispositivos nucleares, bombas sucias y armas nucleares antes o después de su detonación o combinaciones de las mismas. Las partículas de alta energía detectadas se pueden producir preferentemente a partir del decaimiento nuclear de materiales radiactivos. La fuente de partículas de alta energía también puede estar protegida.
20

Los píxeles del detector de fotones pixelado producen una señal cuando una partícula de alta energía impacta en el píxel, y esta señal es generalmente más fuerte que la de la radiación de fondo ambiente. Esta señal puede ser una mancha o "punto" brillante en la imagen creada por el generador de imágenes. El procesador identifica estos puntos. Cuando una partícula de alta energía impacta en un píxel, la carga del píxel cambia de forma más significativa que cuando la luz ambiente impacta en el píxel haciendo que se forme un punto, dado que el generador de imágenes lee este cambio en la carga, en forma de una mancha brillante en la imagen. El procesador de la presente invención identifica los puntos dentro de la imagen y los compara con el fondo. Si el procesador detecta el punto en imágenes consecutivas, se puede haber producido un suceso de radiación.
25
30

En una realización de la presente invención, el procesador puede identificar la presencia de una partícula radiactiva así como la fuente de la partícula radiactiva. El procesador puede ser un ordenador, un procesador de imágenes de video o cualquier combinación de estos.

En otra realización de la presente invención, el generador de imágenes contiene un cuadrado delgado de píxeles. La probabilidad de que una partícula de alta energía alcance el cuadrado delgado de píxeles presenta un máximo (flujo máximo) cuando el cuadrado delgado de píxeles es perpendicular a la fuente de las partículas de alta energía. La probabilidad de que una partícula de alta energía alcance el cuadrado delgado de píxeles disminuye a medida que el generador de imágenes toma una panorámica y/o se inclina alejándose de la fuente o la fuente se mueve a través del campo de visión de los generadores de imágenes. En ciertas realizaciones, el procesador puede realizar una búsqueda en gradiente para determinar el flujo máximo controlando el movimiento de uno o más generadores de imágenes hasta que se alcanza el flujo máximo. En otra realización más, varios generadores de imágenes realizan una búsqueda en gradiente simultáneamente. El procesador puede consultar entonces cada generador de imágenes y comparar las imágenes fotográficas y/o de video obtenidas por los generadores de imágenes para determinar la fuente probable de las partículas de alta energía como el área donde intersectan las imágenes. Los generadores de imágenes están preferentemente interconectados.
35
40
45

También se puede determinar el movimiento de una fuente de partículas de alta energía a lo largo del tiempo permitiendo de ese modo seguir el movimiento de la fuente. En una realización preferente de la presente invención, uno o más generadores de imágenes realizan búsquedas en gradiente mientras que se obtienen simultáneamente imágenes del área circundante a la fuente radiactiva. Las imágenes y el flujo máximo se comparan con las imágenes y se pueden seleccionar un objeto u objetos en las imágenes que contienen o albergan probablemente la fuente radiactiva. Los objetos pueden ser cualquier objeto animado o inanimado incluyendo, por ejemplo, vehículos a motor, aviones, trenes, vagones de tren subterráneo, personas, animales, edificios, vegetación, equipaje, cajas, bolsas, bolsos, maletines, correo, y las combinaciones de los mismos.
50

Las imágenes obtenidas por los generadores de imágenes pueden contener o ilustrar el movimiento de objetos dentro del campo de visión de la cámara. En una realización de la presente invención, los objetos están mezclados entre imágenes y/o generadores de imágenes que permiten que se pueda localizar la fuente de partículas de alta energía. En una realización preferente, se hace una determinación visual de la fuente de partículas de alta energía.
55

Dispositivos de salida útiles en las realizaciones de la presente invención incluyen un sistema de alarma, una imagen fotográfica o de video, una imagen en un monitor, un sonido audible, una llamada telefónica, una transmisión de radio o múltiples o combinaciones de estos.

- 5 En realizaciones adicionales de la presente invención, se puede determinar el tipo de material radiactivo o radioisótopo que produce las partículas de alta energía. Se puede cuantificar el número y la energía de las partículas de alta energía basándose en el cambio en la carga del píxel con el que ha interactuado la partícula de alta energía. Esta cuantificación se puede comparar con una biblioteca de cambios de carga basados en tipos de material radiactivo que producen partículas de alta energía y usarse para determinar la cantidad y/o tipo de material radiactivo de la fuente.
- 10 En ciertas realizaciones, se puede evaluar la detección para la detección de falsos positivos de material radiactivo antes o después de la activación de un sistema de alarma.

Estas y otras características, aspectos, y ventajas de la presente invención se comprenderán mejor al hilo de la siguiente descripción, reivindicaciones anexas, y dibujos complementarios.

Breve descripción de las figuras

- 15 La Figura 1 representa las coordenadas de píxeles de impactos de rayos gamma en el CCD de una cámara de video digital de banco de pruebas. Los datos se suman durante 15 segundos de video y representan casi dos impactos de rayos gamma por segundo con solo 16 μC de radiactividad, localizados a 1,5 cm del detector CCD.
- La Figura 2A muestra una imagen astronómica de un detector CCD antes del análisis y la identificación de partículas de alta energía en la imagen; la Figura 2B ilustra la identificación de señales debidas a partículas de alta energía que interactúan con los píxeles.
- 20 La Figura 3 ilustra la señal que se podría esperar medir para una fuente de radiación en movimiento que se mide usando las versiones del aparato y los métodos desvelados.
- La Figura 4 ilustra la forma en que se pueden usar dos detectores separados, por ejemplo, cámaras de tráfico CCD en red, para separar objetos que producen radiación o que emiten partículas de alta energía de otros objetos que no producen o portan material radiactivo perjudicial.
- 25 Las Figuras 5(A-D) representan experimentos de control realizados usando una *webcam* Logitech, un dispositivo basado en CCD, que recoge 15 segundos de video en 15 fotogramas/s. La Figura 5(A) se refiere al "Control-1", la Figura 5(B) se refiere al "Control-2", la Figura 5(C) se refiere al "Control-3" y la Figura 5(D) se refiere al "Control-4".
- Las Figuras 6 (A-C) ilustran los resultados de los experimentos realizados con materiales de fuente radiactiva de 16 μC , según se describen en la Tabla 1 y la Tabla 2.
- 30 La Figura 7 ilustra un diagrama de flujo para la adquisición y el análisis de imágenes de un detector pixelado capaz de detectar partículas de alta energía emitidas por decaimiento nuclear de materiales radiactivos de acuerdo con una realización.
- La Figura 8 ilustra la adquisición y el análisis de imágenes de uno o más generadores de imágenes capaces de detectar partículas de alta energía emitidas por decaimiento nuclear de materiales radiactivos de acuerdo con una realización.
- 35 La Figura 9 representa un diagrama de flujo para la adquisición y el análisis de imágenes de uno o más generadores de imágenes capaces de detectar partículas de alta energía emitidas por decaimiento nuclear de materiales radiactivos de acuerdo con una realización.
- 40 La Figura 10 representa un diagrama de flujo que ilustra una rutina para adquirir y procesar imágenes de un generador de imágenes pixelado para localizar evidencias de rayos gamma emitidos por un material de acuerdo con una realización.
- La Figura 11 representa un diagrama de flujo que ilustra una rutina para adquirir y analizar imágenes de un generador de imágenes pixelado para localizar evidencias de rayos gamma emitidos por un material de acuerdo con una realización.
- 45 La Figura 12 representa un diagrama de flujo que ilustra una rutina para analizar imágenes de un generador de imágenes pixelado para localizar evidencias de rayos gamma emitidos por un material de acuerdo con una realización.
- La Figura 13 representa un diagrama de flujo que ilustra una rutina para proporcionar un aviso o alarma a un usuario o centro de mando y proporcionar el seguimiento de la fuente y/o además el análisis para determinar la localización, movimiento, o tipo de radiación que emite el material de la fuente de acuerdo con una realización.
- 50 La Figura 14 ilustra un ejemplo no limitante de un aparato para detectar rayos gamma emitidos por un material utilizando un detector pixelado.
- La Figura 15 ilustra esquemáticamente uno o más detectores fijos o móviles, capaces cada uno de movimiento o traslación para detectar fotones de alta energía de un material radiactivo de acuerdo con una realización.
- 55 La Figura 16(A) ilustra las imágenes de un detector sin detecciones de rayos gamma, y la Figura 16(B) con detecciones de rayos gamma en forma de motas de color blanco (en el interior de círculos de color blanco).

Descripción detallada

Antes de que se describan las presentes composiciones y métodos, se ha de entender que la presente invención no se limita a las composiciones, metodologías o protocolos particulares descritos, ya que estos pueden variar. También se ha de entender que la terminología usada en la descripción es con el fin de describir solo las versiones o realizaciones particulares, y no se pretende que limite el alcance de las presentes composiciones y métodos que quedarán limitados únicamente por las reivindicaciones anexas.

También se debe indicar que, como se usa en el presente documento y en las reivindicaciones anexas, las formas en singular "un", "uno", "una", "el" y "la" incluyen las referencias en plural a menos que el contexto indique claramente lo contrario. De ese modo, por ejemplo, la referencia a un "rayo gamma" es una referencia a uno o más rayos gamma y equivalentes de los mismos conocidos por los expertos en la materia, etc. A menos que se defina lo contrario, todos los términos técnicos y científicos que se usan en el presente documento tienen los mismos significados que entienden habitualmente los expertos habituales en la materia. Aunque se puede usar cualquier método y material similar o equivalente a los que se describen en el presente documento en la práctica o el ensayo de las realizaciones de la presente invención, a continuación se describen los métodos, dispositivos, y materiales preferentes.

"Opcional" u "opcionalmente" significa que el suceso o circunstancia que se describe posteriormente puede ocurrir o no ocurrir, y que la descripción incluye ejemplos en los que el suceso ocurre y ejemplos en los que no.

Los detectores de imágenes pixelados, tales como dispositivos de carga acoplada (CCD) y dispositivos de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), pueden utilizar un chip pixelado sensible a la luz que contiene material semiconductor para crear imágenes digitales modernas de instantáneas y de video. Aunque estos chips pixelados se han usado eficazmente para crear cámaras CCD y CMOS convencionales, tales chips también son sensibles a partículas de alta energía y se pueden usar como detectores para fuentes astrofísicas de rayos X y rayos gamma, mamografía digital de rayos X, y para experimentos de física de alta energía en aceleradores de partículas.

Los chips pixelados se pueden usar en una diversidad de detectores de imágenes que incluyen, pero no se limitan a, cámaras de instantáneas o de video, teléfonos con cámara, *webcams*, *netcams*, cámaras de seguridad, cámaras de tráfico o cualquier combinación de estas. Estos detectores de imágenes pueden ser fáciles de usar, estar fácilmente disponibles, digitalizar datos directamente, conectarse a ordenadores fácilmente, tener una eficacia cuántica excepcional, bajo ruido y una respuesta lineal a la energía de fotones, partículas de alta energía y rayos gamma emitidos por fuentes de material radiactivo. Cuando un fotón, rayo gamma, o partícula de alta energía impacta en un píxel del chip pixelado sensible a la luz, los electrones pueden moverse en la banda de conducción del material proporcionando una carga o potencial proporcional al número y energía de las partículas incidentes y transparentes al píxel. De ese modo, los fotones de mayor energía pueden producir mayor número de cuentas en los píxeles afectados permitiendo al procesador determinar la luz con respecto a la sombra y el color de la luz. Sin embargo, en el caso de una partícula de alta energía o rayo gamma, se pueden crear en la imagen resultante manchas brillantes de tipo estático por lo general de un tamaño de 1, 2 o 4 píxeles permitiendo la identificación de partículas de alta energía y de material potencialmente radiactivo. Además, el brillo de las manchas puede depender de la energía con que la partícula impacta en el píxel. De ese modo, también se puede determinar el tipo de material radiactivo usando dispositivos que contienen chips pixelados sensibles a la luz.

Un "píxel" se refiere a una célula unitaria de un elemento detector para la conversión de radiación electromagnética en una señal de electrones mediante el efecto fotoeléctrico. La carga generada se puede recoger y puede depender del número de píxeles y/o de la cantidad de carga que los píxeles pueden contener. La formación de una pared particular para un píxel puede depender del dopante y la concentración y de que se puedan usar diferentes técnicas de procesamiento para adaptar los perfiles de dopado para optimizar la operación de detección para una energía particular de radiación electromagnética. Los sustratos para píxeles pueden ser un sustrato de silicio de tipo p, aunque se pueden usar otras opciones, tales como sustratos p sobre p⁻, o sustratos p sobre p⁺, SOI, BiCMOS o similares. Además, también se pueden usar otros sustratos semiconductores, por ejemplo, sustratos de silicio-germanio, germanio, silicio sobre zafiro, y/o galio-arseniuro, entre muchos otros. Se debería entender que los píxeles se pueden alinear en una matriz MxN a la que se accede usando circuitería exclusiva para filas y columnas.

La detección de material radiactivo puede implicar la clasificación entre datos de monitorización medioambiental de los efectos de partículas de alta energía, neutrones, o rayos gamma (γ) emitidos por el decaimiento espontáneo de isótopos fisionables. El decaimiento nuclear puede implicar por lo general la eyección de una partícula alfa (núcleos de helio) o una partícula beta (electrón o positrón) con un exceso de energía de un MeV (millones de electronvoltios = $1,6 \times 10^{-6}$ erg). Durante el decaimiento espontáneo, los núcleos también pueden emitir fotones de rayos gamma con una energía en el intervalo de aproximadamente 10 KeV a varios MeV, dependiendo del isótopo y del modo de decaimiento. La medida de la energía de cada fotón se puede realizar usando una diversidad de tecnologías detectoras.

El método para detectar la presencia de señales características de fotones que impactan en el detector pixelado se compone de etapas. Cuando se determina que se ha producido un aumento estadísticamente significativo en la señal de una imagen o píxel como resultado del impacto de partículas de alta energía en el detector (por ejemplo, un 25 % superior al fondo normal), durante una cantidad de tiempo suficientemente prolongada (por ejemplo, durante 3 o 4 imágenes consecutivas), puede estar teniendo lugar un "suceso de radiación". Un suceso de radiación puede referirse a un aumento en el nivel de radiación ambiente que se considera que está en exceso con respecto a las fluctuaciones estadísticas normales.

Si se determina que puede ser peligrosa la cuenta o la identidad de un suceso medido por un detector, se puede poner en marcha una alerta comunicando la información pertinente a una capa de red-reconocimiento. Opcionalmente, se pueden poner en marcha actividades avanzadas de mando, control, y coordinación, incluyendo una búsqueda en gradiente para localizar la fuente en el campo de visión de la cámara, realizar la triangulación de múltiples cámaras, y distribuir alerta y video a los individuos/ordenadores designados. Para las cámaras con una posición fija conocida, la posición de la cámara se puede usar para aproximar la localización de una fuente de material radiactivo. Además, se puede incluir la posición de una o más cámaras fijas en cálculos para triangular la localización del material radiactivo.

En una realización, en el caso de la localización bidimensional de radiación, un ordenador o procesador puede usar la información recibida de una o más cámaras incluyendo la localización de la cámara y datos de imágenes para calcular la intensidad de la radiación, identificar un tipo de identidad material, calcular una posición aproximada, o una combinación de estas. La ubicación de la radiación para una pequeña fuente identificada se puede aproximar a partir de imágenes iniciales y además refinarse o rastrearse con imágenes posteriores de las cámaras. La extensión de un penacho de radiación se puede monitorizar basándose en imágenes y cuentas de las cámaras. Se puede usar cualquiera de varios procedimientos de optimización diferentes para optimizar la posición de una fuente de radiación identificada. En una realización, el procesador puede obtener en primer lugar una estimación aproximada de la ubicación del objeto mediante un método convencional tal como triangulación. También se pueden usar otros enfoques de optimización. Por ejemplo, se puede usar una técnica convencional, tal como una progresión iterativa mediante prueba y error para converger en un máximo. Además, se puede usar una búsqueda en gradiente para optimizar la posición de una fuente. El método se puede extender a tres dimensiones seleccionando un punto x, y, z como la mejor estimación de la ubicación del objeto radiactivo en tres dimensiones.

Se pueden usar detectores de imágenes pixelados que pueden producir portadores de carga en respuesta a la interacción con un fotón o partícula energética para proporcionar detectores radiactivos. Las cámaras equipadas con detectores de imágenes pixelados se han hecho omnipresentes para la monitorización de seguridad, tránsito y tráfico. Ejemplos no limitantes de tales detectores de imágenes pueden incluir cámaras CCD y CMOS incluyendo cámaras de seguridad o monitorización preexistentes que utilizaban estos procesadores de imágenes. Habitualmente, estos dispositivos de detección se pueden conectar en red y monitorizar desde un centro de operaciones y, cuando se combinan con *firmware* o software, se pueden usar para determinar si uno o más píxeles tienen una carga o tensión correspondiente a una interacción con una partícula de alta energía o rayo gamma y para detectar radiación ambiente y materiales radiactivos, la cantidad y el tipo de material que emite las partículas de alta energía y el movimiento del material radiactivo que es la fuente de las partículas de alta energía detectadas.

Por ejemplo, cuando el detector está cerca (por ejemplo, menos de 100 metros para una energía de aproximadamente 3 MeV o inferior) de una fuente radiactiva, puede producirse un aumento correspondiente en la tasa de rayos gamma que impactan en el detector de imágenes pixelado. Debido a que el nivel de la radiación de fondo es bajo (por ejemplo, < 10 cuentas/segundo por pulgada cuadrada), se puede descubrir la presencia de pequeñas cantidades de material radiactivo usando generadores de imágenes pixelados. Se puede deducir la carga de un píxel de un generador de imágenes a partir del brillo del píxel en la imagen. Alternativamente, se puede usar directamente la carga o tensión de un píxel durante el proceso de lectura de salida. El generador de imágenes puede comunicar entonces esa información a un procesador que interpreta la información y hace sonar una alarma.

Además de enviar las imágenes y la posición de los generadores de imágenes CCD o CMOS, también se puede configurar la unidad generadora de imágenes para transmitir información codificada, tal como la orientación de la cámara, la temperatura de la ubicación, la hora y similares.

En una configuración de monitorización, el sistema o aparato puede realizar una toma de muestras continua. El sistema o aparato puede adquirir una imagen digital del entorno o de un objeto desde una cámara digital o un detector digital. En una configuración de inspección rápida, el sistema se puede configurar para realizar una toma de muestras no continua de una o más imágenes tomadas a petición o en intervalos mayores que los que se describen en otro lugar.

La sensibilidad del generador de imágenes para diferentes fotones de alta energía se puede determinar usando información de cuentas y datos de calibración de experimentos tanto de modelado como empíricos. Por ejemplo, se puede exponer un generador de imágenes a una serie de materiales radiactivos conocidos, tales como Co-60, U-235, Bi-214 y similares, a una distancia conocida. Se puede determinar la carga o brillo, la frecuencia de cuentas, y

la relación de intensidades (carga o brillo). Esta información se puede usar para calcular la energía de los rayos gamma detectados por el generador de imágenes.

5 Se pueden usar las simulaciones que usan el paquete de software "MCNP" desarrollado por el Grupo de Aplicaciones Diagnósticas del Laboratorio Nacional de Los Alamos (Los Alamos National Laboratory Report, LA-10363-MS (1995)) para mostrar que los detectores y el sistema descritos pueden proporcionar detecciones estadísticamente significativas de una amplia variedad de especies radiactivas. Los resultados experimentales que confirman la utilidad de este modelo se ilustran en la detección satisfactoria de Cobalto-60 y Cesio-137 usando muestras de 1-10 μC como se muestra en la Figura 1.

10 Los radioisótopos pueden emitir rayos gamma a energías específicas que son características de la estructura interna del núcleo emisor. Un detector de rayos gamma capaz de determinar la energía de los fotones individuales puede, por lo tanto, identificar inequívocamente el tipo de núcleo que emitió la radiación. Este tipo de espectroscopía es similar a la espectroscopía óptica en que la detección e identificación de solo unas pocas características es suficiente para caracterizar la fuente de la radiación. Mientras que la espectroscopía óptica está a menudo necesitada de fotones y requiere la recogida de numerosos fotones en cada longitud de onda discreta, los rayos gamma tienen tanta energía individualmente que cada fotón de un rayo gamma que interactúa con un detector de imágenes pixelado puede conducir a una característica con datos estadísticamente significativos. El espectro de energía único de los rayos gamma emitidos por un material radiactivo se puede usar para diferenciar la detección falsa de la detección real.

20 Se puede obtener un espectro de energía de los rayos gamma que impactan en los píxeles de un generador de imágenes a partir del análisis de la imagen. La identificación de radioisótopos a través de espectroscopía de rayos gamma puede implicar la consulta en bibliotecas de referencia, comparaciones, y la descomposición de un espectro gamma en espectros de isótopos individuales. El tipo de comparación puede incluir la técnica de correlación cruzada, que es una técnica usada a menudo para la comparación de espectros que tienen múltiples líneas; una diversidad de algoritmos de concordancia para aplicaciones de serie temporal y espectrales; Análisis de Componentes Principales; combinaciones de estos; o combinaciones que incluyan cualquiera de estos. Por lo tanto, se puede desarrollar software de análisis que mida el brillo de la mancha, determine el espectro de energía de la partícula y compare esta información con los espectros de una biblioteca para permitir la identificación de los radioisótopos particulares que emiten partículas de alta energía. El software se puede usar para distinguir rayos gamma emitidos, por ejemplo, por Co-60, en comparación con Cs-137. Se pueden analizar imágenes posteriores según necesidades para confirmar los resultados de la identificación, o se puede comparar la cuenta o la identidad del material obtenido por un generador de imágenes con otros detectores cercanos para confirmar los resultados del primer detector. Si el espectro de energía de los múltiples rayos gamma detectados coincide con un material perjudicial, se puede emitir un aviso.

35 Más específicamente, se puede obtener una estimación de la significación estadística de cada fotón de rayo gamma individual comparando su interacción con el detector con el efecto que tiene un fotón óptico individual en el detector. El número de electrones contados por fotón puede depender tanto de la energía del fotón incidente como de la ganancia del instrumento, y se expresa habitualmente como electrones por ADU (unidad analógica/digital). Un fotón de luz azul que tiene 4 eV de energía producirá, en promedio, 3,1 fotoelectrones en un píxel particular de un CCD Kodak KAF-1001E (un modelo de CCD particular usado en aplicaciones de imagen digital de gama alta). Una estimación inicial podría ser que un rayo gamma de 200 KeV produciría $3,1 \text{ e-/ADU} \times 200.000 \text{ eV} / 4 \text{ eV} = 165.000$ fotoelectrones. Sin embargo, solo se puede transferir una parte de la energía del rayo gamma al chip pixelado. Las simulaciones del modelo MCNP pueden sugerir que la transferencia de energía es significativa. Por ejemplo, un fotón de 766 KeV producido en el decaimiento de U-238 producirá ~500 fotoelectrones ("cuentas") mientras que un rayo γ de 1,001 MeV producirá ~2000 cuentas. Estos números pueden ser el límite inferior de cuentas para la detección de un rayo gamma ya que incluyen deposición de energía en la parte de silicio del área superior del chip pixelado. Es posible que las conducciones metálicas, la envoltura de SiO_2 , las impurezas dopantes u otros factores puedan modificar o aumentar la transferencia de energía al chip pixelado. Estas cuentas pueden permitir que se use *firmware* o software para identificar las una o más ubicaciones de píxel en las que se depositaron los rayos gamma de alta energía basándose en el número de cuentas que superan un umbral. Las cuentas totales o el número de fotoelectrones producidos por un rayo gamma, o un valor proporcional a este, se puede basar en la carga o tensión producida por los uno o más píxeles en el detector debida al rayo gamma.

55 Cuando se analizan materiales que emiten potencialmente partículas energéticas detectables desde una o más fuentes radiactivas, se pueden usar el sistema y los métodos para analizar o estimar el nivel de fuentes radiactivas en el material basándose en la cantidad de señal recibida en los detectores CCD o CMOS. Se pueden usar las variaciones en la cantidad y el tipo de fuentes radiactivas, el apantallamiento, las cantidades y tipos de materiales en los que los emisores están presentes o dispersados, la distribución geométrica de emisores en una muestra, versiones del sistema y detectores para caracterizar estas características de la fuente.

Se realizaron simulaciones que usan el paquete de software "MCNP" de la tasa de cuentas esperada que resulta de diversos radioisótopos apantallados y se determinó que se puede usar un detector a CCD para monitorizar una

5 amplia diversidad de materiales radiactivos. Son posibles las contribuciones al apantallamiento de la fuente, y las simulaciones incluyeron: apantallamiento con 1 mm de plomo, autoatenuación dentro de la fuente radiactiva, dos láminas de acero de 1/8" (3,2 mm) de espesor, para representar un vehículo o los paneles del cuerpo de un recipiente, y una lámina de placa de vidrio (estimación conservativa de ventana detectora) y una distancia variable de cámara de aire. La intensidad del rayo gamma puede depender del tipo y cantidad del material, distancia, geometría y apantallamiento. Incluso en el caso de que el número de rayos gamma detectado sea bajo, los rayos gamma individuales pueden conseguir una significación muy elevada debido a que su alta energía y la firma espectral de estos rayos gamma es única para un isótopo.

10 Es razonable esperar que el límite superior de la precisión para la determinación de la energía de un rayo gamma que interactúa con el generador de imágenes podría ser la relación señal-ruido (SNR) de las cuentas para las detecciones individuales. Esta precisión puede ser aproximadamente igual a la raíz cuadrada de las cuentas asociadas con el rayo gamma individual que impacta en el chip sensible a la luz. La precisión de la energía se puede escribir como la incertidumbre en la energía (ΔE) dividido por la energía (E), o $\Delta E/E$. Para estadísticas estrictamente Poisson,

15
$$\Delta E/E \approx (n^{\circ} \text{ de cuentas})^{1/2} / (n^{\circ} \text{ de cuentas}) = 1 / (n^{\circ} \text{ de cuentas})^{1/2}$$

El ruido puede proceder habitualmente de tres fuentes: electrónica de lectura de salida, corriente oscura, e incertidumbre estadística de las propias cuentas de la fuente (ruido de disparo). El ruido de lectura de salida puede estar determinado principalmente por la calidad de la electrónica. Los detectores de imágenes pixelados y los controladores modernos tienen habitualmente un nivel de ruido muy bajo.

20 La corriente oscura puede tener un valor específico para el chip del generador de imágenes CCD o CMOS, expresado habitualmente como el número de electrones por píxel por segundo, en promedio, que se acumulan durante una "exposición" o periodo de integración de imagen. Las cuentas de corriente oscura se pueden acumular independientemente de si la luz o los rayos gamma que son transparentes a los electrodos están impactando en el chip. El total de tales cuentas puede depender de la tasa y del tiempo total de integración. La tasa de acumulación puede depender fuertemente de la temperatura del CCD o CMOS, en los que la tasa se puede doblar aproximadamente por cada incremento de 6-10° C en el chip. El efecto de la corriente oscura en la calidad de imagen, y por lo tanto en la capacidad para detectar rayos gamma con un esfuerzo computacional tan pequeño como sea posible, puede ser insignificante para tiempos de integración cortos con cámaras modernas en buen estado. Basándose en un detector, por ejemplo, de un sistema de video con una tasa de fotogramas de aproximadamente 10 a 20 fotogramas por segundo, la corriente oscura, incluso cuando el chip está caliente, puede ser insignificante en comparación con los cientos a miles de cuentas esperadas por rayo gamma. Esta gran señal puede asegurar excelentes estadísticas de recuento y ayudar en la determinación de energía, permitiendo la identificación precisa de la fuente radiactiva a pesar de la radiación ambiente del entorno local. Aunque los cambios en la temperatura se pueden usar para modificar o detectar ruido ambiente para un generador de imágenes CCD o CMOS, a diferencia de los detectores basados en Ge, los detectores CCD o CMOS no necesitan enfriarse para detectar partículas de alta energía.

El ruido de disparo puede generar la fuente más importante de ruido para las cámaras de seguridad. Los cálculos de los modelos sugieren que se podría esperar que un fotón de 1 MeV tenga una incertidumbre en la determinación de energía de aproximadamente $1/(2000)^{1/2} = 0,022$, o un 2,2 %. Las medidas de laboratorio muestran que las cuentas medidas para un fotón de un rayo gamma de energía inferior de Cesio-137 es de aproximadamente 200 cuentas, con una incertidumbre implícita de ~7 % por característica espectroscópica. Dado que la mayoría de los radioisótopos que emiten rayos gamma tienen múltiples energías, se puede conservar la huella dactilar espectral única, incluso con estas estimaciones de error.

45 La variación en el número de rayos gamma que impactan en el detector se puede eliminar usando métodos estadísticos, y también se puede utilizar el uso de más de un detector para acabar con estas variaciones.

La Figura 2B ilustra que se puede usar software astronómico u otro software similar para aislar, analizar y/o cuantificar señales en el detector que producen datos de imágenes digitales de las partículas de alta energía que impactan en el chip sensible a la luz. Los puntos circulares pequeños pueden resultar de rayos gamma de alta energía que impactan en el detector mientras que las manchas brillantes grandes pueden ser estrellas que eran el objetivo real de la imagen. Sería razonable esperar que una fuente de material radiactivo que emite partículas de alta energía podría producir imágenes con manchas similares a los puntos circulares pequeños y se puedan usar para detectar, identificar, y/o cuantificar la fuente de un material radiactivo conocido o desconocido.

55 Usando uno o más detectores basados en píxeles capaces de detectar y caracterizar partículas energéticas, se puede observar una fuente radiactiva en movimiento que emite partículas energéticas detectables. El chip sensible a la luz del detector de imágenes pixelado puede estar generalmente en forma de un cuadrado delgado. Cuando se ubica el cuadrado delgado perpendicularmente a la fuente de la luz o de las partículas de alta energía, se puede

- maximizar la probabilidad de que el fotón o la partícula de alta energía impacte en un píxel del chip. Este fenómeno se denomina flujo máximo. La probabilidad de que un fotón o partícula de alta energía impacte en un píxel del chip puede disminuir a medida que la fuente se mueve a través del campo de visión del detector. Por lo tanto, a medida que la fuente de partículas de alta energía se mueve a través del campo de visión de un detector de imágenes pixelado estático (véase la Figura 3), el número de partículas de alta energía que impacta en el chip sensible a la luz puede aumentar con el tiempo a medida que la fuente mantiene una posición perpendicular (tiempo = 0) con respecto al chip y puede disminuir hasta que la fuente ha abandonado el campo de visión del detector (tiempo = ± 20).
- También se puede usar un detector de imágenes pixelado que es capaz de moverse para identificar la fuente de fotones o de partículas de alta energía. El movimiento de un detector, tal como, pero no limitado a, vista panorámica, por rotación alrededor de un eje vertical, e inclinación, por rotación alrededor de un eje horizontal, puede ser capaz de realizar una búsqueda en gradiente, mediante el que se rota la cámara horizontal o verticalmente hasta que se determina el flujo máximo. De ese modo, uno o más detectores de imágenes pixelados pueden identificar la ubicación o rastrear el movimiento de la fuente de fotones o de partículas de alta energía.
- Los autobuses, transbordadores, trenes, coches patrulla, u otros vehículos de transporte están equipados a menudo con cámaras de seguridad, que se pueden usar para detectar radiactividad. Tales cámaras también sirven como detectores itinerantes. En una realización, los laterales metálicos de las cámaras pueden no ser significativamente más gruesos que los de los coches.
- Aunque el uso de un detector individual puede proporcionar información importante de un material radiactivo, se puede obtener incluso más información cuando se usan conjuntamente detectores adicionales y se combinan sus salidas. Se pueden usar programas de ordenador para integrar la salida de varios detectores. Una ventaja del sistema y los métodos desvelados puede ser conectar en red detectores o cámaras en estrecha proximidad entre sí. Otra ventaja del sistema y los métodos desvelados puede ser la capacidad de conectar en red detectores o cámaras existentes en estrecha proximidad entre sí. Se pueden usar numerosas topologías de red diferentes de estaciones de monitorización. Por ejemplo, en una versión, se pueden establecer múltiples estaciones de monitorización usando cámaras de seguridad existentes. Si una fuente radiactiva que se está transportando pasara por estos detectores, se pueden detectar "sucesos de radiación" distintos en cada generador de imágenes o cámara. Se puede esperar que los trenes, autobuses, coches de pasajeros, personas y/o animales con material que emite radiación que se mueven cerca de un generador de imágenes muestren un perfil de radiación. Se pueden presentar escenarios similares para personas en un andén de un tren, autobuses en la carretera, o tráfico de vehículos en un puente/túnel. Cuando múltiples detectores están próximos entre sí, puede ser razonable esperar que cada uno tenga una respuesta de serie temporal similar en forma a la que se muestra en la Figura 3, pero que tenga diferentes intensidades o falta de simetría, dependiendo del movimiento, velocidad, y posición de la fuente con respecto al generador de imágenes.
- Conectando en red los detectores, se puede determinar la velocidad y la dirección del vehículo o individuo que porta el material que emite partículas de alta energía tales como rayos gamma de una fuente radiactiva. Aunque en escenarios concurridos de tráfico o urbanos puede no ser posible identificar inicialmente un único vehículo o persona, portador en posesión o que transporta un material radiactivo, el roce y la mezcla normal del tráfico pueden separar al portador del material radiactivo de los otros vehículos y peatones que se consideraban inicialmente portadores potenciales.
- En general, puede existir más de un objeto de interés (persona, automóvil, paquete, maleta, etc.) en el campo de visión del detector. Sin embargo, cuando la fuente radiactiva se ha desplazado o se ha transportado a la siguiente cámara, es probable que algunos de los objetos circundantes originales (personas, automóviles, paquetes, maletas, etc.) no se encuentren más en estrecha proximidad con la fuente radiactiva, como se ilustra en la Figura 14 (A) y la Figura 14 (B). Por lo tanto, a medida que cámaras secuenciales recogen sucesos de radiación, se puede conseguir limitar mejor la identidad del objeto que contiene o que porta la fuente radiactiva. Las detecciones secuenciales mediante una serie de cámaras pueden ayudar a eliminar a los espectadores o vehículos inocentes de los que se identifican como la fuente del material radiactivo. Estas detecciones secuenciales también puede servir para reducir significativamente o eliminar falsos positivos en las detecciones.
- La Figura 4A y la Figura 4B ilustran el estado del tráfico en dos periodos temporales arbitrarios (A) y (B). Un camión 412 puede emitir partículas de alta energía 422 que se detectan por el detector CCD o CMOS 416A; se ilustra que el detector 420A no detecta las partículas de alta energía emitidas por la fuente del camión 412. La detección de partículas de alta energía 422 por el detector 416A puede disparar una alerta que se puede usar para que el detector de señal 420A se mueva mediante un controlador en la dirección del camión. El detector 416A se puede mover panorámicamente en la dirección de la fuente de partículas de alta energía 422 emitidas por el camión 412 para rastrear la fuente de las partículas de alta energía. En la Figura 4B, tanto el detector 416B como el detector 420B se han movido con respecto a sus posiciones en la Figura 4A. El detector 416B detecta partículas de alta energía 426 y el detector 420B detecta partículas de alta energía 428 emitidas por la fuente en movimiento 412.

En un entorno de tránsito, la importancia de las cámaras conectadas en red es probable que proporcione una identificación más sólida e incluso más rápida de una fuente de material o de un objeto responsable de emitir fotones de alta energía que se puedan detectar. Por ejemplo, las estaciones de metro habituales y las instalaciones similares se diseñan para que tengan al menos dos cámaras de seguridad capaces de observar la estación entera. Las

5 detecciones simultáneas de estas cámaras CCD o CMOS se pueden usar para proporcionar una confirmación importante de radiación detectada, el aumento de la confianza en los avisos o alertas emitidos, y ayudar en la toma de decisiones tácticas. Además, dado que los muros de hormigón de numerosas estaciones son absorbentes de la radiación, las cámaras de seguridad pueden detectar la "aparición" repentina de una fuente radiactiva. En tal situación, puede ser posible identificar inequívocamente el individuo o la fuente responsable de la señal del detector.

10 Los detectores de imágenes pixelados usados para la detección de energía de fotones de alta energía pueden contribuir a un nodo en una red de sitios de monitorización de radiación. Tales cámaras pueden hacer un muestreo de su entorno de radiación local. Cualquier aumento de la radiactividad se puede identificar, verificar, y comunicar al centro o centros de respuesta de emergencia pertinentes. El sistema y las cámaras también pueden comunicar la

15 identidad del radioisótopo o radioisótopos. Si se produce una liberación de radiactividad a gran escala, independientemente de la causa, los nodos en funcionamiento pueden comunicar el nivel de actividad ambiente, permitiendo realizar rápidamente un mapa y una previsión de la extensión de los residuos radiactivos. La monitorización a gran escala de radiactividad y la capacidad de alerta se pueden extender con mayor amplitud a medida que se instalen sistemas de seguridad de tránsito u otros sistemas de seguridad, tales como la implantación por parte de la Federal Highway Administration de un sistema de autopistas inteligente.

20 El sistema de detección de imágenes pixelado puede incluir además la propagación de alertas y protocolos de mando y control. Se pueden reunir y transmitir los datos recogidos por uno o más detectores a los destinos apropiados para acción o almacenamiento. De este modo, se pueden facilitar los conceptos multijurisdiccionales de las operaciones para situaciones que sobrepasan el área de responsabilidad de la instalación, local, estatal, y/o federal. Se pueden usar protocolos de Internet habituales para permitir que los usuarios puedan observar los

25 fotogramas de video y los datos de alerta actualizados en tiempo real en PC convencionales y dispositivos portátiles móviles inalámbricos. Estos sistemas se pueden desplegar de forma ubicua con un soporte para infraestructura preexistente que asegure una plataforma fiable, segura y escalable.

Por referencia a la Figura 9, se describe un método para detectar radiación gamma. En la etapa 908, un generador de imágenes CCD o CMOS puede recoger una imagen de un área, volumen, o combinación de objetos. En la etapa

30 912, cualquiera de las partículas de alta energía, tales como rayos gamma, provenientes del decaimiento de un material radiactivo en el área de imagen puede impactar en el generador de imágenes o en uno o más píxeles del generador de imágenes creando un artefacto en la imagen. En la etapa 916, se pueden analizar los artefactos de las partículas de alta energía de la imagen del generador de imágenes. Por ejemplo, se puede determinar la carga para píxeles individuales de la imagen, y/o se puede analizar la imagen para determinar el brillo de los píxeles. En la

35 imagen, se pueden analizar los objetos formados en la imagen por el generador de imágenes y los artefactos debidos a rayos gamma. En la etapa 932, se puede realizar una determinación para ver si están presentes los artefactos en la imagen provenientes de los rayos gamma que interactúan con el detector. Si no se produce ningún artefacto proveniente de la interacción con rayos gamma, la rutina puede continuar hasta la etapa 944 y se puede realizar una determinación de si continúa la recogida de imágenes. Si se producen artefactos provenientes de la

40 interacción con los rayos gamma, la rutina puede continuar con la etapa 920 donde se pueden tomar imágenes o fotogramas adicionales del área. En la etapa 924, se puede realizar una determinación de si los artefactos persisten en la imagen. Si los artefactos no persisten, la rutina puede volver a la etapa 908. Si los artefactos persisten, se puede emitir un aviso de que se detectaron rayos gamma. En la etapa 928, se puede iniciar una monitorización intensiva. Esto puede incluir una búsqueda en gradiente de imágenes que tengan artefactos, la evaluación de imágenes de otras cámaras, el barrido o toma panorámica de las cámaras, la emisión de alertas adicionales, y/u

45 otros actos para identificar la fuente.

La Figura 10 se refiere a una realización de un método para procesar imágenes tomadas por un generador de imágenes instantáneas o de video. En la etapa 1008, la imagen de una cámara se puede convertir a un formato de archivo para su procesamiento adicional y entrada en memoria en la etapa 1012. Los píxeles de la imagen se

50 pueden evaluar usando uno o más ensayos y comparaciones para descubrir artefactos en la imagen provenientes de rayos gamma en la etapa 1016. Se puede realizar una determinación en la etapa 1020 de si el píxel me superó todos los ensayos que pudieran indicar que se había detectado un rayo gamma. Si no se superan tales ensayos, se evalúa el siguiente píxel. Si se superan tales ensayos, se puede marcar o indicar la ubicación del píxel y se puede aumentar la cuenta del píxel en la etapa 1028. A continuación se puede evaluar el siguiente píxel. Se puede realizar una

55 determinación de si se han evaluado todos los píxeles de la imagen en la etapa 1032. Si permanecen sin evaluar píxeles adicionales, se pueden evaluar tales píxeles. De otro modo, se puede realizar una determinación en la etapa 1036 de si se detectó cualquier rayo gamma en las imágenes. Si se detectaron rayos gamma, se puede emitir un aviso en la etapa 1040. De otro modo, la rutina puede terminar o se puede evaluar la siguiente imagen.

La Figura 11 es una realización de un método para la detección de rayos gamma usando un generador de imágenes CCD o CMOS. En la etapa 1104, puede ocurrir que un usuario pueda solicitar una imagen o una toma de imágenes

60

continua de un área u objetos por el generador de imágenes. El generador de imágenes puede recoger los datos en la etapa 1108 y analizar el brillo o la carga del píxel en la imagen en la etapa 1112. Se puede realizar una determinación de si se detectaron fotones de alta energía o rayos gamma en la imagen. Si no se detectaron, se puede realizar una determinación de si continúa la adquisición de imágenes o se detiene la recogida de imágenes. Esta determinación en 1124 puede continuar hasta que se realiza una entrada de un usuario para detener la recogida de datos. Si se detectan fotones de alta energía o rayos gamma, se puede realizar un análisis adicional de la imagen en la etapa 1120. Una vez se completa el análisis de la imagen y se devuelven los datos, se puede realizar una determinación de si continúa la recogida de imágenes en la etapa 1124.

Por referencia a la Figura 12, se ilustra una realización de un método para el análisis de una imagen. El método puede incluir marcar la imagen como una imagen en la que se detectó un suceso de detección de rayos gamma en la etapa 1204. A continuación, se puede realizar una determinación en la etapa 1208 de si se ha marcado un número suficiente de imágenes para radiación detectada. Si es así, se puede emitir una alarma o alerta. Si no, se pueden dar instrucciones al generador de imágenes en la etapa 1220 para corregir una imagen adicional. Se pueden analizar artefactos en la imagen debidos a rayos gamma que han interactuado con el generador de imágenes. En la etapa 1232, se puede realizar una determinación de si se detectaron rayos gamma en la imagen. Si se detectaron rayos gamma, la imagen se puede marcar como un suceso de detección en la etapa 1204 y la rutina puede continuar. Si no, se puede realizar una determinación en la etapa 1224 de si continúa la recogida de imágenes. Si es así, la rutina puede volver a la etapa 1204.

En la Figura 13 se ilustra un ejemplo de un método para generar una alarma o alerta. Cuando se solicita una alarma, la rutina puede proporcionar una indicación de aviso en la etapa 1308. Se puede realizar una determinación de si se realizan análisis o barridos de imágenes adicionales en la etapa 1312. Si se solicitan análisis adicionales, se pueden obtener imágenes adicionales, una búsqueda en gradiente de la imagen, o un análisis de múltiples imágenes para identificar la fuente, o se puede realizar un análisis y una comparación de imágenes de múltiples detectores, o un barrido de un detector o detectores, otros análisis, o una combinación de estos, en la etapa 1316. Se puede realizar una determinación basada en el análisis y los resultados de la etapa 1316 para ver si continúa el análisis. Si es así, se puede repetir la etapa 1316 y se pueden obtener imágenes y/o análisis adicionales. Si no, la rutina puede terminar.

La Figura 14 ilustra un ejemplo no limitante de un aparato para detectar rayos gamma emitidos por un material que utiliza un detector pixelado. El aparato puede incluir un controlador 1420 que puede recibir información o imágenes de un detector 1408, puede incorporar instrucciones, y se puede usar opcionalmente para controlar el movimiento por la posición del detector 1408. Se puede usar un receptor 1404 para introducir instrucciones para el controlador. El receptor puede incluir, pero no se limita a, un teclado, cable, ondas de radio, o un ordenador. Se puede usar un transmisor 1424 para enviar datos, imágenes, o instrucciones a otra estación situada remotamente usando cables, líneas telefónicas, ondas de radio, u otros métodos de comunicación.

El sistema ilustrado en la Figura 14 puede incluir una unidad de procesamiento central (CPU) 1420 que tiene los puertos de entrada/salida correspondientes, memoria de solo lectura (ROM) o cualquier medio de almacenamiento electrónico adecuado que contenga instrucciones ejecutables para un procesador y valores de calibración, memoria de acceso aleatorio (RAM), y un bus de datos de cualquier configuración adecuada. El controlador puede recibir señales de una diversidad de píxeles individuales o del generador de imágenes pixelado o de sensores del detector acoplados a cámaras o de detectores independientes, y/o como parte de un vehículo. La unidad de procesamiento 1420 se puede usar para controlar la operación y/o el movimiento de los sensores, la vista tomada por los detectores, y/o aceptar y enviar información a o desde los detectores de los sensores. El controlador se puede conectar a un dispositivo de entrada 1404, tal como un teclado. El controlador puede realizar el análisis de datos o enviar la información de los detectores a una unidad de procesamiento central 1404. La información de los sensores se puede proporcionar directamente a una estación receptora o a través de un transmisor 1424 de una forma conocida.

La Figura 15 ilustra esquemáticamente uno o más detectores fijos 1524, movibles 1504 y 1556, o móviles 1552, que tienen cada uno un detector CCD o CMOS 1508, y que son capaces cada uno de detectar fotones de alta energía de una fuente de material radiactivo 1520, que pueden estar revestidos con un recipiente protector 1516. Cada uno de los detectores 1504, 1524, 1552, y 1556 puede comunicar las imágenes a un receptor mediante cables o líneas telefónicas 1536, 1540, 1564 o mediante ondas de radio 1548. El receptor 1544 se puede conectar 1568 a un ordenador u otro sistema de control y análisis 1560.

Se puede configurar un teléfono con cámara u otros dispositivos portátiles, por ejemplo 1552 en la Figura 15, para emplazamiento remoto e interconexión con una red de otros sensores. Estos dispositivos se pueden alimentar con energía solar y se pueden diseñar para conectarse a la red en el caso de que detecten una o más partículas energéticas. Se pueden activar partes de una red de detectores para detectar partículas energéticas cuando uno o más detectores primarios detecten partículas energéticas que tienen energías dentro de una o más ventanas de energía predeterminadas o por encima de una cantidad umbral. La red activada puede monitorizar el movimiento del material de la fuente radiactiva.

Algunos radioisótopos son más fáciles de detectar que otros. Los cálculos y ejemplos de la presente divulgación se basan en U-235, que comparado con el Co-60 es más difícil de detectar, y sirve como guía para la aplicabilidad de los sistemas de detección de radiación basados en materiales semiconductores en los que la cuenta producida por un fotón incidente en un píxel es proporcional a la energía del rayo gamma incidente producido por la fuente de radiación. Aunque los ejemplos y los cálculos que se divulgan en el presente documento se basan en U-235, el sistema, los métodos, y los aparatos se pueden usar para la detección de fotones de alta energía de cualquier material radiactivo que experimente decaimiento nuclear. Estos dispositivos generadores de imágenes CCD y CMOS tienen una respuesta lineal a la energía del fotón incidente. Aunque se puede usar U-235 como ejemplo de un material que produce fotones detectables de alta energía, las reivindicaciones y la divulgación no se limitan a ningún material radiactivo particular.

Las instrucciones o programas, que pueden estar en *firmware* (programas de ordenador contenidos permanentemente en un dispositivo de hardware (como una memoria de solo lectura)), EPROM, o software, pueden incluir diversas rutinas que identifican radioisótopos de acuerdo con el espectro de energía de la radiactividad detectada. Estos programas también incluyen la capacidad de aceptar y analizar datos de cámaras digitales remotas conectadas en red, emisión de alertas distribuidas, y uso de infraestructura en red para coordinar detecciones de múltiples detectores. Las versiones del sistema para la detección e identificación de material radiactivo con generadores de imágenes pixelados se pueden usar para formar una red barata y densa de detectores de radiación. Tal red de detectores puede suministrar detección y rastreo continuos en tiempo real de fuentes radioactivas en una amplia área e intervalo de entornos, tales como autopistas, fábricas, ciudades, hospitales, otras instituciones, y otras ubicaciones urbanas o rurales.

Por ejemplo, la Figura 2A muestra una parte de una imagen CCD astronómica habitual. Las manchas que son resultado de partículas de alta energía, rayos cósmicos, fuentes radioactivas ambientales, y rayos gamma que impactan en el CCD durante la exposición se pueden identificar usando un programa de identificación automática. Este sistema puede realizar la identificación en tiempo real una vez que se establecen los parámetros de detección. Debido a la uniformidad de las características de detección de luz del CCD, el ajuste de los parámetros de detección se debe realizar solamente una vez para un tipo de cámara determinado. Una vez se ajusta una cámara prototipo, otros sistemas que usen ese tipo de detector específico pueden operar usando los mismos ajustes o con solo una corta comprobación de calibración.

Las instrucciones y rutinas en el software o el *firmware* se pueden usar para determinar la significación estadística de cada salida de píxel de pico en comparación con el ruido ambiente. Las rutinas pueden comenzar con un barrido de los datos de imagen, buscando píxeles con una tasa de cuenta muy elevada. Las rutinas pueden incluir además la comparación de los picos de píxeles con una tasa de cuenta elevada con los píxeles vecinos usando ensayos estadísticos. Los ensayos estadísticos pueden incluir umbrales mínimos, relaciones mínimas (pico a vecino), uso de características del detector y la electrónica, o combinaciones de ensayos que incluyen estos. Se pueden usar ensayos y programas estadísticos para proporcionar probabilidades de detección con pocos resultados falsos positivos. Se pueden usar comprobaciones y comparaciones adicionales de la señal del detector para evitar otras alertas falsas.

Fuentes potenciales de resultados falsos positivos incluyen radiación de fondo, rayos cósmicos (CR), aumentos repentinos debidos al lavado de la lluvia de los productos que se producen de forma natural en el aire por el decaimiento del Radón-222, Bismuto-214 y Plomo-214, y del propio decaimiento del Ra-222. La actividad de fondo puede ser habitualmente muy baja, ya que es el ruido del sistema, de modo que se puede conseguir la detección de fuentes radioactivas auténticas con un grado muy alto de confianza estadística. Los ensayos de cribado sistemático de datos de la información recibida por los detectores y las cámaras se pueden usar para minimizar los resultados falsos positivos. Estos pueden incluir ensayos de la idoneidad de los espectros detectados y de la persistencia de la señal en múltiples exposiciones. Además, un vehículo o persona que porta material nuclear debe desencadenar un suceso de radiación después de otro. Tal detección en movimiento puede identificar claramente una fuente auténtica, y no puede producirse por radiación de fondo, rayos cósmicos, o cualquier otro artefacto de radiación local. Finalmente, una gran liberación de radiación puede producir una actividad persistente y distribuida en la región afectada.

En conclusión, un sistema y un método para la detección e identificación de isótopos radiactivos puede incluir un aparato basado en un material semiconductor que puede obtener imágenes fotográficas o de video de objetos y detectar simultáneamente partículas de alta energía que interactúan con generadores de imágenes de cámaras digitales de instantáneas y de video. El aparato puede usar imágenes basadas en CCD y CMOS. Estos detectores o generadores de imágenes y otros detectores digitales de radiación electromagnética y partículas cargadas pueden, además de detectar luz, detectar partículas energéticas y fotones de alta energía emitidos por isótopos radiactivos. Las imágenes de uno o más generadores de imágenes CCD o CMOS se pueden transferir a un ordenador usando un capturador de imágenes o una placa de formación de imágenes conectada, por ejemplo, mediante un cable o un bus PCI a un procesador. También se pueden transferir imágenes usando transferencia de datos por infrarrojos, ondas de radio, u otras ondas electromagnéticas usadas en dispositivos de comunicación. Las imágenes se pueden almacenar en un disco para su recuperación y posterior análisis; las imágenes se pueden almacenar en un formato

comprimido. Se pueden capturar secuencias de imágenes con velocidades de fotograma totales o reducidas. Los datos de las imágenes de los generadores de imágenes se pueden enviar a un equipo de adquisición y a continuación a un equipo de procesamiento de datos, incluyendo ordenadores y otra maquinaria de manipulación y análisis de datos digitales o analógicos. Se puede usar un análisis de los datos de las imágenes transferidos desde los componentes del sistema mencionados anteriormente para detectar la presencia de radioactividad.

Se puede comparar el análisis de las imágenes de un generador de imágenes con las imágenes analizadas por otros generadores de imágenes cercanos para determinar si se ha producido una conclusión falsa positiva. Las cámaras cercanas deberían ser capaces de detectar los rayos gamma detectados por el primer generador de imágenes y las energías y la relación de energías detectadas deberían ser similares y se pueden comparar usando ensayos estadísticos y basados en la lógica para verificar la persistencia y/o consistencia de la radiactividad medida. La localización de manchas calientes o manchas brillantes en una imagen debido a rayos gamma emitidos por una fuente terrestre de material radiactivo se puede usar con las imágenes de los objetos del campo de visión del generador de imágenes para localizar la posición de la radiactividad.

A continuación, se ilustrarán diversos aspectos de realizaciones desveladas por referencia a los siguientes ejemplos no limitantes. Los siguientes ejemplos son meramente representativos del trabajo que contribuye a la enseñanza de la presente invención, y la presente invención no queda restringida por los ejemplos que siguen a continuación.

EJEMPLO 1

Este ejemplo ilustra la capacidad de un generador de imágenes para detectar partículas de alta energía e ilustra la sensibilidad del detector.

Se comprobó la funcionalidad y la sensibilidad de diversos generadores de imágenes para detectar rayos gamma (de instantáneas y de video) de diferentes fabricantes. En cada experimento, las cámaras se operaron, sin modificaciones, de acuerdo con sus instrucciones convencionales. Se realizaron exposiciones alternativamente con y sin material radiactivo cerca del cuerpo de la cámara. Las imágenes tomadas sin una fuente cercana sirvieron como experimentos de control. En general, se esperaba que muy pocas imágenes del experimento de control desplegaran los puntos pequeños a escala de píxel causados por los impactos de la radiación en el detector. También es razonable esperar que alguna de las imágenes (también denominadas fotogramas, exposiciones o colectivamente datos), pero no necesariamente todas, contenga tales artefactos.

En una serie de ensayos de laboratorio, se usó una cámara de video digital fabricada por Logitech, específicamente, la Quickcam para Notebook Pro. La cámara contiene un dispositivo de carga acoplada (CCD) de 1280 x 960 píxeles. En una segunda serie de ensayos, se usó una cámara digital de instantáneas Olympus Camedia C-700, que contiene un CCD de 1600 x 1200. Ambas cámaras se expusieron, sin modificaciones, a pequeñas fuentes radioactivas no reguladas. Cuando se expusieron estas fuentes, se detectaron con éxito rayos gamma como puntos blancos distintos muy pequeños.

Cuando se recogieron datos sensibles a la radiación, se usaron tres fuentes radiactivas (véase la Tabla 1): (1) Cobalto-60 de 1 μC , (2) Cesio-137 de 5 μC y (3) Cesio-137 de 10 μC . Estas fuentes se adquirieron en Spectrum Techniques, Inc. de Oak Ridge, TN. Spectrum Techniques proporciona fuentes de radiación calibradas para trabajo experimental de laboratorio. La fuente de Cobalto-60 emite potentes rayos gamma de 1,17 MeV y 1,33 MeV. Estos rayos energéticos son muy penetrantes, absorbiéndose solo la mitad de tales rayos gamma después de atravesar 11 mm de plomo. El Cesio-137 emite rayos gamma de 0,66 MeV, que son aproximadamente la mitad de penetrantes de lo que son los de Co-60. La mitad de los rayos gamma del Cesio-137 penetraron 5,5 mm de plomo. El hecho de que los rayos gamma atraviesen cantidades considerables de apantallamiento de plomo hace muy improbable que fuentes radiactivas lo bastante grandes para ser peligrosas se pudieran rodear por el suficiente apantallamiento para evitar la detección, si la sensibilidad del sistema es lo bastante grande. Los resultados preliminares de la sensibilidad se discuten posteriormente.

Tabla 1

Número de fuente	Radioisótopo	Nivel de actividad calibrado según la hoja de datos de Spectrum Techniques	Decaimientos nominales por segundo	Energía de los rayos gamma (keV)	Energía del decaimiento beta (keV)	Apantallamiento de plomo requerido para bloquear la mitad de los rayos γ	Tasa de cuentas con un contador Geiger Quantex
1	Cobalto-60	1 μ C	37.000	1173,2 1332,5	317,9	11 mm	700 μ R
2	Cesio-137	5 μ C	185.000	32 661,6	511,6 1173,2	5,5 mm	
3	Cesio-137	10 μ C	370.000	32 661,6	511,6 1173,2	5,5 mm	

Con el fin de evaluar la sensibilidad máxima del método, se recogieron datos de un contador Geiger-Muller en condiciones tan próximamente idénticas como fue posible a los datos del CCD de la *webcam* de Logitech. El detector seleccionado fue el modelo Quartex RD8901, fabricado por Quarta en Rusia. Se verificó la calibración del detector para corregirla dentro de una exactitud de un 10 % en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. El detector se colocó aproximadamente a 1,5 cm de las fuentes, con una pieza gruesa de 1/16 de pulgada (1,6 mm) de plástico acrílico entre la fuente y el detector. El plástico se usó para proporcionar un apantallamiento nominalmente equivalente al de la cubierta de la *webcam*. La operación normal del detector Quartex es recoger datos durante 31 a 33 segundos y a continuación indicar el nivel de exposición de radiación por hora en micro-Roentgen/hora. El promedio de la tasa de cuentas resultante durante un periodo de toma de muestra de seis minutos se muestra en la Tabla 1 para la muestra de Cobalto-60. Las otras fuentes sobrecargaron el detector, y no se obtuvo ninguna tasa de cuentas fiable.

Resultados para la sensibilidad del sistema. La cámara Olympus se usó solo con la fuente nº 1. Con el disco de cobalto de 1 μ C descansando plano frente a la parte posterior de la cámara, al mismo nivel que la pantalla de visión LCD, hubo un (1) impacto de rayos gamma en una de las 10 exposiciones de 0,5 segundos. En 44 experimentos de control, sin ninguna fuente radiactiva, no hubo ninguna evidencia de detección de rayos gamma en la cámara.

Se realizaron experimentos más exhaustivos con la *webcam* de Logitech que con la cámara digital de instantáneas. En cada uno de los experimentos con la *webcam*, se recogieron datos durante 15 segundos, a 15 fotogramas por segundo, para producir películas que comprendían aproximadamente 225 fotogramas. Se realizaron experimentos de control en primer lugar con la cámara rodeada por bloques de plomo y cubierta con un paño grueso de color negro. La segunda serie de ensayos fue idéntica, excepto en que se colocaron la fuente de Cobalto-60 y las dos fuentes de Cesio-137 cerca de *webcam*. La tercera serie de ensayos se hizo con la cámara sin cubrir, dirigida hacia el techo del laboratorio, sin ningún disco radiactivo en las cercanías; se retiró el bloque de plomo sobre la cámara, pero los bloques de plomo laterales se mantuvieron en su lugar. La serie final de ensayos usó los mismos ajustes que la serie previa, excepto por la inclusión de las dos fuentes de Cesio-137. Los detalles referentes a las dos primeras series de ensayos se discuten a continuación y se resumen en la Tabla 2.

Los experimentos de control consistieron en cuatro películas de video de 15 segundos representando 996 fotogramas de datos individuales, cada uno de 66,7 ms de duración. Se detectaron un total de cuatro impactos de partículas energéticas en el CCD (véanse las Figuras 5 (A-D) para las ubicaciones de los píxeles). Estas se debieron probablemente a impactos de rayos cósmicos, o al decaimiento radioactivo cercano de algún elemento de origen natural tal como Radón o sus productos de decaimiento, o a alguna otra fuente ambiental de radiación de fondo. Ninguna de las cuatro cuentas se produjo en un intervalo menor de dos segundos entre sí. Este intervalo temporal entre cuentas, y/o la tasa de cuentas mínima, se pueden usar como criterio para desencadenar una alerta y también como parte de una estrategia de supresión de falsas alarmas.

Las Figuras 6 (A-C) muestran tres secuencias de imágenes tomadas mientras la *webcam* estuvo colocada sobre las tres fuentes radiactivas. Las secuencias fueron cada una de 15 segundos de duración. Esta configuración detectó 126 impactos de partículas energéticas en el CCD entre los 773 fotogramas individuales. La tasa de cuentas varió entre 1,6 cuentas/segundo y 3,5 cuentas/segundo.

Se puede realizar una estimación de la significación estadística de estas detecciones para entender el valor del sistema como dispositivo de aviso para radiación o para la detección de radiactividad ambiental. Se consideran separadamente los tres experimentos con "fuente" que presentan 24 cuentas (Figura 6A), 49 cuentas (Figura 6B) y 53 cuentas (Figura 6C). Se midió que el nivel de radiación de fondo eficaz era aproximadamente de una (1) cuenta por 15 segundos de datos en la Figura 5. Dado que los decaimientos radiactivos siguen distribuciones de Poisson, y

que el número de cuentas por conjunto de datos es mayor que 20, se pueden hacer algunas estimaciones de la significación de las detecciones usando argumentos estadísticos Gaussianos. La incertidumbre 1σ aproximada en las medidas es la raíz cuadrada de la medición, o: 4,9, 7, y 7,3 cuentas, respectivamente, para la Fuente-1, la Fuente-2, y la Fuente-3. Estos valores proporcionan resultados de $24 \pm 4,9$ cuentas/15 segundos, 49 ± 7 cuentas/15 segundos, y $53 \pm 7,3$ cuentas/15 segundos. El primer valor está apartado unas pocas desviaciones estándar de los otros dos valores, y es posible que la *webcam* pudiera haberse deslizado ligeramente hacia las fuentes después del primer experimento; si fuera así, una traslación de ~ 7 mm podría justificar la variación observada. La significación de las detecciones, expresada en múltiplos de sus respectivas incertidumbres 1σ , es:

$$\text{significación} = (\text{valor} - \text{fondo})/\text{incertidumbre}$$

La significación resultante de la detección de la fuente radiactiva para el experimento de la "Fuente-1" es $(24-1)/4,9 = 4,7 \sigma$. Los valores correspondientes para la "Fuente-2" y la "Fuente-3" son $6,9 \sigma$ y $7,1 \sigma$, respectivamente. En estos experimentos, se conoce que existe realmente una fuente radiactiva cercana, pero que no siempre será el caso. Sería útil conocer la probabilidad para resultados tanto falsos negativos como falsos positivos. Para determinar los resultados falsos negativos, la probabilidad de que en lugar de recuperar el número esperado de cuentas, se encuentre un número cercano al de la tasa de fondo. Para tasas de cuentas iguales a las que se registran en la Tabla 2, la probabilidad de que una anomalía estadística produzca un falso negativo se puede calcular evaluando la Distribución de Probabilidad Gaussiana. Esto se puede hacer para un valor equivalente al que se debería considerar normal para el fondo, en comparación con el "número total de rayos gamma detectados" (denominado "valor medio" en la siguiente ecuación), usando los valores de 1σ . Esta probabilidad es:

$$\text{probabilidad de falso negativo} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\text{valor de fondo} - \text{valor medio}}{\sigma}\right)^2\right]$$

Para la Fuente-1, esta probabilidad es aproximadamente 1 entre 100.000, y para la Fuente-2 y las Fuente-3 es más de un orden de magnitud inferior. Por lo tanto, la sensibilidad del sistema lo hace muy potente frente a resultados falsos negativos, es decir, si la radiación ambiental es al menos tan intensa como las condiciones muy bajas de laboratorio, la tasa de cuentas será lo bastante alta como para realizar una detección. Además, lo más probable será que una fuente radiactiva esté cerca de un detector durante un tiempo prolongado, o incluso pase por múltiples detectores. Por lo tanto, el riesgo de perder una fuente se reduce proporcionalmente en el número de periodos de 15 segundos que pasa cerca de un detector.

Para calcular la probabilidad de falsos positivos, se puede usar la misma ecuación, excepto en que las definiciones de la tasa de fondo y del valor medio serían inversas, y 1σ corresponde ahora a la de la tasa de cuentas de fondo, que es proporcionalmente inferior. Para la tasa de fondo extremadamente baja observada, aproximadamente 1 cuenta por 15 segundos, la varianza se define mal a partir de las estadísticas Gaussianas respectivas; sería necesaria una exposición mucho mayor para fijarla con firmeza. Sin embargo, una estimación aproximada del orden de magnitud para la incertidumbre 1σ podría ser ± 1 cuentas (la raíz cuadrada de 1). El uso de un valor de 1 para σ significa que la aparición de una alerta por falso positivo en el nivel de la Fuente-1 sería a 25σ , es decir, una probabilidad formal menor que 10^{-116} . Se pueden realizar análisis adicionales de la tasa de alertas por falso positivo con una determinación más exhaustiva de la tasa de fondo y su varianza. La baja tasa de fondo también ayuda a asegurar que las alertas reales se manejan adecuadamente, y no se pierden en la medición del ruido.

Tabla 2: Resultados de laboratorio

Serie de experimentos	Actividad total de la fuente (μC)	Nº de fotogramas de video individuales	Número total de rayos gamma detectados	Número de fotogramas en los que se detectaron rayos gamma	Cuentas promedio por segundo
Control-1	0	224	0	0	0,0
Control-2	0	224	3	3	0,2
Control-3	0	225	0	0	0,0
Control-4	0	224	1	1	< 0,1
Fuente-1	16	225	24	20	1,6
Fuente-2	16	223	49	36	3,3
Fuente-3	16	225	53	41	3,5

La sensibilidad de campo esperada para los generadores de imágenes se puede basar en argumentos de escalado que usan resultados de detecciones de laboratorio. La Federación de Científicos Americanos realizó numerosos cálculos para evaluar el impacto probable de diversos escenarios de una bomba sucia. Los resultados de sus detalladas investigaciones se pueden encontrar en la página web de la FAS (FAS Public Interest Report 55, N.2, 2002). Uno de estos estudios del caso consideró el caso de una fuente de 10.000 Curie de Cobalto-60. Tal fuente es 10^9 veces más activa que la fuente de Cesio de $10 \mu\text{C}$ y 10^{10} veces más activa que la fuente de Cobalto de $1 \mu\text{C}$. En un cálculo preliminar no se cambiaron la geometría de la fuente o el autoapantallamiento. A medida que la distancia entre la fuente y el detector aumenta, el efecto principal es una caída de la intensidad que es proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y el detector. Las detecciones en el laboratorio tuvieron lugar con una distancia de 1,5 cm. Con las suposiciones anteriores, para una fuente 10^{10} veces más activa que nuestra fuente de Cobalto-60, se podría realizar una detección comparable cuando esta está a $(10^{10})^{1/2} \times 1,5 \text{ cm} = 1500$ metros, mientras que una fuente 10^9 veces más activa sería detectable a aproximadamente 470 metros. Sin embargo, la atenuación del aire se hace importante para distancias mayores que aproximadamente 100 metros, en cuyo punto el aire se convierte en un componente importante para los cálculos de apantallamiento. Dado que las distancias calculadas exceden la distancia en la que la atenuación del aire se hace importante, una estimación conservadora para un intervalo eficaz para los detectores en estas condiciones podría ser varios cientos de metros, aunque son posibles intervalos mayores. Alternativamente, a menores separaciones, se podría detectar una señal de radiactividad más fuerte, o se podría detectar una fuente menos activa.

EJEMPLO 2

Este ejemplo profético ilustra el uso de una cámara CCD o CMOS o una cámara de video para detectar rayos gamma procedentes de un material radiactivo.

Se pueden usar uno o más generadores de imágenes CCD o CMOS para tomar muestras de una región o de objetos en el ambiente para determinar si están presentes materiales radiactivos. Una imagen de cada una de las cámaras puede presentar una carga en cada píxel determinada usando el hardware del generador de imágenes para detectar píxeles con alta carga causados por fotoelectrones generados por rayos gamma. Alternativamente, la imagen se pueden realizar usando software o *firmware* de la cámara o un procesador central conectado a la cámara para detectar artefactos de rayos gamma. La firma de datos de un rayo gamma puede incluir uno o más píxeles que tienen alta carga o brillo por encima de un nivel de fondo o umbral. La carga, el brillo y la frecuencia de los píxeles que sufrieron el impacto de los rayos gamma emitidos por una fuente o material radiactivo se espera que sean mayores que la carga o el brillo para los mismos píxeles que interactúan con luz ambiente o radiación de fondo.

Se puede usar software para evaluar las imágenes de un generador de imágenes y llevar a cabo una serie de etapas para reducir y eliminar las alertas por falsos positivos. Estas etapas pueden incluir adquirir imágenes adicionales, calibrar el detector; comparación de la imagen y las partículas de alta energía detectadas con imágenes de otras cámaras cercanas; comparar las cuentas con un umbral; comparación de la identidad de la energía de los rayos gamma detectados con una biblioteca de isótopos radiactivos conocidos para determinar si es posible una concordancia; montar una o más imágenes para determinar si la fuente radiactiva se mueve y si las partículas de alta energía detectadas corresponden con el movimiento del objeto en la imagen, o cualquier combinación de estos actos.

Cuando se detectan partículas de alta energía por encima de un nivel predeterminado en los píxeles o las imágenes de los generadores de imágenes, se pueden emitir opcionalmente avisos o alertas a operadores del sistema u otros si existe un artefacto o firma de radiación persistente y estadísticamente significativa en uno o más píxeles o imágenes que corresponden a un material radiactivo.

Cuando se detectan partículas de alta energía por encima de un nivel y/o frecuencia predeterminados, se puede realizar un estudio intensivo de las imágenes o los píxeles de las cámaras para localizar con mayor precisión la fuente o el material radiactivo e identificar su composición. Opcionalmente, se pueden coordinar las cámaras que detectan los rayos gamma para triangular la ubicación de la fuente de radiación hasta un pequeño volumen y para mejorar la especificidad de la identificación del radioisótopo. Se pueden divulgar la ubicación y la identidad de la fuente radiactiva detectada a los operadores del sistema o a otros en alertas actualizadas.

EJEMPLO 3

Una forma no limitante de comprobar los píxeles o la imagen de un generador de imágenes es evaluar los cuatro píxeles más cercanos (4CP) en los datos de la imagen digital. Si el píxel de los datos de la imagen señalado en consideración es (X, Y) , entonces los 4CP son: $(X+1, Y)$, $(X, Y+1)$, $(X-1, Y)$, y $(X, Y-1)$. Se puede tomar el valor local de fondo del generador de imágenes como el promedio de los ocho píxeles correspondientes a $(X-2, Y-2)$, $(X, Y-2)$, $(X+2, Y-2)$, $(X-2, Y)$, $(X+2, Y)$, $(X-2, Y+2)$, $(X, Y+2)$, $(X+2, Y+2)$; alternativamente, si hay un objeto de referencia conocido en el campo, se puede establecer para que sea el fondo y el promedio de los píxeles o puntos de datos correspondientes al objeto se establecen como el fondo.

En un modo de operación como el que se ilustra en la Figura 7, una cámara digital/cámara de video digital toma una imagen (704) y en otra etapa la imagen o imágenes digitales se pueden transmitir a un ordenador (708). Se pueden buscar en las imágenes firmas específicas de impactos de rayos gamma y también se pueden incluir ensayos para falsos positivos (712). Si se descubre la evidencia de un material radiactivo, el ensayo se puede repetir con la siguiente imagen disponible (718), o de lo contrario comenzar de nuevo con la siguiente imagen (718). Si las evidencias todavía indican detección de radiactividad auténtica, se pueden emitir alertas o avisos, se puede iniciar una monitorización intensiva, y se pueden transmitir los datos a un monitor de segunda etapa para la coordinación entre cámaras 722.

Se pueden realizar ensayos adicionales para falsos positivos, por ejemplo la comparación de "píxeles calientes" imagen a imagen (726), en los que se determina si el mismo píxel o píxeles detectan tasas de cuenta elevadas imagen tras imagen. Los "píxeles calientes", si se descubriera que son un problema, se pueden calibrar habitualmente mediante una de varias técnicas comunes.

La monitorización intensiva puede incluir realizar una búsqueda en gradiente para identificar la fuente (730), identificar un radioisótopo o radioisótopos específicos (734), y/o emitir un aviso (742). El análisis de múltiples alertas permite al sistema y a los operadores rastrear e identificar la fuente de radiactividad (738).

Las funciones del software o del *firmware* para interpretar las imágenes de una cámara digital o los datos de un píxel de un chip generador de imágenes que tiene uno o más píxeles se muestran en la Figura 8. Se recogen los datos del generador de imágenes 804. Las cámaras digitales son sensibles a los productos de decaimiento de materiales radiactivos (partículas energéticas y rayos gamma). Si están próximos materiales radiológicos, algunos de los productos del decaimiento pueden penetrar en el cuerpo de la cámara e impactar en el detector digital, creando artefactos en la imagen 808.

Se puede analizar en las imágenes de una cámara digital la presencia de artefactos 812. Si no se detecta ninguna evidencia de radiactividad, la recogida de imágenes puede continuar 804. Si se detectan evidencias de radiactividad, se repite opcionalmente el análisis de uno o más fotogramas adicionales 816. El análisis repetido puede servir como un cribado para falsos positivos 816. El análisis de los fotogramas puede continuar hasta que un número suficiente de fotogramas muestra que está presente material radiactivo (la evidencia persiste) 820, o que no hay ningún material radiactivo presente (la evidencia de material radiactivo no persiste); por ejemplo, las cuentas, el brillo de la imagen, o la carga de los píxeles del generador de imágenes están sistemáticamente por debajo de un umbral 820. Cuando la evidencia no persiste, la recogida de imágenes puede continuar 804.

Si la evidencia de la presencia de radiación persiste, el sistema puede emitir una alerta o aviso 824. Los detectores pueden realizar la monitorización intensiva mediante una búsqueda en gradiente para identificar una fuente detectada, no necesariamente inicialmente dentro de la imagen/fotograma de video 828. Opcionalmente, se pueden analizar múltiples alertas para rastrear e identificar la fuente de radiactividad. A medida que se recogen los datos, se pueden divulgar alertas adicionales 832. Esta información puede incluir alertas recogidas por otras cámaras digitales 806.

En la Figura 8, se recogen las imágenes digitales de una o más cámaras/cámaras de video 804. Se pueden usar las cámaras con fines de seguridad o pueden estar conectadas en red con un centro de operaciones. Estas cámaras digitales se pueden usar para trabajar como detectores de radiación tanto si se usan para la monitorización de video de seguridad como si no. Los detectores (por ejemplo, CCD, CMOS, etc.) son sensibles a partículas energéticas provenientes de decaimientos radiactivos. En particular, los rayos gamma son los que tienen una mayor probabilidad tanto de impactar en el detector como de interactuar con este de modo que sean detectables. Los detectores manifiestan esta sensibilidad independientemente de la dirección con la que los rayos gamma entran en la cámara. El tamaño físico (por ejemplo, en pulgadas cuadradas) del detector, y su orientación angular, puede determinar el ángulo sólido subtendido por el detector, desde la perspectiva de la fuente radiactiva. Un ángulo sólido mayor puede producir una mayor tasa de rayos gamma que interactúan con el detector. Una fuente radiactiva que tiene un mayor grado de actividad (por ejemplo, más decaimientos por segundo) puede producir una mayor tasa de rayos gamma que interactúan con el detector. Los datos de cada cámara se pueden transmitir a un ordenador donde se realiza el análisis. La transmisión puede ser a través de un cable, red, o radiación electromagnética tal como, pero no limitada a, ondas de radio. En etapas posteriores del proceso de detección y análisis, se pueden combinar los resultados de dos o más cámaras para proporcionar un mayor detalle.

Las cámaras digitales son sensibles a los productos de decaimiento de partículas energéticas y rayos gamma de materiales radiactivos 808. Si están próximos materiales radiológicos, algunos de los productos de decaimiento penetrarán en el cuerpo de la cámara e impactarán en el detector digital, creando artefactos en la imagen. En las imágenes recogidas por el detector, la ausencia de rayos gamma puede producir imágenes sin motas de color blanco (Figura 16 A); las imágenes o los datos con detecciones de rayos gamma pueden presentar motas de color blanco (Figura 16 B).

El procedimiento de análisis 812 se puede ejecutar a intervalos especificados (por ejemplo, 3 veces por segundo), a petición (por ejemplo, hacer clic para el análisis), tan rápido como la cámara pueda suministrar imágenes y/o el ordenador u ordenadores pueda analizarlas, u otros modos. Las decisiones tomadas en las etapas 824, 828, y 832 pueden influenciar el modo de selección y la tasa de imágenes.

- 5 Cada imagen se puede convertir a un formato de archivo adecuado para su procesamiento adicional (por ejemplo, FITS, SDF, etc.). Se conocen en la técnica programas adecuados para transferir un archivo a un formato adecuado e incluyen Graphic Converter de Thorsten Lemke u otros programas similares. La imagen se puede leer en la memoria. Se puede realizar una búsqueda en esta imagen para buscar las motas de color blanco producidas cuando los rayos gamma impactan e interactúan con el detector digital. Se puede usar una combinación de algoritmos para
 10 detectar impactos de rayos gamma en una imagen. La intensidad de las motas de color blanco se puede usar para determinar la energía de los impactos de los rayos gamma, y también se pueden determinar las relaciones de energía para los impactos. Por ejemplo, el programa "BCLEAN", que es un componente del paquete de software "Figaro" desarrollado por Keith Shortridge, los contenidos del cual se incorporarán en el presente documento por referencia en su totalidad, incluyen rutinas que se pueden usar en imágenes de CCD para detectar y retirar líneas malas y los artefactos de rayos cósmicos de una imagen astronómica. Estas rutinas y las modificaciones de las mismas se pueden usar para detectar artefactos o impactos de rayos gamma en una imagen o en una representación almacenada de una imagen de un generador de imágenes CCD o CMOS. En lugar de retirarlos de la imagen, las rutinas se pueden usar para identificar y caracterizar los rayos gamma que impactan en el generador de imágenes.
- 20 En una realización, se puede calcular una diversidad de relaciones de intensidad de píxeles y usarse para identificar características de imágenes o píxeles de picos extremadamente definidos que pueden corresponder a rayos gamma. Estos píxeles se pueden marcar y evaluar mediante otros ensayos.

En una realización, cada píxel de una imagen se puede evaluar basándose en un ajuste de usuario o en constantes del sistema. Por ejemplo, C(1), C(2), C(3) y C(4) pueden ser constantes definidas por el usuario (aunque también son posibles más o menos constantes). Un conjunto de uno o más ensayos para evaluar píxeles en una imagen puede incluir: determinar si el valor de los datos de un píxel es mayor que cero; determinar si el valor de los datos de un píxel es mayor que el de cada uno de los cuatro píxeles más cercanos (4CP) en la imagen; determinar si el valor de los datos de un píxel es mayor que el promedio de los 4CP en C(1) cuentas; determinar si el valor de los datos de un píxel es mayor que el promedio de los 4CP en C(2) veces el promedio; determinar si el valor de los datos de un píxel es mayor que el promedio de los 4CP en C(3) veces la raíz cuadrada del promedio; también se pueden realizar otros ensayos. Opcionalmente, se puede calcular un parámetro de forma para evaluar la forma general del pico de la imagen. Se puede construir una relación de [(el valor del pico central menos el promedio de los 4CP) / (el promedio de los 4CP menos el promedio de fondo local)]. El método puede determinar si esta relación de forma es mayor que C(4).

35 Se puede considerar que los píxeles que superan un número de estos ensayos presentan evidencias de un rayo gamma. Por ejemplo, un píxel que ha superado los cinco primeros ensayos y, ocasionalmente, el sexto, se puede considerar que es una posible detección de rayos gamma, y en el control del flujo de la Figura 8, el control podría fluir a 816. Si ningún píxel supera todos los ensayos, se considera que la imagen no tiene rayos gamma; el procedimiento puede considerar entonces la siguiente imagen 804.

40 Si se detectan rayos gamma en una imagen 816, el método se puede usar para determinar cuántas veces se pueden detectar rayos gamma en el siguiente periodo definible por el usuario. El periodo se puede basar en el número de fotogramas, que puede ser de 1 a aproximadamente 1000 fotogramas o de 1 a aproximadamente 15 fotogramas, o en una cantidad de tiempo, que puede ser de aproximadamente 0,5 a aproximadamente 30 segundos, o de aproximadamente 1 a aproximadamente 10 segundos, aunque son posibles tiempos más cortos y más largos.

45 Si están presentes rayos gamma detectados por el usuario en el periodo definible por el usuario y se excede el umbral, por ejemplo 3-5 fotogramas, se puede considerar que la detección es una detección persistente y auténtica, en lugar de ruido transitorio.

También se puede usar el número de rayos gamma detectados por imagen para determinar la veracidad de la detección. El usuario puede configurar el sistema para ignorar los fotogramas que tienen menos de cierto número umbral de detecciones de rayos gamma. Por ejemplo, el umbral puede ser 1-2 detecciones de rayos gamma por imagen, pero se podría ajustar a un valor mayor en un área con más radiación ambiental o a una altitud muy elevada. Una fuente radiactiva persistente puede disparar una alerta y el control del sistema puede fluir a 828, pero la captura y el análisis de datos pueden continuar. Todos los datos pertinentes se pueden registrar y comunicar a través de una conexión segura (por ejemplo, encriptada) a una estación de monitorización para una revisión
 55 adicional y posibles operaciones de seguridad.

Si la actividad detectada en una imagen no se repite, o no alcanza el nivel umbral, los datos se pueden registrar opcionalmente, y el control se puede devolver a los actos de recogida convencional de datos 804, 808, y 812.

Las fuentes persistentes de rayos gamma basadas en la evaluación de un píxel o imagen se pueden interpretar como un suceso de radiación, y disparar alertas definidas 824 incluyendo una alarma de operador, una alarma basada en ordenador, alertas en red, combinaciones de estas y otras alertas. Además de las alertas, se puede activar en la cámara el modo de monitorización intensiva que fue responsable de la detección del suceso de radiación 828. Se pueden poner otras cámaras, por ejemplo cámaras cercanas, en un modo más rápido de toma y análisis de datos para mejorar las oportunidades de detección de una fuente radiactiva. Si más de una cámara detecta la radiación, se pueden coordinar estas detecciones independientes 832.

Las monitorización intensiva 828 puede tener diversos resultados incluyendo la verificación de que la fuente radiactiva está aún cerca de la ubicación aproximada, la extracción de una ubicación más precisa de la fuente radiactiva, y la identificación del tipo específico de radioisótopo.

Una vez se realiza una detección positiva de radiactividad, los análisis posteriores pueden actualizar el estado actual, sin tener que revalidar la alerta por persistencia. Estas actualizaciones se pueden usar para verificar que la fuente aún está presente y se pueden usar para la búsqueda en gradiente de la sección 828.

Algunas cámaras se pueden mover mediante un operador remoto, y/o mediante control por ordenador. Estas cámaras se pueden mover panorámicamente e inclinar para alterar su orientación con respecto a la fuente radiactiva. A medida que una cámara se mueve para alinear su detector más cercano a la perpendicular de la fuente, la tasa de cuentas puede aumentar. Por el contrario, cuando la cámara se dirige de modo que alinea el detector más hacia los márgenes de la fuente radiactiva, la tasa de cuentas de rayos gamma puede disminuir. De este modo, se puede realizar una búsqueda en gradiente mediante el operador de la cámara o mediante una búsqueda controlada por ordenador (cuadrícula, trama, espiral, u otra). En una puesta en práctica de la búsqueda en gradiente, cada vez que la tasa de cuentas aumenta (promediada durante un número de fotogramas definible por el usuario, por ejemplo 3-5 fotogramas), puede comenzar una nueva búsqueda en gradiente con un nuevo vector de cuenta máxima que define el nuevo origen del patrón de búsqueda. Cuando se alcanza un máximo global, el detector puede estar apuntando directamente hacia, o bien directamente hacia fuera de, la fuente radiactiva. En numerosos casos, la posición de la cámara puede hacerla extremadamente difícil para una fuente que esté colocada en una de estas posiciones (por ejemplo, en el tejado de una estación del tren, o flotando suspendida en el aire a corta distancia por encima de una autopista). Las imágenes de objetos físicos detectadas por el generador de imágenes se pueden usar para ayudar a determinar y resolver las incertidumbres en la localización de la fuente. Los datos de la cámara digital de imágenes de objetos físicos se pueden usar para medir el tamaño angular aparente de características identificables de modo que se realicen estimaciones de la fuerza de la fuente radiactiva. Por ejemplo, si se identifica un automóvil como la fuente de actividad, se puede determinar la distancia del coche al generador de imágenes de la cámara basándose en su tamaño angular aparente y su longitud, peso, etc. conocidos usando relaciones trigonométricas. Se pueden comparar la distancia calculada y la sensibilidad conocida para determinar si los datos son autoconsistentes.

Se puede medir la energía depositada por el rayo gamma en el detector además de determinar la ubicación dentro del detector y la hora de la detección. La cantidad de energía depositada en el detector aumenta con el aumento de la energía del rayo gamma. Cada radioisótopo puede tener un espectro único de energías de rayos gamma. La medida de la energía depositada, más una comparación con una biblioteca de energías puede permitir la determinación del radioisótopo específico. Esta identidad se puede informar.

Múltiples cámaras pueden detectar una fuente radiactiva específica. Se pueden analizar los datos de cada cámara. Cada cámara puede recibir instrucciones para llevar a cabo una búsqueda intensiva 828 para identificar el isótopo específico y para realizar su propia búsqueda en gradiente. Combinando los resultados del análisis de la imagen de cada cámara, se puede obtener información adicional de la fuente. Las imágenes de cada cámara se pueden usar para realizar una búsqueda en gradiente. Ya que cada cámara informa la dirección más probable a partir de su búsqueda en gradiente, se espera que estos vectores converjan hacia un área individual. Dado que las diferentes cámaras se colocan en diferentes ubicaciones, la triangulación resultante puede facilitar la determinación de la ubicación de la fuente y puede ayudar en los casos en los que no es posible que los datos de una cámara individual determine adecuadamente la ubicación de la fuente. La ubicación revisada de la fuente de radiactividad se puede añadir a la información de la alerta.

La coordinación de los datos del detector de diversos generadores de imágenes también puede permitir una nueva determinación de la identidad del radioisótopo por comparación de más datos con los valores de la biblioteca. Se puede obtener una mayor significación o confianza de los rayos gamma identificados en una imagen combinando los resultados del análisis de una o más cámaras. La estimación revisada de las propiedades de la fuente radiactiva se puede informar a través de los sistemas de alerta.

55 EJEMPLO 4

Los experimentos de laboratorio realizados con pequeñas fuentes radiactivas confirman que los generadores de

imágenes basados en plataformas CCD o CMOS son sensibles a impactos de partículas energéticas. Los experimentos de control verifican que los procedimientos implantados eliminan básicamente la aparición de alertas por falsos positivos. Para que suceda tal falsa alarma, la tasa de fondo debería experimentar un aumento inexplicable en aproximadamente un factor de 20 a 50 y permanecer de ese modo durante segundos. La probabilidad de tal resultado es muy escasa. De forma similar, las detecciones realizadas en los experimentos de laboratorio dieron como resultado detecciones significativas que se muestran en las Figuras 6A-6C, incluso con fuentes radiactivas de un tamaño probable que represente una amenaza viable. Se espera que las fuentes radiactivas que tienen una tasa de desintegración de unos pocos miles de Curies, muestras lo bastante grandes para presentar una amenaza de seguridad, sean detectables en intervalos de al menos unos pocos a varios cientos de metros, y posiblemente mucho más, dependiendo del grado de apantallamiento, la atenuación de la separación de aire y el inverso del cuadrado del decaimiento.

El efecto de la distorsión geométrica que reduce el ángulo sólido proyectado del detector a ángulos distintos de la perpendicular a la fuente hacen que se ejecute una búsqueda en gradiente. Este procedimiento hace que se tomen mediciones de la actividad a través de un intervalo de orientaciones panorámica-inclinación (o altitud-azimut). La comparación de los niveles medidos con la dirección impresa proporciona el vector de dirección más probable que apunta a lo largo de la línea que une la ubicación actual de la fuente con el detector de la cámara. En numerosas instalaciones, podría ser imposible que una fuente radiactiva esté en uno de los extremos de la cámara, reduciendo la cuestión de la ubicación al intervalo a lo largo de un vector. Este resultado podría ocurrir, por ejemplo, con una cámara montada a cierta altura en un poste; razonablemente, no se podría esperar que la fuente radiactiva estuviera suspendida cercana en el aire. En otros ejemplos, el apantallamiento de uno o más extremos de la cámara se puede usar para atenuar los rayos gamma para diferenciar la ubicación de la fuente radiactiva. Además o alternativamente, se pueden usar los datos de cámaras cercanas para determinar la ubicación de la fuente de material radiactivo.

EJEMPLO 5

El radón, un producto del decaimiento del radio-226 emite una partícula alfa y puede emitir rayos gamma (Ra-219) cuando decae. El plomo, el bismuto y el talio, nucleidos hijos por decaimiento del Ra-226, pueden emitir rayos gamma y se pueden usar para determinar la presencia de radón. Por ejemplo, el bismuto-214, nucleido hijo del Ra-226, emite rayos gamma con picos de energía principales de 609 keV, 1.120 keV, y 1.764 keV, rayos gamma emitidos por productos del decaimiento del radón. Se puede usar un generador de imágenes CCD o CMOS para detectar radón y sus productos de decaimiento en una diversidad de ajustes. El generador de imágenes se puede colocar en, o cerca de, el área que se va a ensayar. Opcionalmente, se puede usar apantallamiento para proporcionar un control. Los datos del generador de imágenes se pueden analizar para partículas de rayos gamma de alta energía para determinar la identidad y número de cuentas en el área ensayada. Alternativamente, el capacitor conectado al amplificador MOSFET que convierte la carga de la señal en tensión para el generador de imágenes se puede medir para la carga a medida que se lee cada píxel. Una carga o una tensión por encima de un umbral determinado se puede usar para indicar la presencia de rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva en el área que se está ensayando.

EJEMPLO 6

En un ejemplo de un detector de imágenes, la señal generada por el detector es el resultado de rayos gamma que inciden en un CCD de silicio/dióxido de silicio. Se realizó un estudio preliminar de la interacción y la deposición de energía de los rayos gamma en los detectores CCD de Si/SiO₂ y se descubrió que estos dispositivos eran capaces de detectar con éxito radioisótopos apantallados con plomo. Se estudiaron modelos de dos geometrías diferentes, representando los probables extremos que se encuentran en operaciones de campo realistas. Un modelo implicaba placas delgadas del material de fuente, que minimiza la autoabsorción de rayos gamma; el otro modelo tenía una distribución esférica que maximiza la autoabsorción de rayos gamma. El modelo de placas sostuvo tasas de detección, distancias y niveles de confianza mucho mayores, pero incluso los modelos esféricos dieron como resultado señales detectables a distancias de 20-100 metros.

Aunque la presente invención se ha descrito con detalle considerable por referencia a ciertas realizaciones preferentes de la misma, son posibles otras versiones. Por lo tanto, en alcance de las reivindicaciones anexas no se debería limitar a la descripción y a las versiones preferentes contenidas dentro de la presente memoria descriptiva.

REIVINDICACIONES

1. Sistema que comprende:

- 5 uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556), interactuando cada generador de imágenes en uso con luz ambiente y radiación ambiente que comprende un detector pixelado (1508) que comprende píxeles para crear al menos una de una imagen instantánea digital y una imagen de video digital de la luz ambiente, y capaz de interactuar con al menos una partícula de alta energía de la radiación ambiente y obtener simultáneamente una imagen, siendo capaz el generador de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) de transmitir datos de imágenes que incluyen potencialmente artefactos de imagen indicativos de la interacción de una partícula de alta energía con un píxel del detector pixelado (1508);
- 10 al menos un procesador (1560) en comunicación con los uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) en el que el al menos un procesador (1560) recoge datos de imágenes de cada uno de los detectores pixelados (1508) y en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para identificar a partir de los datos de imágenes recogidos al menos un píxel que ha interactuado con al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512), en el caso de tal interacción; y al menos un dispositivo de salida adaptado para informar de la interacción de
- 15 al menos una partícula de alta energía con el al menos un píxel identificado.
2. El sistema de la reivindicación 1, en el que el detector pixelado (1508) se selecciona entre detectores de fotones pixelados, generadores de imágenes de dispositivo de carga acoplada (CCD), generadores de imágenes de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), y generadores de imágenes que contienen sustratos de silicio-germanio, germanio, silicio sobre zafiro, indio-galio-arseniuro, cadmio-mercurio-telururo, o galio-arseniuro y una combinación de los mismos.
- 20 3. El sistema de la reivindicación 1, en el que los uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) se seleccionan entre cámaras de seguridad, cámaras de tráfico, cámaras de tránsito (416), cámaras móviles para el cumplimiento de la ley, cámaras de teléfonos móviles (1552), cámaras infrarrojas térmicas y una combinación de las mismas.
- 25 4. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada uno de los uno o más detectores pixelados (1508) están interconectados.
5. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada uno de los uno o más detectores pixelados (1508) se adapta para visión panorámica, inclinación o una combinación de los mismos.
- 30 6. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada uno de los uno o más detectores pixelados (1508) se adapta para monitorizar objetos seleccionados entre objetos animados e inanimados, vehículos a motor, aviones, trenes, vagones de tren subterráneo, personas, animales, edificios, vegetación, equipaje, cajas, bolsas, bolsos, maletines, correo y una combinación de los mismos.
7. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) se selecciona entre un ordenador, un procesador de imágenes de video, y una combinación de los mismos.
- 35 8. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) recoge datos de cada uno de los uno o más detectores pixelados (1508) simultáneamente.
9. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para recoger datos de imágenes que comprenden una o más imágenes instantáneas digitales, una o más imágenes de video digitales o una combinación de las mismas.
- 40 10. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para recoger datos de imágenes que comprenden dos o más imágenes consecutivas.
11. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para recoger datos que comprenden un cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas producido cuando el al menos un píxel interactúa con la al menos una partícula de alta energía.
- 45 12. El sistema de la reivindicación 11, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para determinar si el cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas es significativamente mayor que el cambio en la carga cuando la luz ambiente interactúa con el al menos un píxel.
13. El sistema de la reivindicación 11, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para determinar si el cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas es mayor que la radiación ambiente o de fondo.

14. El sistema de la reivindicación 11, en el que el al menos un procesador (1560) se adapta para determinar un cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas que es proporcional a una energía de la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512).
- 5 15. El sistema de la reivindicación 1, en el que una salida del al menos un dispositivo de salida se selecciona entre una alarma, una imagen fotográfica, una imagen de video, una imagen en un monitor, un sonido audible, una llamada telefónica, una transmisión de radio y una combinación de las mismas.
16. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un procesador (1560) está en comunicación con el al menos un dispositivo de salida a través de una conexión segura o encriptada.
- 10 17. El sistema de la reivindicación 1, en el que el al menos un dispositivo de salida muestra una o más imágenes instantáneas digitales, una o más imágenes de video digitales o una combinación de las mismas obtenidas a partir de al menos uno de los uno o más detectores pixelados (1508).
18. El sistema de la reivindicación 17, en el que las una o más imágenes y el al menos un píxel identificado se usan para identificar una ubicación probable de una fuente de una partícula de alta energía.
- 15 19. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada detector pixelado (1508) es capaz de interactuar con al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512) producida por una fuente (412, 1520) seleccionada entre radiación ambiente, radiación de una fuente natural, material radiactivo, un dispositivo nuclear, una bomba sucia, un arma nuclear antes de la detonación, un arma nuclear después de la detonación y una combinación de las mismas.
- 20 20. El sistema de la reivindicación 1, en el que cada detector pixelado (1508) es capaz de interactuar con al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512) seleccionada entre un neutrón, un rayo gamma, una partícula alfa, una partícula beta o una combinación de las mismas.
- 25 21. Método para detectar partículas de alta energía (422, 426, 1512) que usa uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) en uso que interactúan con luz ambiente y radiación ambiente que comprenden un detector pixelado (1508) que comprende píxeles para crear al menos una de una imagen instantánea digital y una imagen de video digital, capaz de interactuar con al menos una partícula de alta energía y obtener simultáneamente una imagen, siendo capaz el generador de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) de transmitir datos de imágenes que incluyen potencialmente artefactos de imagen indicativos de interacción de una partícula de alta energía con un píxel del detector pixelado (1508); comprendiendo el método:
- 30 recoger, mediante al menos un procesador (1560) en comunicación con los uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556), datos de imágenes de los uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556);
- identificar, mediante al menos un procesador (1560), a partir de los datos de imágenes recogidos al menos un píxel que ha interactuado con al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512), en el caso de tal interacción; e
- 35 informar, mediante al menos un dispositivo de salida, de la interacción de al menos una partícula de alta energía con al menos un píxel.
22. El método de la reivindicación 21, en el que el detector pixelado (1508) se selecciona entre un dispositivo de carga acoplada (CCD), un dispositivo semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) y generadores de imágenes de sustratos de silicio-germanio, germanio, silicio sobre zafiro, indio-galio-arseniuro, cadmio-mercurio-teluro, o galio-arseniuro y una combinación de los mismos
- 40 23. El método de la reivindicación 21, en el que los uno o más generadores de imágenes (416, 420, 1504, 1524, 1556) se seleccionan entre cámaras de seguridad, cámaras de tráfico, cámaras de tránsito, cámaras móviles para el cumplimiento de la ley, cámaras de teléfonos móviles, cámaras infrarrojas térmicas y una combinación de las mismas.
24. El método de la reivindicación 21, en el que los uno o más detectores pixelados (1508) están interconectados.
- 45 25. El método de la reivindicación 21, en el que la etapa de recoger datos comprende obtener un cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas producido cuando el al menos un píxel interactúa con la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512).
26. El método de la reivindicación 25, que comprende además cuantificar el cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas.

27. El método de la reivindicación 26, que comprende además utilizar el cambio en la carga, la tensión o una combinación de las mismas para determinar al menos uno de:
- una energía de la al menos una partícula de alta energía;
 un tipo de una fuente (714, 1520) de la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512); o
 una cantidad de partículas de alta energía de la fuente (714, 1520).
28. El método de la reivindicación 27, en el que el tipo de material de fuente es al menos un radioisótopo.
29. El método de la reivindicación 21, que comprende además rastrear la fuente (714, 1520) de la al menos una partícula de alta energía en el que el rastreo comprende mover al menos uno de los uno o más detectores pixelados (1508) de modo que al menos una partícula de alta energía interactúe con el al menos un detector pixelado (1508).
30. El método de la reivindicación 29, en el que la fuente (714, 1520) de la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512) se mueve.
31. El método de la reivindicación 29, que comprende además rotar el al menos un detector pixelado (1508) horizontal o verticalmente hasta que se determina el flujo máximo.
32. El método de la reivindicación 31, en el que el flujo máximo se produce cuando el detector pixelado es perpendicular a la fuente (412, 1520) de la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512).
33. El método de la reivindicación 29, que comprende además realizar una búsqueda en gradiente en el que la búsqueda en gradiente comprende conducir el movimiento del al menos un detector pixelado (1508) hasta que se alcanza el flujo máximo.
34. El método de la reivindicación 29, en el que el rastreo comprende además:
- realizar simultáneamente una búsqueda en gradiente para cada uno de una pluralidad de detectores pixelados (1508) y determinar el flujo máximo para cada detector pixelado individual (1508); y
 referenciar simultáneamente el flujo máximo de cada detector pixelado (1508) y las imágenes fotográficas y de video de cada detector pixelado (1508) para determinar la ubicación probable de la fuente de las partículas de alta energía, en el que la posición probable de la fuente de partículas de alta energía es un área de cada imagen donde el flujo máximo y las imágenes intersectan.
35. El método de la reivindicación 21, en el que la etapa de recoger datos comprende además obtener una o más imágenes instantáneas digitales, una o más imágenes de video digitales o una combinación de las mismas de los uno o más detectores pixelados (1508).
36. El método de la reivindicación 35, que comprende además usar las una o más imágenes y el al menos un píxel identificado para identificar una ubicación probable de una fuente de una partícula de alta energía.
37. El método de la reivindicación 36, en el que la ubicación probable de la fuente (412, 1520) aparece en una o más imágenes consecutivas.
38. El método de la reivindicación 37, que comprende además monitorizar una posición de la ubicación probable de la fuente (412, 1520) en cada una de las una o más imágenes consecutivas para rastrear el movimiento de la fuente (412, 1520).
39. El método de cualquiera de las reivindicaciones 29-34, en el que el movimiento de al menos uno de los uno o más detectores pixelados (1508) comprende movimiento panorámico, inclinación o una combinación de los mismos.
40. El método de la reivindicación 23, que comprende además monitorizar un objeto seleccionado entre objetos animados e inanimados, vehículos a motor, aviones, trenes, vagones de tren subterráneo, personas, animales, edificios, vegetación, equipaje, cajas, bolsas, bolsos, maletines, correo y una combinación de los mismos.
41. El método de la reivindicación 23, que comprende además comprobar las detecciones por falsos positivos de la al menos una partícula de alta energía (422, 426, 1512).
42. El método de la reivindicación 23, que comprende además generar una alerta cuando se identifica el al menos un píxel.

43. El método de la reivindicación 23, en el que la fuente (412, 1520) de las partículas de alta energía (422, 426, 1512) se selecciona entre radiación ambiente, radiación de una fuente natural, material radiactivo, un dispositivo nuclear, una bomba sucia, un arma nuclear antes de la detonación, un arma nuclear antes de la detonación y una combinación de los mismos.

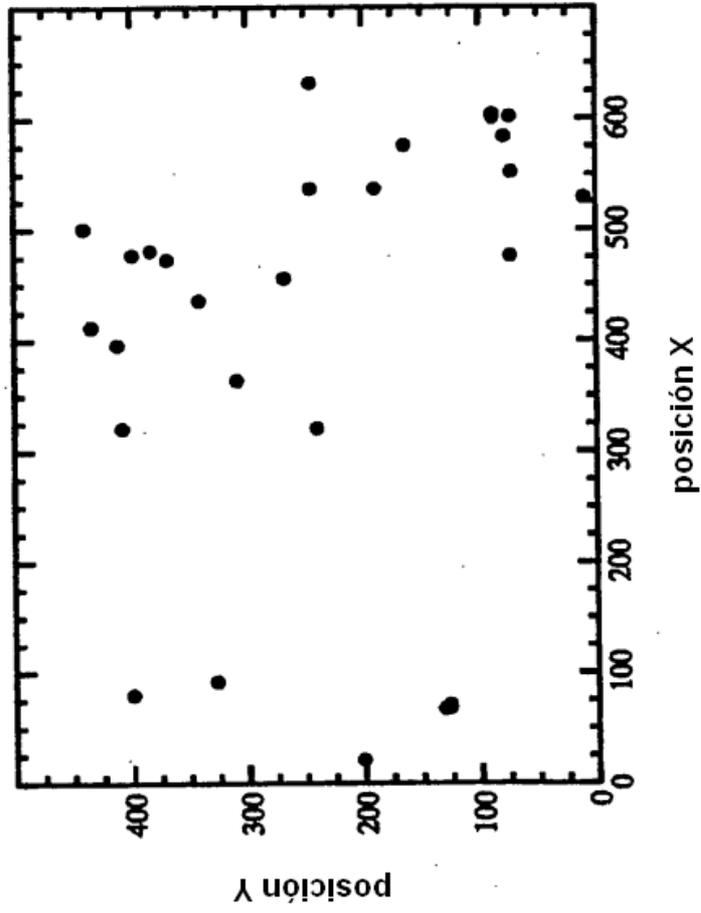


FIG. 1

FIG. 2A

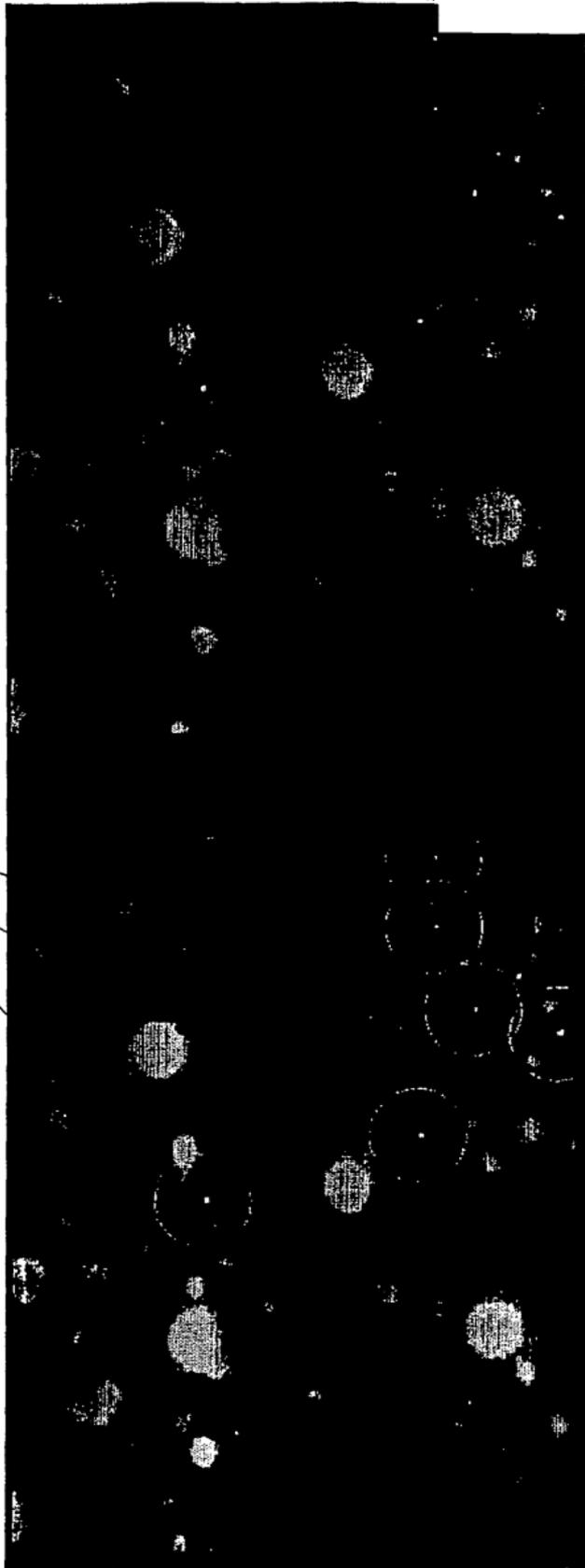


FIG. 2B



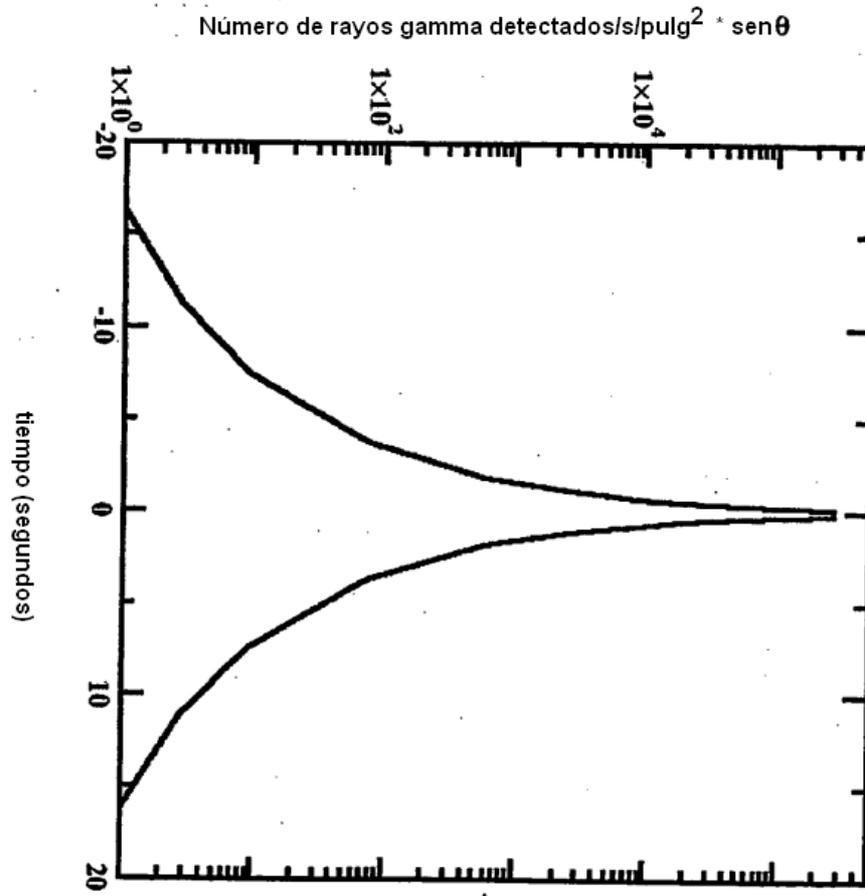


FIG. 3

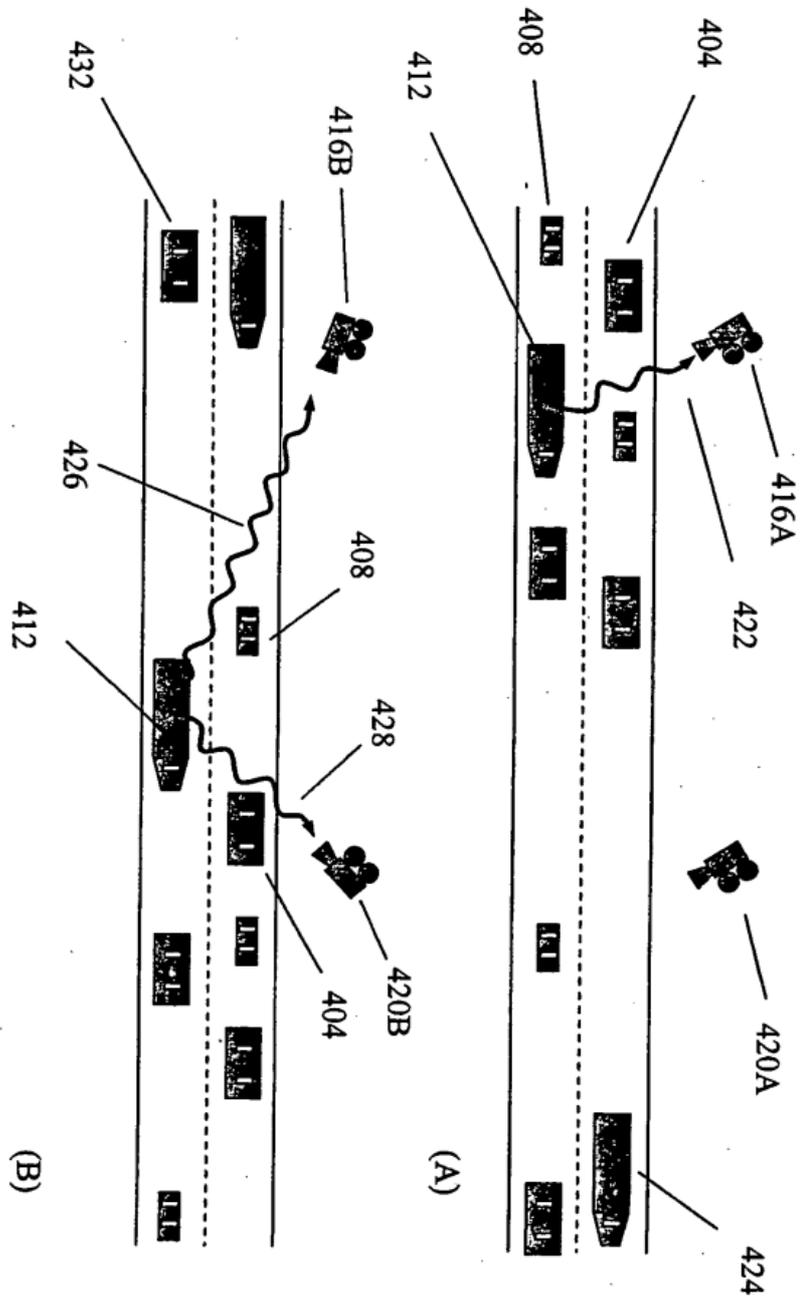


FIG. 4

FIG. 5 B

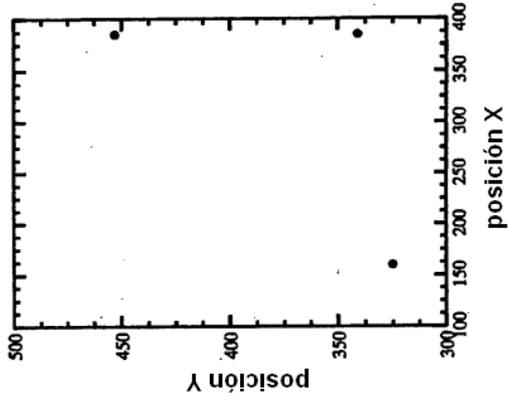


FIG. 5 D

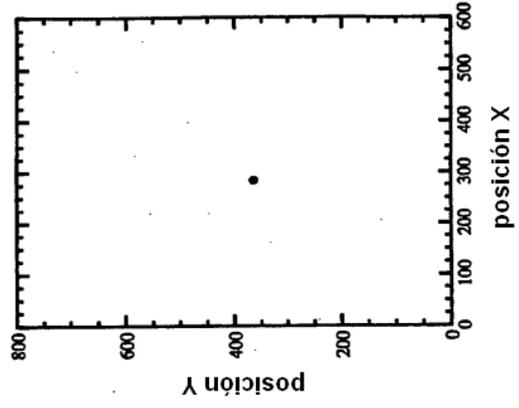


FIG. 5 A

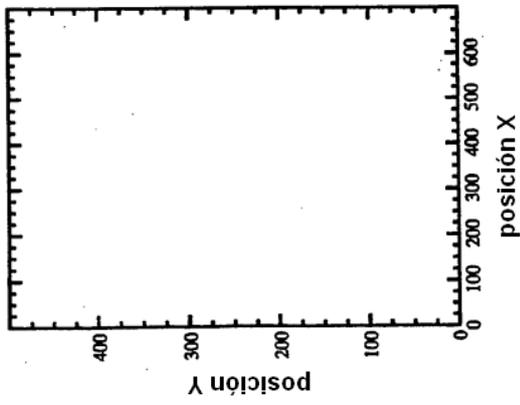
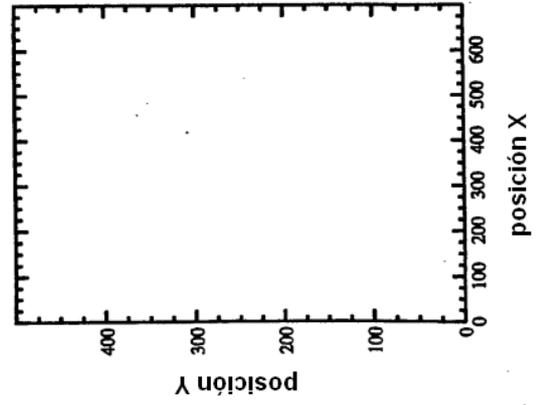


FIG. 5 C



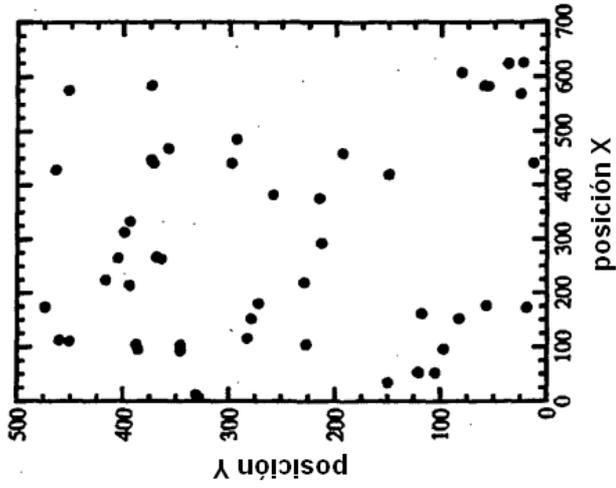


FIG. 6C

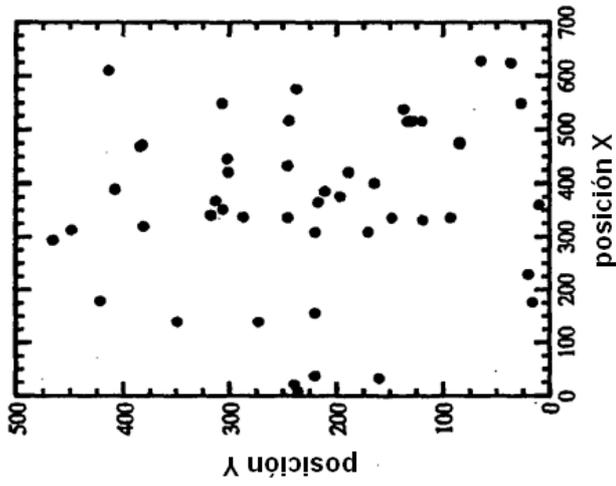


FIG. 6 B

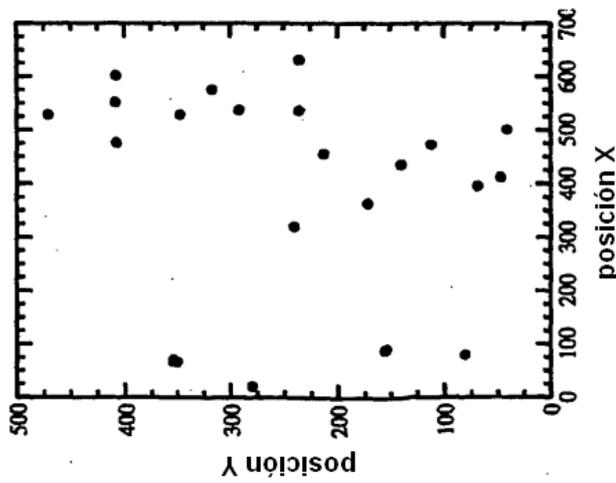


FIG. 6 A

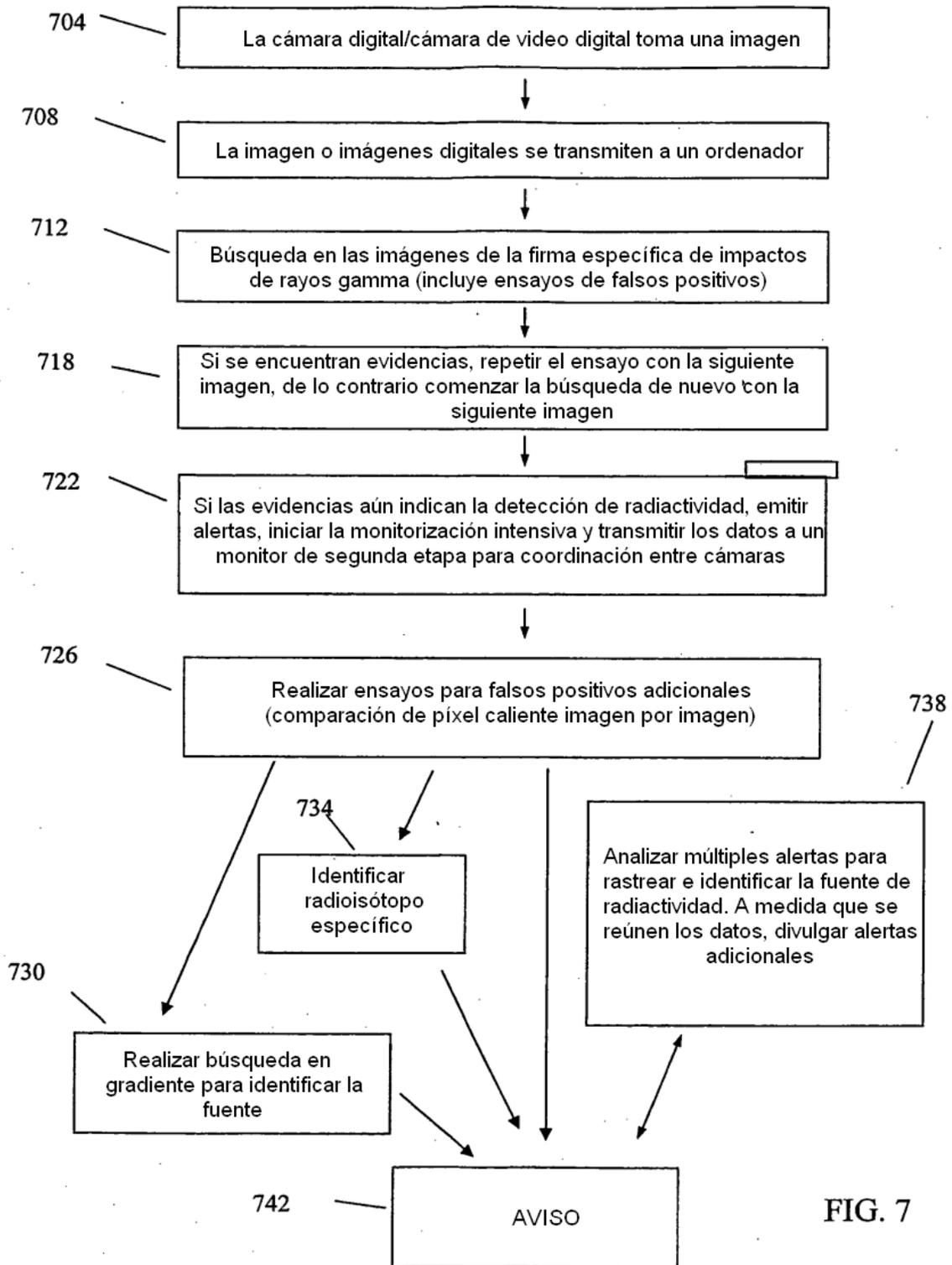


FIG. 7

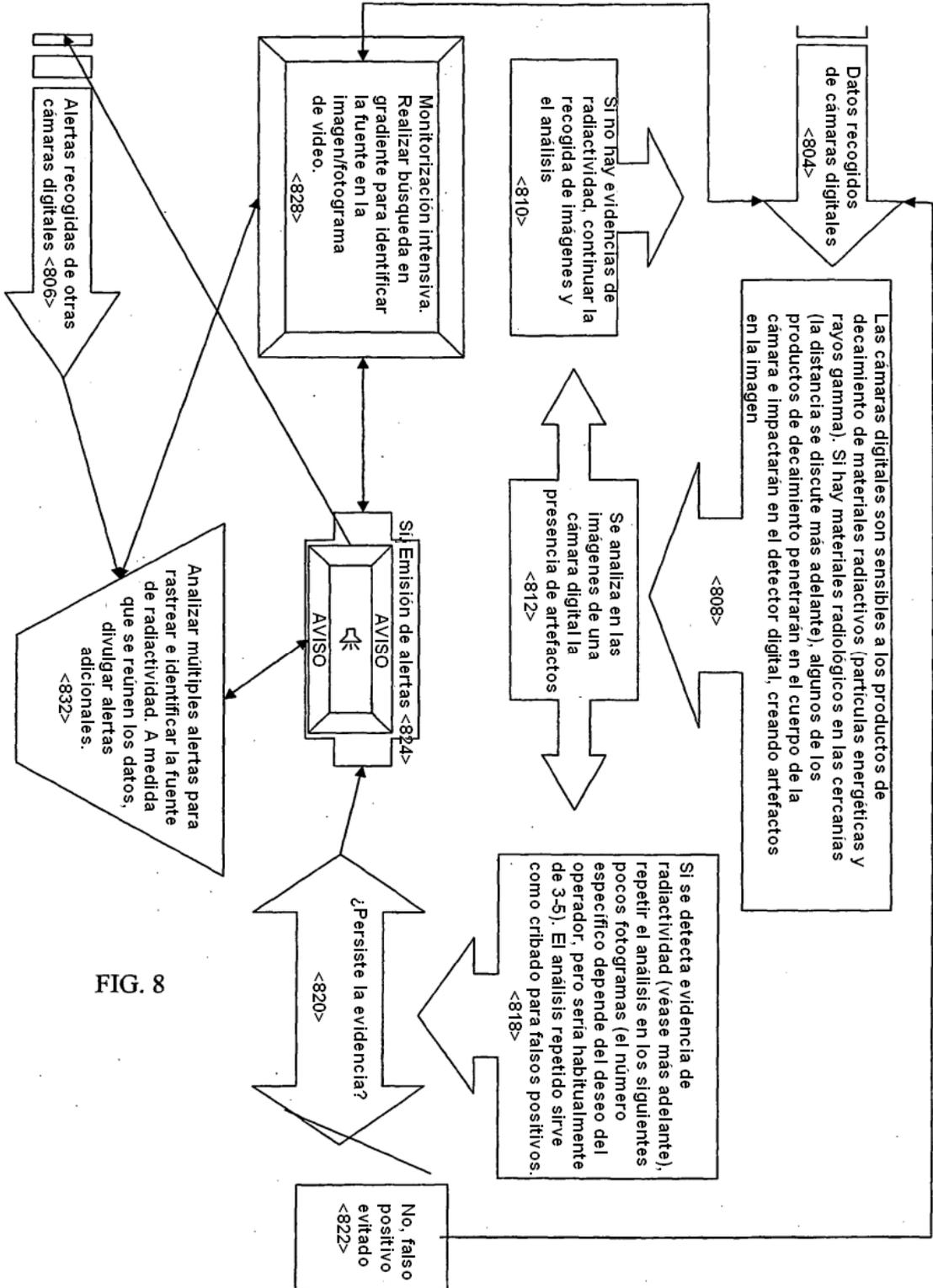


FIG. 8

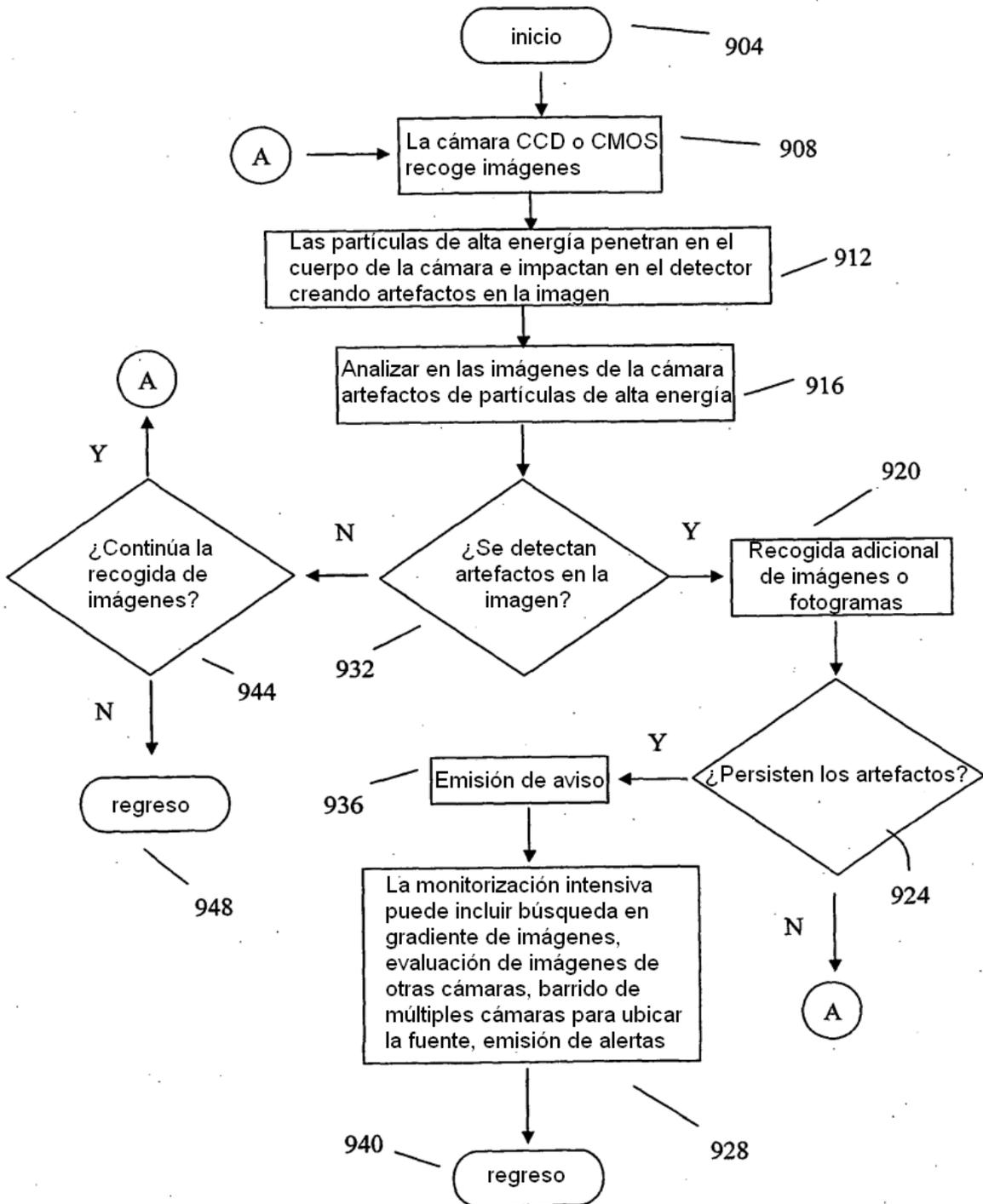


Fig. 9

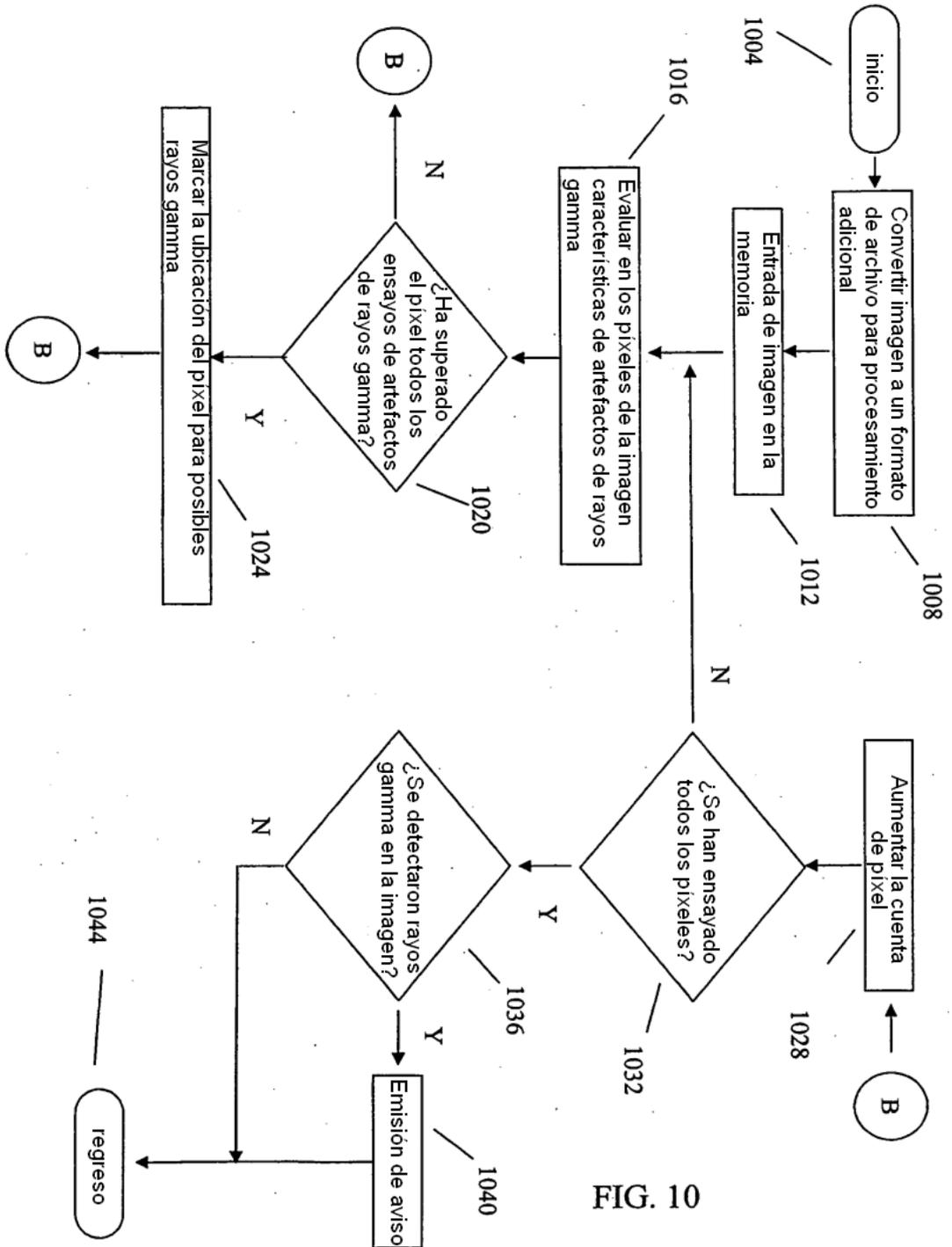


FIG. 10

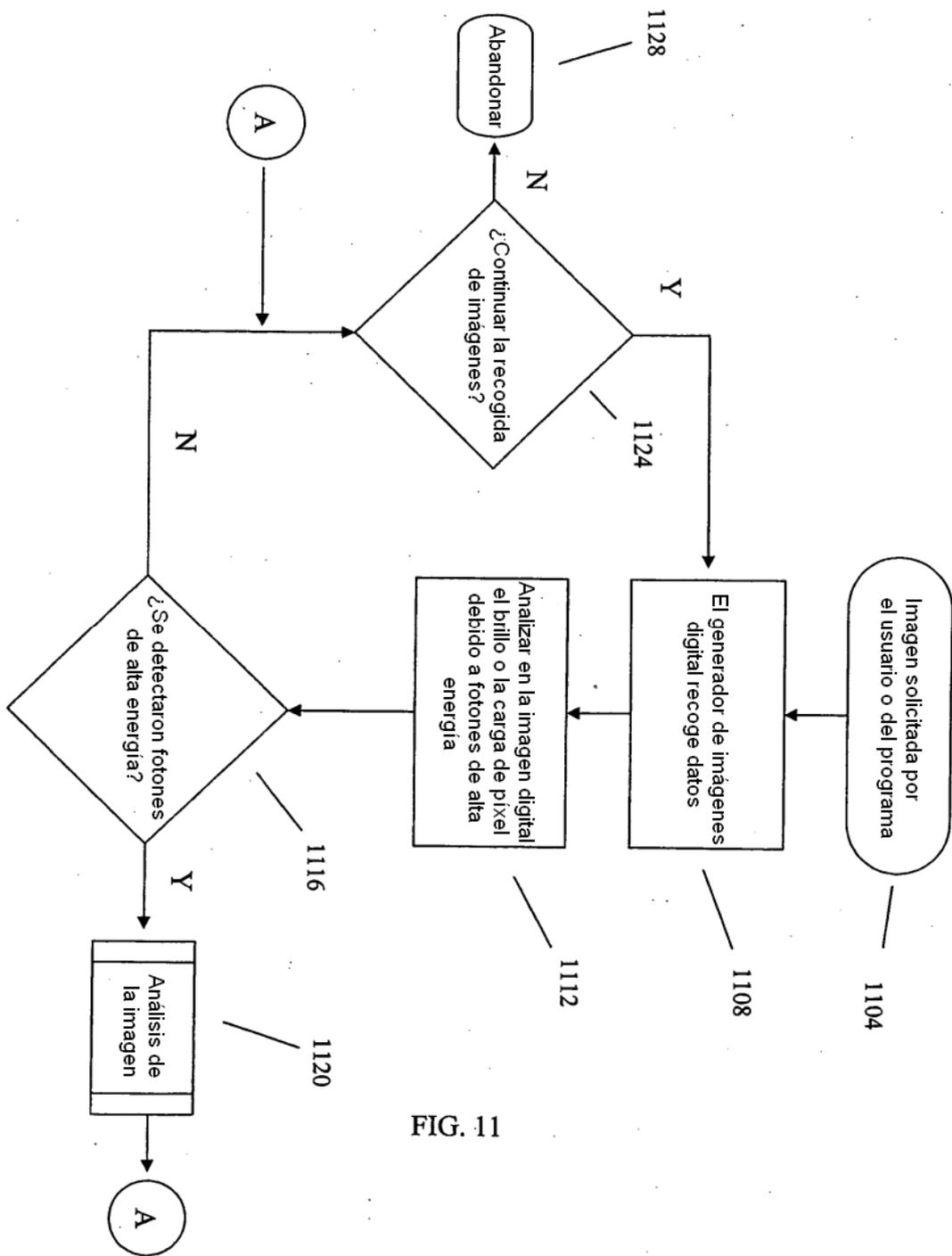


FIG. 11

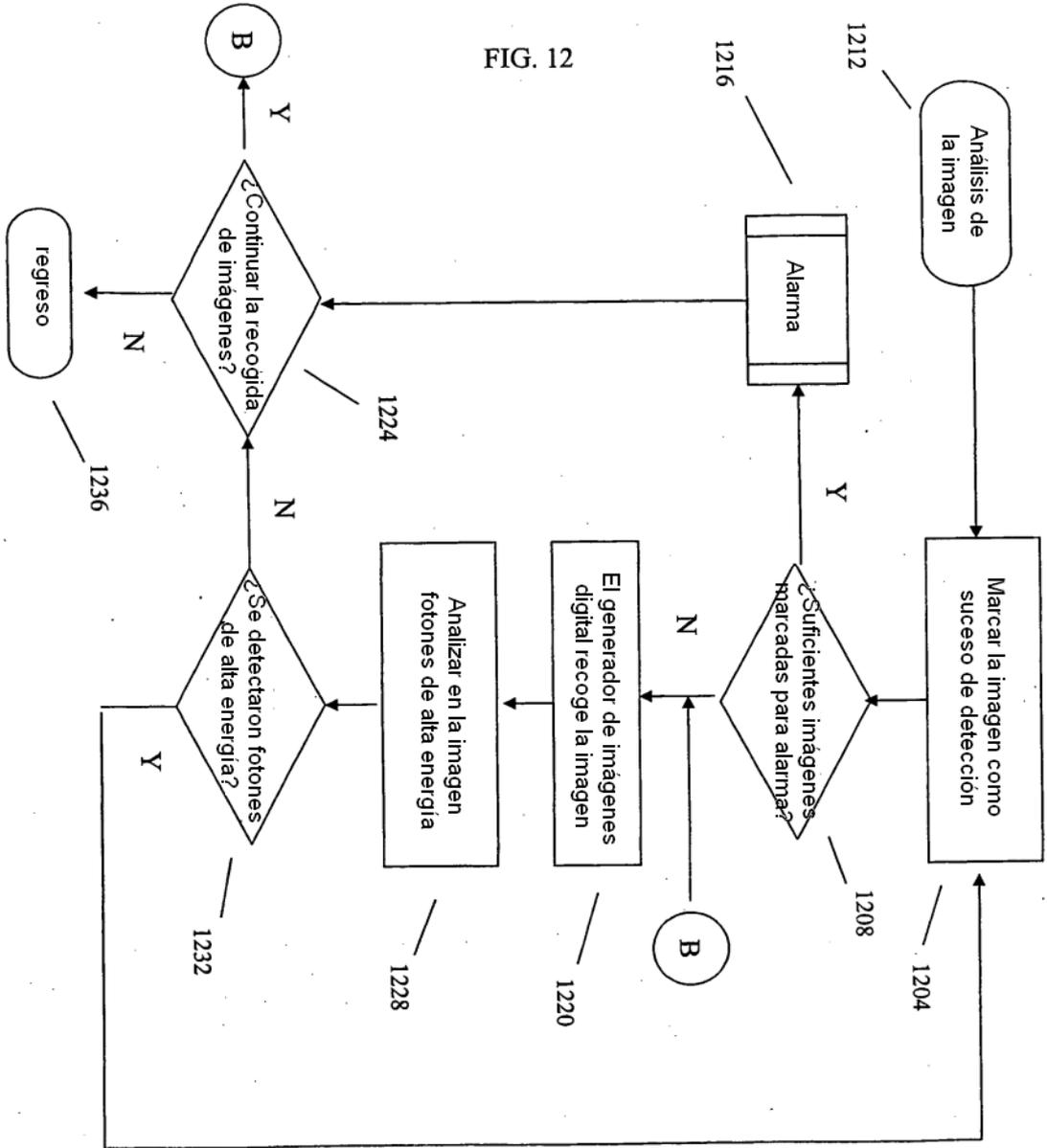


FIG. 13

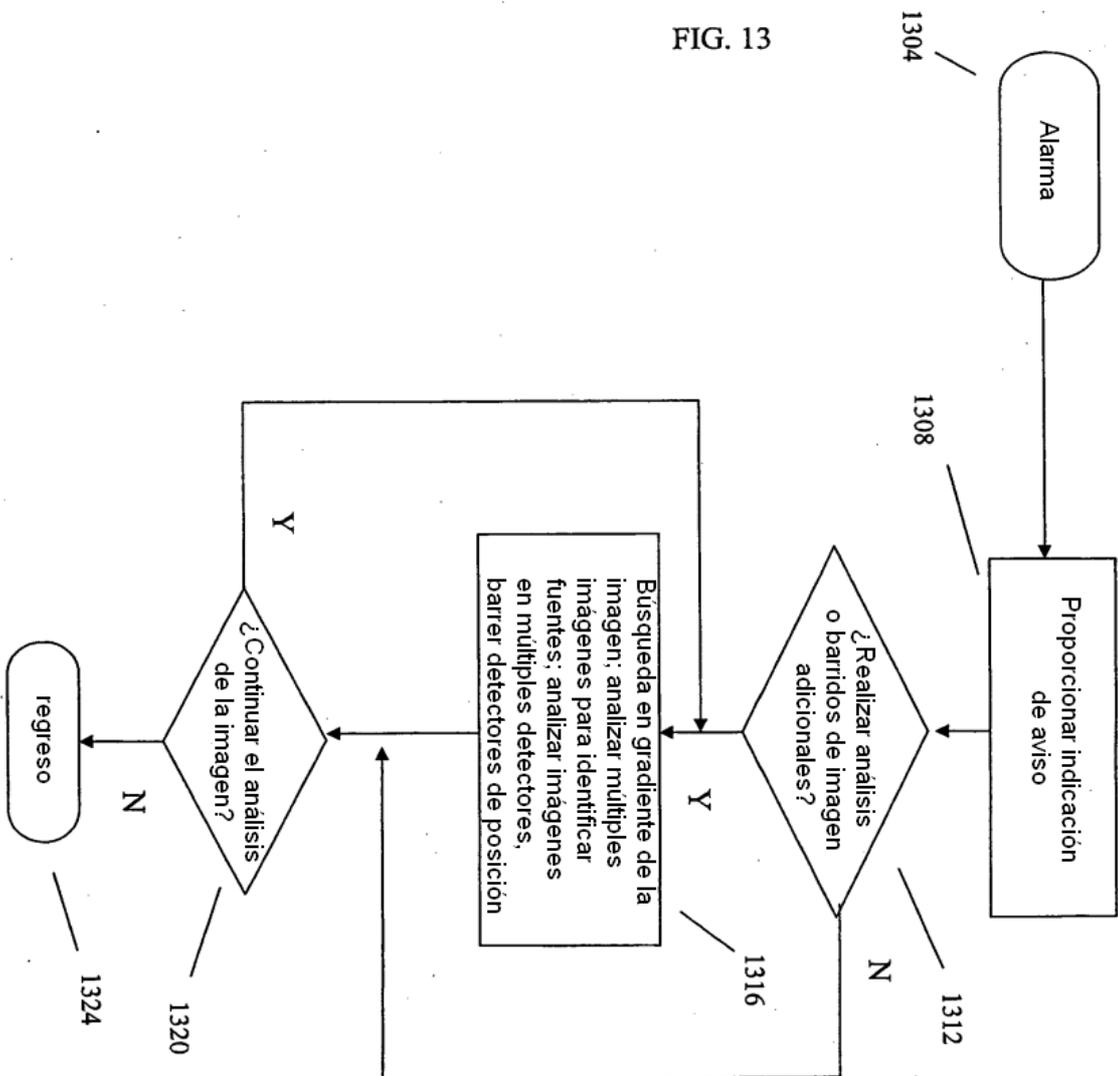
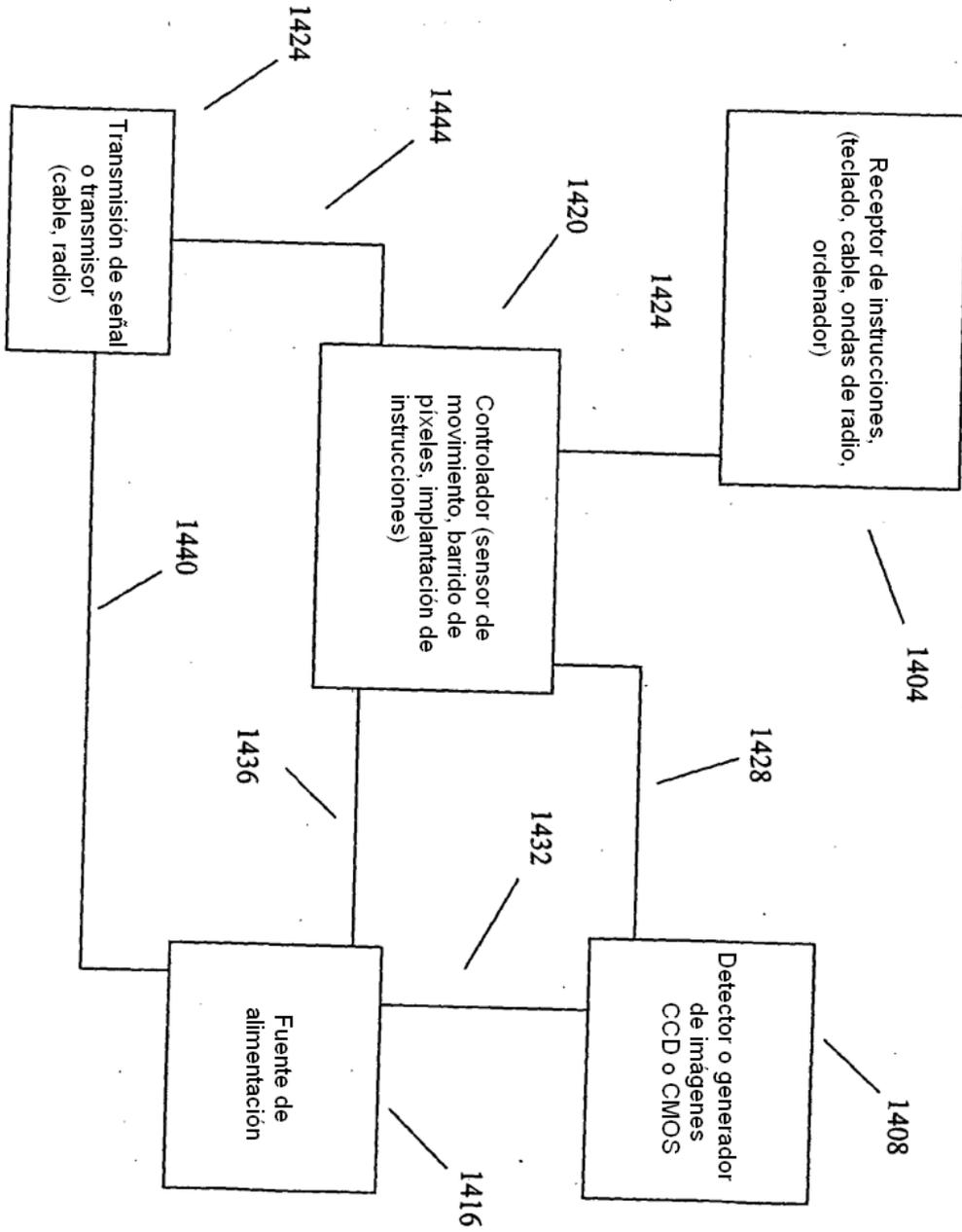


FIG. 14



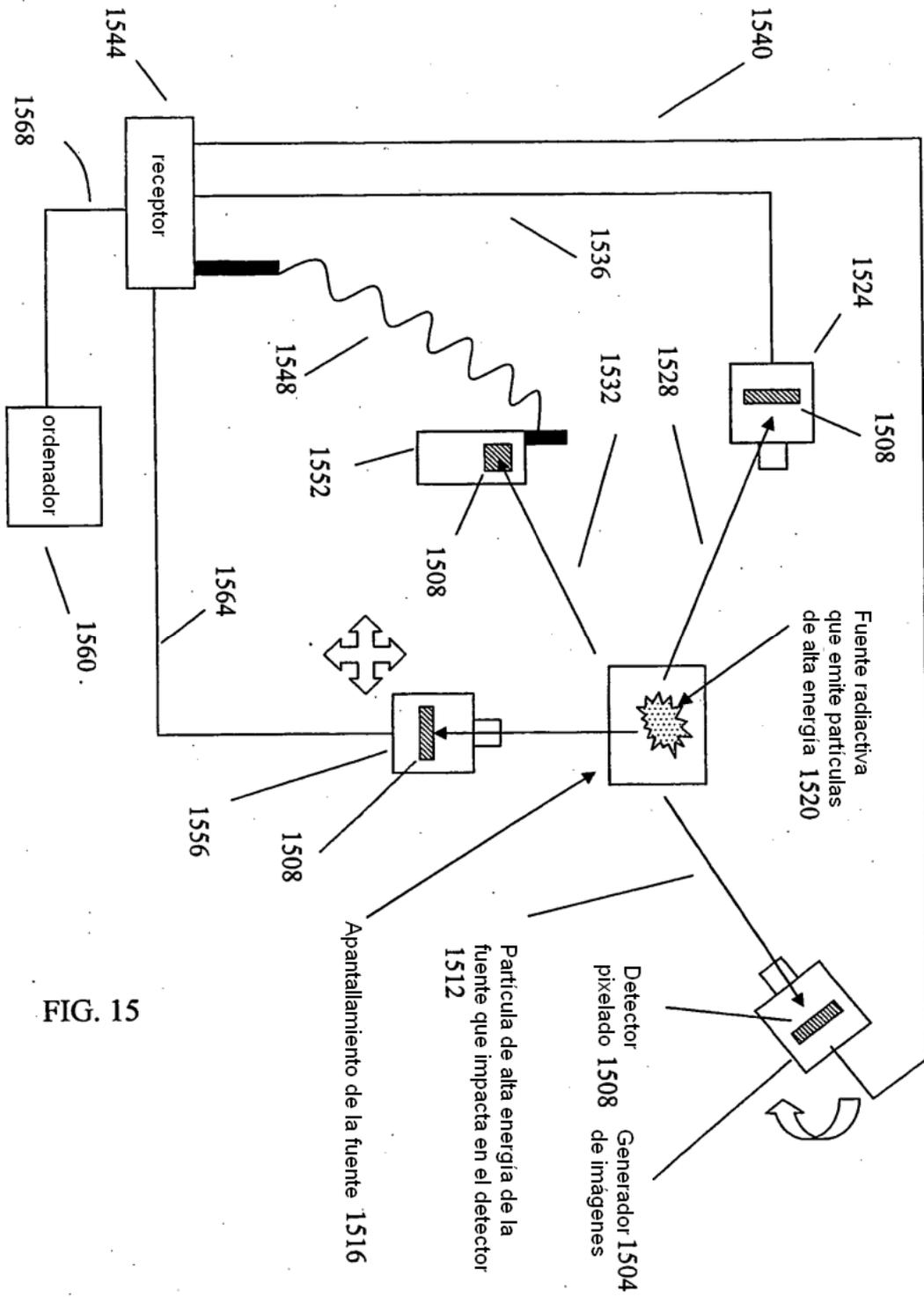


FIG. 15

FIG. 16 A

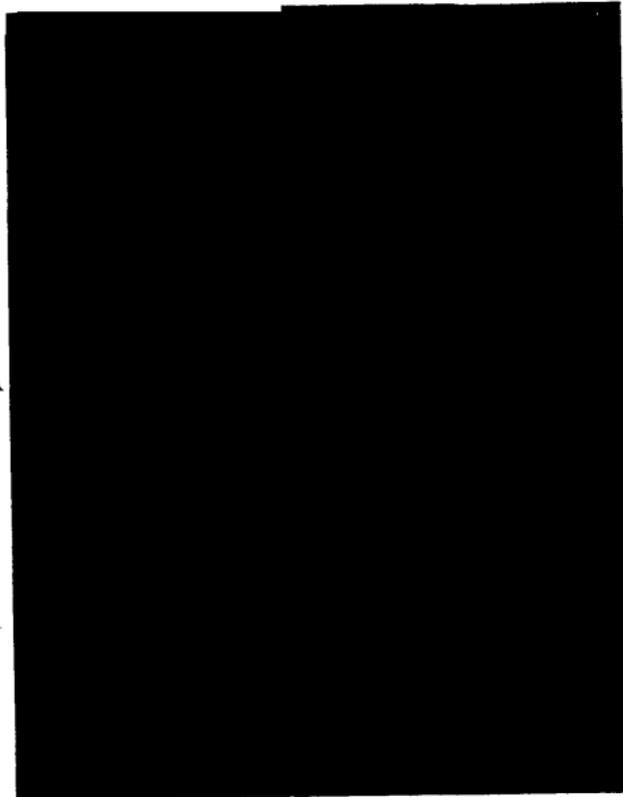


FIG. 16 B

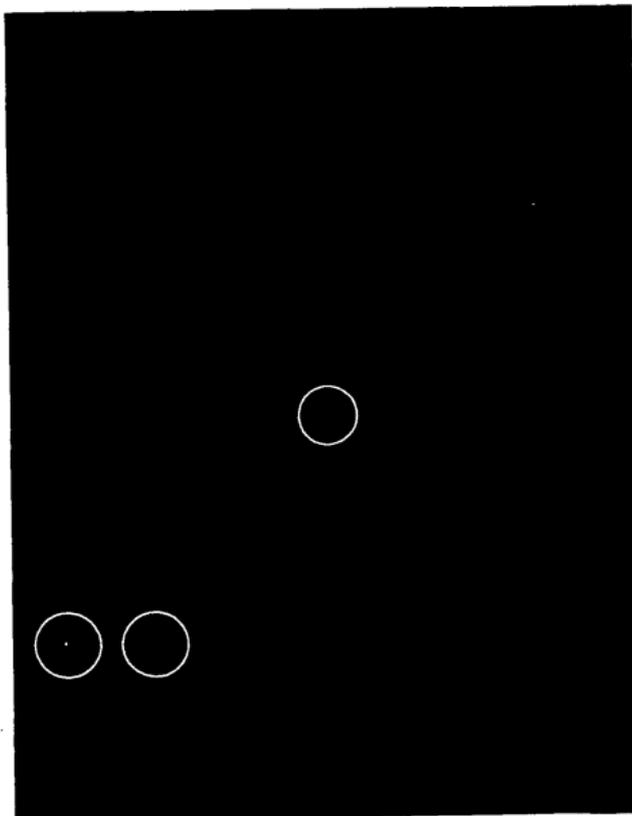


Fig. 16