

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 021 833**

51 Int. Cl.:

G06T 15/06 (2011.01)

G06T 15/50 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.11.2020** **E 20206086 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.03.2025** **EP 3819870**

54 Título: **Renderización de imágenes utilizando el muestreo de importancia múltiple modificado**

30 Prioridad:

08.11.2019 US 201916679075

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

27.05.2025

73 Titular/es:

**CHAOS SOFTWARE LTD. (100.00%)
Mladost 1A, bl. 548 et. 2, office 203
1729 Sofia, BG**

72 Inventor/es:

**KARLÍK, ONDREJ;
SIK, MARTIN;
VÉVODA, PETR;
SKRIVAN, TOMÁS y
KRIVÁNEK, JAROSLAV**

74 Agente/Representante:

IZQUIERDO BLANCO, María Alicia

ES 3 021 833 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).

DESCRIPCION

Renderización de imágenes utilizando el muestreo de importancia múltiple modificado

5 ANTECEDENTES

Esta especificación se relaciona con las técnicas de muestreo en la renderización de imágenes que reducen la varianza del resultado de la muestra.

10 Una tarea común en gráficos por computador es la renderización de una imagen de una escena. Esta tarea equivale a determinar un valor para cada píxel de la imagen, que a su vez depende de la resolución de una ecuación de renderización representativa de la escena. La ecuación de renderización es una ecuación integral que describe la cantidad de radiancia hacia cualquier dirección en cualquier punto espacial de la escena. Sin embargo, debido a su compleja forma, la ecuación de renderización no suele tener una solución cerrada. Como resultado, resolver la ecuación de renderización, es decir, renderizar la imagen de la escena, es típicamente computado numéricamente utilizando métodos Monte Carlo.

15 Los métodos convencionales de Monte Carlo utilizan muestreos aleatorios repetidos para aproximar una solución a la ecuación de renderización expresando la integral como un valor esperado de variables aleatorias. Cada técnica de muestreo selecciona las muestras de acuerdo con una distribución de probabilidad única.

20 En algunos casos, se puede utilizar un método llamado muestreo de importancia múltiple (MIS) para combinar diferentes técnicas de muestreo. Sin embargo, la combinación de técnicas de muestreo con MIS puede producir un estimador demasiado defensivo que lleve a una varianza innecesariamente alta, es decir, ruido, en la imagen renderizada. Elvira V. et al. describen en " Mejora de Monte Carlo poblacional: esquemas alternativos de ponderación y remuestreo" , Procesamiento de señal, Elsevier, vol.131, julio de 2016, métodos de muestreo de Monte Carlo poblacional (PMC) que son herramientas potentes para aproximar distribuciones de incógnitas estáticas dado un conjunto de observaciones. Pajot A. et al. describen en " Representación para el muestreo de importancia múltiple robusto y adaptativo", IEEE Transacciones sobre visualización y gráficos por computadora, vol. 17, n.º 8, agosto de 2011, un método general que aumenta la robustez de los estimadores basados en el muestreo de importancia múltiple (MIS) en un contexto de integración numérica. Kondapaneni I. et al. describen en " Muestreo de importancia múltiple óptimo", ACM Transacciones o Graficas, vol. 38, n.º 4, julio de 2019, que el muestreo de importancia múltiple (MIS) es una técnica clave para conseguir la robustez de los estimadores de Montecarlo en gráficos 25 computacionales y otros campos.

35 RESUMEN

Esta especificación describe modificaciones del MIS convencional. En general, el marco MIS representa una familia de estimadores, parametrizados por funciones de ponderación utilizadas para combinar muestras procedentes de diferentes técnicas de muestreo. Proporcionando un potencial para la reducción de la varianza del estimador. Cuando se comparan con las imágenes renderizadas utilizando MIS convencionales, las que se renderizan como se describe en esta especificación muestran una varianza reducida. Al igual que el MIS convencional, la invención emplea una combinación de varias técnicas de muestreo, pero a diferencia del MIS convencional, se permite que la función de densidad de probabilidad (pdf) de una de las técnicas de muestreo adopte cualquier forma. Posteriormente, se encuentra una expresión analítica para la pdf de la técnica libre que minimiza la varianza del estimador resultante.

45 La invención es definida mediante las reivindicaciones independientes.

En primer lugar, la invención proporciona un método implementado por computador, que comprende: recibir datos que describen una escena, en los que la escena comprende una o más fuentes de luz y uno o más objetos que tienen diferentes propiedades ópticas de superficie; recibir una solicitud para renderizar una imagen de la escena utilizando un método de muestreo de importancia múltiple de iluminación directa que combina el muestreo de un mapa de entorno de alto rango dinámico (HDR) y el muestreo de un producto coseno de una función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) de la superficie de un objeto, en la que cada técnica de muestreo utiliza una distribución de probabilidad diferente para muestrear una fracción respectiva de un número total de muestras, en la que el muestreo a partir del mapa de entorno HDR se implementa utilizando una función de densidad de probabilidad tabulada, y el muestreo del producto coseno de la BRDF es una fórmula analítica derivada de una función de densidad de probabilidad que depende de la dirección de salida y de la posición de la superficie de un rayo; modificar sólo la función de densidad de probabilidad del mapa de entorno HDR para reducir una varianza del método de muestreo de importancia múltiple mientras se mantienen fijas las fracciones respectivas y la otra distribución de probabilidad; renderizar la escena utilizando el muestreo de importancia múltiple utilizando la distribución de probabilidad particular modificada y la otra distribución de probabilidad; y emitir la escena renderizada en respuesta a la solicitud.

65 Para que un sistema de uno o más computadores sea configurado para realizar operaciones o acciones particulares significa que el sistema tiene instalado en él software, firmware, hardware, o una combinación de ellos que en operación causan que el sistema realice las operaciones o acciones. Para que uno o más programas de computador estén configurados para realizar operaciones o acciones particulares significa que el uno o más programas incluyen instrucciones que, cuando son ejecutadas por el aparato de procesamiento de datos, causan que el aparato realice las

operaciones o acciones.

Otras realizaciones de este aspecto pueden incluir una o más de las siguientes características opcionales. La probabilidad asignada a una muestra dada por la distribución de probabilidad particular modificada depende de una diferencia entre (i) un primer valor que es proporcional a una contribución de la muestra dada a un resultado de renderización y (ii) un segundo valor que es una suma ponderada de las probabilidades asignadas a la muestra dada por las otras distribuciones de probabilidad. Cada probabilidad de la suma ponderada se pondera mediante la respectiva fracción de conteo de la muestra para la otra distribución de probabilidad correspondiente. Cuando la diferencia es mayor que cero, la probabilidad asignada a la muestra dada es la diferencia dividida por la fracción de conteo de muestras para la distribución de probabilidad particular modificada y un factor de normalización. Cuando la diferencia no es mayor que cero, la probabilidad asignada a la muestra dada es cero.

La materia en cuestión descrita en esta especificación puede ser implementada en realizaciones particulares de modo que se realicen una o más de las siguientes ventajas. Las imágenes de escenas pueden ser renderizadas con un alto grado de realismo visual mientras se reduce el coste computacional de la renderización. Renderizar imágenes puede realizarse de manera más eficiente mediante la selección y combinación de manera específica de varias técnicas de muestreo. Como otra ventaja, la varianza del estimador de la versión mejorada del MIS descrita en esta especificación puede ser reducida en comparación con la varianza del estimador del MIS convencional. Las mejoras al MIS descritas en esta especificación son simples de implementar utilizando uno o más dispositivos de computación. El resultado sólo puede disminuir la varianza, no incrementarse. La implementación puede tener poca sobrecarga de computación y memoria. Por otra parte, la salida total puede proporcionar por lo menos una misma calidad de renderización de MIS convencional más rápidamente y con esfuerzo de computación reducido.

Los detalles de una o más realizaciones de la materia en cuestión de la presente especificación se detallan en los dibujos acompañantes y en la descripción que figura a continuación. Otras características, aspectos y ventajas de la materia en cuestión se desprenderán de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La FIG. 1 es un diagrama de bloques de un ejemplo de sistema de renderización de imágenes. La FIG. 2 ilustra un ejemplo operacional de trazado de rayos con una técnica de muestreo. La FIG. 3 es un diagrama de flujo de un proceso de ejemplo para la renderización de una imagen de una escena utilizando MIS modificado.

Los números de referencia similares y las designaciones en los diversos dibujos indican elementos similares.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

La FIG. 1 es un diagrama de bloques de un ejemplo de sistema 100 de renderización de imágenes. El sistema de renderizado de imágenes 100 es un sistema de ejemplo de uno o más computadores en una o más ubicaciones que es capaz de producir una imagen renderizada 104 de una escena dado un punto de vista y un plano de imagen, donde la escena es un entorno tridimensional que incluye una o más superficies reflectantes y de dispersión y está afectada por una o más fuentes de luz.

El sistema de renderización de imágenes 100 obtiene como entrada un modelo de entorno 101 y analiza el modelo de entorno 101 para generar la imagen renderizada 104 de la escena. El modelo de entorno 101 puede incluir datos que describen la posición, orientación, forma o propiedades ópticas de diversos objetos de la escena. El modelo de entorno 101 también puede incluir información alrededor de un punto de vista y un plano de imagen, tal como la posición del punto de vista, la posición del plano de imagen, la orientación del plano de imagen, el tamaño del plano de imagen, la resolución de la imagen renderizada, etc.

El sistema 100 de renderización de imágenes incluye un módulo 102 de pre-renderización y un módulo 103 de renderización. El módulo de pre-renderización 102 optimiza el proceso de renderización mediante el preprocesamiento del modelo de entorno 101. En algunas implementaciones, el módulo 102 de pre-renderizado puede preprocesar la escena para mejorar el proceso de muestreo desempeñado por el módulo 103 de renderizado. Por ejemplo, el módulo de pre-renderizado 102 puede dividir la escena en diferentes regiones basándose en una o más propiedades ópticas de las diferentes regiones, y recomendar al módulo de renderización 103 técnicas de muestreo optimizadas para cada región.

El módulo de renderización 103 renderiza una imagen que representa el modelo 101 del entorno. Durante el proceso de renderización, el módulo de renderización 103 puede soportar una variedad de técnicas de renderización para determinar un valor para cada uno de los píxeles de la imagen 104 renderizada. Ejemplos de técnicas de renderización incluyen el trazado de rayos centrado en la imagen y la rasterización. Por ejemplo, para implementar el trazado de rayos, el módulo de renderización 103 puede lanzar múltiples rayos desde el punto de vista (rayos de visión). Los rayos de visualización atraviesan píxeles en el plano de la imagen e intersecan puntos en la escena. Si los puntos pertenecen a una fuente de luz, ésta puede aportar directamente un valor al píxel correspondiente en la imagen renderizada. Si los puntos pertenecen a un objeto que no emite luz, entonces los rayos de visión pueden reflejarse o dispersarse en una o más direcciones para

alcanzar una fuente de luz y contribuir con un valor de píxel. El número y la dirección de los rayos reflejados/dispersados dependen de las propiedades ópticas específicas y de la geometría de los puntos. Por ejemplo, si los puntos están ubicados en una superficie de dispersión, se pueden analizar múltiples direcciones de salida ya que la superficie difunde uniformemente un rayo incidente. Cada uno de los rayos reflejados o dispersos puede alcanzar una fuente de luz que contribuye a un valor de píxel correspondiente al rayo original. En otro ejemplo, los rayos reflejados/dispersados pueden alcanzar otro objeto no emisor de luz que cause una reflexión/dispersión adicional.

Cuando las escenas incluyen condiciones de iluminación complejas y/o modelos de superficies de materiales, trazar rayos desde todos los puntos de la escena puede tener un alto coste computacional. Para reducir el coste computacional asociado con la renderización, el módulo de renderización 103 muestrea los rayos, por ejemplo, desde los puntos de la escena hasta las fuentes de luz que afectan a la escena. Es decir, el módulo de renderización 103 selecciona un conjunto de puntos de superficie y/o un conjunto de direcciones en la escena para estimar los valores de píxel de la imagen renderizada.

Para muestrear los rayos, el módulo de renderización 103 emplea uno o más técnicas de muestreo. Dos técnicas de muestreo comunes utilizadas para evaluar la iluminación en un punto de una superficie incluyen el muestreo de la fuente de luz y el muestreo de una función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF). El muestreo de la fuente de luz puede referirse a varios tipos de fuentes de luz incluyendo, por ejemplo, una fuente puntual, una fuente esférica, una fuente rectangular, etc. o, como se describe con más detalle a continuación, el muestreo de un mapa de alto rango dinámico (HDR) aplicado a un modelo de una escena .

La BRDF describe cómo se refleja/dispersa la luz en una superficie en función de la dirección de un rayo que incide sobre la superficie. Cuando un rayo de visión incide sobre una superficie brillante, una porción significativa del rayo de visión se refleja en una única dirección, de acuerdo con la ley de la reflexión, que indica que el ángulo de un rayo incidente es equivalente al ángulo de un rayo reflejado. Como resultado, a efectos de un muestreo eficaz, la técnica de muestreo BRDF puede seleccionar aleatoriamente las direcciones del rayo reflejado o saliente en los puntos de la superficie de acuerdo con una distribución de probabilidad similar a la de la función de distribución bidireccional de la reflectancia. Es decir, la técnica de muestreo selecciona aleatoriamente las direcciones del rayo saliente en el punto de incidencia de un rayo entrante, teniendo cada dirección particular una probabilidad de ser igual a la relación entre la luz reflejada en la dirección particular y la cantidad de luz que incide en la superficie desde la dirección del rayo entrante. Cuando, por el contrario, un rayo incide sobre una superficie rugosa de dispersión, los rayos salientes pueden dispersarse uniformemente en todas las direcciones. Como resultado, es más eficiente muestrear puntos de superficie en una fuente de luz que muestrear direcciones de rayos salientes en puntos incidentes en una escena. Por ejemplo, los puntos de la superficie de la fuente de luz pueden muestrearse de acuerdo con una distribución uniforme.

Si una escena incluye superficies con diferentes propiedades ópticas, por ejemplo, tanto superficies reflectantes brillantes como superficies rugosas de dispersión, una única técnica de muestreo puede ser insuficiente para muestrear la escena. Como resultado, pueden utilizarse múltiples técnicas de muestreo, cada una de ellas adecuada para la renderización de una región diferente de una escena. Mediante combinar las técnicas de muestreo utilizando MIS, se puede conseguir un bajo nivel de ruido en toda la imagen renderizada.

Cuando el módulo de renderización 103 emplea múltiples técnicas de muestreo, el muestreo de importancia múltiple proporciona un medio simple pero robusto para combinar las técnicas de muestreo con límites de varianza demostrables.

Consideremos una integral $\langle F \rangle = \int x f(x) d\mu(x)$ de una función no negativa $f(x)$. Se puede construir un estimador de Monte Carlo insesgado (F) para la integral tomando n variables aleatorias (muestras) X_i , $i = 1, \dots, n$ generadas mediante una técnica de muestreo

$$\langle F \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f(X_i)}{p(X_i)}$$

con la pdf $p(x)$, y ser configurado el estimador. La varianza del estimador depende del número de muestras y de lo "similar" que sea la pdf $p(x)$ al integrando $f(x)$. Siempre que p sea exactamente proporcional a f hasta una constante de normalización, es decir, $p(x) = f(x)/F$, la varianza es cero.

Encontrar una pdf que se aproxime a f en todas las circunstancias puede ser difícil, pero puede haber múltiples técnicas de muestreo, $t \in T$, con pdfs $p_t(x)$, cada una de las cuales se aproxima a alguna característica importante de f , por ejemplo, muestreo de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) o muestreo de mapas de alto rango dinámico (HDR).

El muestreo de importancia múltiple (MIS) proporciona un marco general para construir un estimador combinado dadas múltiples técnicas de muestreo. Supongamos que hay $n_t = c_t^* n$ muestras independientes de cada técnica, donde c_t denota las fracciones respectivas del conteo total de muestras y cada i th muestra independiente se denota $X_{t,i}$. El estimador combinado de múltiples muestras entonces se lee:

$$\langle F \rangle_{MS} = \sum_{t \in T} \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} w_t(X_{t,i}) \frac{f(X_{t,i})}{p_t(X_{t,i})} \quad (\text{ecuación 1})$$

donde el primer sumatorio es sobre las múltiples técnicas de muestreo y el segundo sumatorio es sobre las muestras independientes, y donde las funciones de ponderación $w_t(x)$ proporcionan un grado de libertad que puede ser utilizado para optimizar la varianza del estimador.

5 Así, el sistema de renderización de imágenes puede optimizar la combinación de las diferentes técnicas de muestreo mediante el ajuste de las funciones de ponderación, por ejemplo, mediante el ajuste de la contribución de las diferentes técnicas de muestreo para diferentes regiones de la imagen renderizada, tal como diferentes porciones de las superficies de los objetos. De esta forma, las funciones de ponderación proporcionan un grado de libertad que puede utilizarse para optimizar la varianza del estimador MIS. En algunas implementaciones, la heurística de equilibrio se utiliza para $w_t(x)$, que se describe con más detalle a continuación.

La ecuación para la heurística de equilibrio es:

$$w_t(x) = \frac{c_t p_t(x)}{\sum_{t' \in T} c_{t'} p_{t'}(x)} \quad (\text{ecuación 2})$$

15 Donde c_t es la fracción respectiva del conteo total de muestras para la técnica de muestreo t en el conjunto de técnicas de muestreo, T , y $p_t(x)$ es la pdf de la técnica de muestreo t . El símbolo primo en el denominador indica que la suma en el denominador va sobre todas las técnicas de muestreo (incluyendo t) mientras que el numerador utiliza sólo la técnica de muestreo individual t correspondiente al peso.

20 Combinar la heurística de equilibrio con el estimador MIS general de la ecuación 1 produce un estimador combinado de la forma:

$$\langle F \rangle_{\text{MIS}} = \frac{1}{n} \sum_{t \in T} \sum_{i=1}^{n_t} \frac{f(X_{t,i})}{p_{\text{eff}}(X_{t,i})} \quad (\text{ecuación 3})$$

25 Donde $P_{\text{eff}}(x)$ es equivalente a $\sum_{t' \in T} c_{t'} p_{t'}(x)$ del denominador de la heurística de equilibrio en la ecuación 2 anterior. Este estimador combinado muestra que la utilización de la heurística de equilibrio corresponde efectivamente a un estimador Monte Carlo regular con muestras introducidas desde un $P_{\text{eff}}(x)$, es decir, una media ponderada de las fdp de las técnicas de muestreo.

30 Mientras que la heurística de equilibrio generalmente da como resultado un estimador del SMI de baja varianza en un sentido global, cuando se aplica a un conjunto fijo particular de técnicas de muestreo puede no resultar un buen estimador. Desde el equilibrio heurístico promedia efectivamente pdfs de las técnicas de muestreo combinadas, puede causar áreas de alto valor a ser su muestreadas y áreas de bajo valor a ser sobre muestreadas.

35 Sin embargo, la varianza del estimador puede ser reducida mediante la optimización de una de las técnicas de muestreo para "afilarse" efectivamente su pdf para compensar el efecto del promedio de pdf inducido por la heurística de equilibrio.

40 Para una combinación MIS de un conjunto dado T de técnicas de muestreo $t \in T$ con fracciones de muestra $c_t > 0$, una de las técnicas de muestreo puede designarse como "libre". El objetivo del MIS modificado es encontrar una técnica de muestreo τ : $p_\tau(x)$, que minimice la varianza del estimador combinado con la heurística de equilibrio mostrada anteriormente en la ecuación 3. Es decir, para reducir la varianza del estimador, el sistema optimiza una de las técnicas de muestreo.

45 En un caso ideal, el estimador MIS de la ecuación 3 tendría una varianza cero. Para que esto ocurra, la densidad de la mezcla $P_{\text{eff}}(x)$ tiene que ser exactamente proporcional al integrado $f(x)$, es decir,

$$p_{\text{eff}}(x) = \frac{f(x)}{F}$$

50 Asumiendo la heurística del equilibrio, se sostiene que $P_{\text{eff}}(x) = q(x) + c_\tau p_\tau(x)$, donde hay pdf separadas de todas las técnicas de muestreo fijas bajo un único término $q(x) = \sum_{t \in T \setminus \{\tau\}} c_t p_t(x)$.

Esto puede ser resuelto algebraicamente para el pdf como:

$$p_\tau(x) = \frac{f(x)}{c_\tau F} - \frac{q(x)}{c_\tau} \quad (\text{ecuación 4})$$

60 Sin embargo, para hacer válida la pdf resultante, los valores negativos pueden ser capturados y la ecuación renormalizada para obtener la pdf optimizada para el MIS modificado como:

$$\tilde{p}_\tau(x) = \frac{1}{b} \max\{0, p_\tau(x)\} \quad (\text{ecuación 5})$$

65 La pdf de la ecuación 5 proporciona una fórmula generalizada para una pdf modificada que puede ser aplicada a cualquier estimador MIS incluso fuera del contexto de la renderización de imágenes de la invención. Las FIGS. 2 y 3, a continuación,

describen una aplicación de este resultado general al contexto específico de la invención de iluminación basada en imágenes en sistemas de renderización de imágenes.

La FIG. 2 ilustra un ejemplo de iluminación basada en imágenes de acuerdo con la invención. La iluminación basada en imágenes está relacionada con el cálculo de la iluminación debida a un mapa de entorno de alto rango dinámico (HDR) sobre una superficie con una BRDF arbitraria. El mapa de entorno HDR puede corresponder, por ejemplo, a una captura omnidireccional de la iluminación del mundo real que se proyecta sobre una hemisfera en relación con la superficie que se ilumina. Un sistema de renderización de imágenes, por ejemplo, el sistema de renderización de imágenes 100 de la FIG. 1, es utilizado para computar la iluminación de una escena basada en el mapa de entorno HDR utilizando MIS. Específicamente, la FIG. 2 muestra una superficie 200 que tiene una BRDF 202 arbitraria. El mapa HDR 204 puede ser utilizado para determinar la iluminación sobre un punto x 206 en la superficie desde un ángulo particular. La superficie tiene una normal n , 208.

La radiancia reflejada del punto x de la superficie 200 debida a la iluminación directa desde el mapa HDR se calcula como:

$$L_{dir}(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\mathcal{H}(\mathbf{n})} L_l(\omega_i) \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) |\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+ d\omega_i \quad (\text{ecuación 6})$$

En la ecuación 6, \mathbf{x} es la posición en la superficie, \mathbf{n} es la normal de superficie en \mathbf{x} . ω_o es la dirección de la vista saliente mostrada por el rayo 210 en la FIG. 2. $\mathcal{H}(\mathbf{n})$ es la hemisfera centrada en la normal de superficie \mathbf{n} . La emisión del mapa HDR procedente de la dirección ω_i viene dada por $L_l(\omega_i)$, que se ilustra mediante el rayo 212 en la FIG. 2. La variable ρ denota la BRDF de la superficie y $|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+$ la parte positiva del coseno del ángulo entre ω_i y \mathbf{n} .

Una estimación Monte Carlo de la iluminación directa desde el mapa HDR, $L_{dir}(\mathbf{x}, \omega_o)$, típicamente se apoya en dos técnicas de muestreo que utilizan muestreo aleatorio para encontrar soluciones aproximadas a la radiancia. La primera técnica de muestreo implica el muestreo del mapa HDR mientras que la segunda técnica de muestreo implica el muestreo del producto de la BRDF y el coseno $|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+$. El MIS se utiliza entonces para combinar las técnicas de muestreo.

El muestreo desde el mapa HDR, por ejemplo, el mapa 204, de acuerdo con la invención, se implementa mediante una función de densidad de probabilidad (pdf) tabulada $p_l(\omega_i)$. En contraste, el muestreo del producto coseno de la BRDF es una fórmula analítica derivada de una pdf $p_\rho(\omega_i) |\omega_o, \mathbf{x}|$, que generalmente depende de la dirección saliente y de la posición de la superficie.

Un sistema de renderización de imágenes entonces renderiza la superficie 200 mediante MIS combinando los resultados producidos por las dos técnicas de muestreo para generar la radiancia reflejada de los puntos de la superficie 200. Por otra parte, como se describirá con más detalle a continuación con respecto a la FIG. 3, la optimización de una de estas técnicas de muestreo se utiliza para reducir la varianza del estimador desde el resultado del estimador de MIS convencional.

La FIG. 3 es un diagrama de flujo de un proceso 300 de acuerdo con la invención para la renderización de una imagen de una escena que tiene iluminación basada en imágenes utilizando un muestreo de importancia múltiple modificado. Por conveniencia, el proceso 300 será descrito como siendo realizado por un sistema de uno o más computadores, ubicado en esa ubicación, y programado consecuentemente de acuerdo con esta especificación. Por ejemplo, un sistema de renderización de imágenes, por ejemplo, el sistema de renderización de imágenes 100 de la FIG. 1, apropiadamente programado, puede desempeñar el proceso 300.

El sistema recibe datos que describen una escena (310). La escena puede incluir uno o más objetos, que pueden tener diferentes propiedades ópticas de superficie, así como datos que describen la iluminación basada en imágenes, por ejemplo, un mapa HDR de iluminación basada en imágenes. Los datos del objeto pueden describir, por ejemplo, la posición, orientación, forma o propiedades ópticas de uno o más objetos. Los datos que describen la escena pueden ser un conjunto completo de datos, es decir, que incluyen toda la información necesaria para que el sistema renderice una imagen visualmente realista de la escena. Como ejemplo, la escena puede ser la escena representada mediante la superficie 200 de la FIG. 2.

También los datos pueden describir la cantidad de luz, es decir, radiancia, emitida desde diversos puntos de la escena a lo largo de una dirección de visión particular. La radiancia saliente, es decir, la radiancia que deja un punto en cualquier dirección en la escena es una suma de la radiancia emitida (radiancia emitida desde el punto, por ejemplo, si el punto está recaer en la superficie de una fuente de luz) y la radiancia reflejada (radiancia reflejada desde el punto). Esta relación puede ser capturada mediante la ecuación de renderización como:

$$L_{out}(\mathbf{x}, \omega_o) = L_{emit}(\mathbf{x}, \omega_o) + L_{reflected}(\mathbf{x}, \omega_o) \quad (\text{ecuación 7})$$

Esta ecuación de renderización da la cantidad de radiación que sale de un punto de la escena (descrito por el vector \mathbf{x}) en una dirección específica (descrita por el ángulo ω_o). Los datos que describen la escena especifican todos los parámetros incluidos en la ecuación de renderización. En particular, es importante señalar que $L_{reflejado}$ en la ecuación 7 corresponde a $L_{dir} + L_{indir}$, donde L_{dir} viene dado por la ecuación 6 y corresponde al valor mejorado por el MIS modificado.

L_{indir} se resuelve típicamente de forma recursiva mediante el trazado de un rayo reflejado y computando la ecuación 7 en un punto donde el rayo reflejado golpea la escena que se está renderizando.

El sistema recibe una solicitud para renderizar una imagen de la escena utilizando un muestreo de importancia múltiple (320). n muestras totales pueden ser muestreadas en la escena utilizando un número especificado de técnicas de muestreo con diferentes distribuciones de probabilidad, cada una utilizada para muestrear una fracción respectiva de las n muestras totales.

Por ejemplo, la imagen puede ser una imagen tomada desde la perspectiva de un punto de vista especificado en un plano de imagen especificado. El sistema puede renderizar la imagen mediante el trazado de rayos imagen-céntrico, es decir, trazando la trayectoria de la luz a través de píxeles en el plano de la imagen y simulando los efectos de sus encuentros con objetos en la escena. La renderización de una imagen equivale a resolver la ecuación de renderización asociada y obtener una función que describa cómo interactúa un rayo con uno o más objetos de la escena. Sin embargo, el término Lreflejado (x, ω_0) implica una integral compleja, lo que resulta en que la ecuación de renderización a menudo no tiene una solución de forma cerrada. Para aproximarse a una solución, la ecuación de renderización puede evaluarse numéricamente utilizando la estimación de Monte Carlo, que se apoya en múltiples técnicas de muestreo. Estas técnicas de muestreo se combinan entonces utilizando el MIS. Como se ha señalado anteriormente, el MIS convencional se apoya en diferentes funciones de ponderación para cada técnica de muestreo con el fin de afinar la contribución de cada técnica de muestreo. La varianza del estimador MIS, por lo tanto, también depende de las funciones de ponderación utilizadas.

Refiriéndose de vuelta a la FIG. 2, la primera técnica de muestreo implica el muestreo del mapa HDR que describe la iluminación omnidireccional basada en imágenes de la escena, mientras que la segunda técnica de muestreo implica el muestreo del producto de la BRDF en puntos de la superficie y $|\omega \cdot \mathbf{n}|_+$.

Matemáticamente, cada una de las técnicas de muestreo está asociada a una función de distribución de probabilidad. La distribución de probabilidad indica la probabilidad de que un punto de datos sea muestreado. Por ejemplo, una distribución de probabilidad uniforme indica que todos los puntos de datos tienen la misma probabilidad de ser muestreados.

El sistema modifica una distribución de probabilidad asociada a una de las técnicas de muestreo (330). En contraste con el MSI convencional, el MSI modificado descrito en esta especificación optimiza una función de distribución de probabilidad desde una de las técnicas de muestreo para reducir la varianza del estimador. En la invención anterior para iluminación basada en imágenes, el muestreo desde el mapa HDR se implementa utilizando una pdf tabulada, que es típicamente más simple de modificar que la pdf utilizada para muestrear el producto BRDF-coseno.

En particular, en algunas implementaciones, el sistema optimiza la densidad de probabilidad tabulada en un preproceso, la modificación puede ser utilizada en cualquier renderizador que se apoye en MIS para el muestreo HDR sin necesidad de modificar las propias rutinas de muestreo. Es decir, la optimización puede hacerse antes de que comience el muestreo y no se apoya en ninguna actualización adaptativa del sistema. Desde que el sistema simplemente modifica un pdf tabulado, no tiene sobrecarga e impacto marginal en el tiempo por muestreo.

Para obtener la FDP modificada \tilde{p}_i para el escenario de iluminación basado en imágenes descrito en la FIG. 2, el integrando de la ecuación 6 y la técnica de muestreo BRDF $p_p(\omega_i|\omega_0, \mathbf{x})$ se conecta a la solución de la FDP generalizada de la ecuación 5 desde arriba para obtener:

$$\tilde{p}_i(\omega_i|\omega_0, \mathbf{x}) = \frac{1}{b} \max\left\{0, \frac{f_i(\mathbf{x}, \omega_0, \omega_i)}{c_i L_{dir}(\mathbf{x}, \omega_0)} - \frac{1-c_i}{c_i} p_p(\omega_i|\omega_0, \mathbf{x})\right\} \quad \text{(ecuación 8)}$$

donde c_i es la fracción de muestras tomadas del mapa HDR y $f_i(\mathbf{x}, \omega_0, \omega_i) = L_i(\omega_i)\rho(\mathbf{x}, \omega_0, \omega_i)|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+$. El factor de normalización b asegura que $\tilde{p}_i(\omega_i|\omega_0, \mathbf{x})$ integra a uno.

La pdf tabulada modificada de la ecuación 8 es difícil de aplicar en la práctica, porque la pdf $\tilde{p}_i(\omega_i|\omega_0, \mathbf{x})$ depende tanto de ω_0 como de \mathbf{x} , y la ecuación requiere que el sistema tabule la pdf para cada dirección de vista y posición de la superficie. Sin embargo, puede derivarse una pdf dependiente de la normalidad (nd), que proporciona una aproximación práctica de la pdf de la ecuación 8, mediante la asunción de BRDF lambertianas con albedo unitario, la fracción de luz incidente que es reflejada por una superficie,

$$\rho \equiv \frac{1}{\pi}$$

como se muestra a continuación:

$$p_i^{nd}(\omega_i|\mathbf{n}) = \frac{1}{b_{nd}} \max\left\{0, \frac{f_{nd}(\omega_i, \mathbf{n})}{c_i \int_{\Omega} f_{nd}(\omega, \mathbf{n}) d\omega} - \frac{1-c_i}{c_i} \frac{|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+}{\pi}\right\} \quad \text{(ecuación 9)}$$

Donde

$$f_{nd}(\omega_i, \mathbf{n}) = L_i(\omega_i) \frac{|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+}{\pi}$$

El pdf resultante depende ahora sólo de la normal de superficie n , y podría calcularse previamente para un número de direcciones. Para obtener un resultado más conveniente que pueda aplicarse fácilmente en los renderizadores existentes, se extrae la dependencia de n para generar una pdf independiente de la normal (n_i) promediando $P_i^{nd}(\omega_i|n)$ sobre todas las direcciones normales posibles. Esta produce la distribución de probabilidad modificada práctica:

$$p_i^{ni}(\omega_i) = \frac{1}{b_{ni}} \max\{0, L_i(\omega_i) - 2(1 - c_i)\bar{L}_i\} \quad (\text{ecuación 10})$$

donde \bar{L}_i es la luminancia media del mapa HDR y b_{ni} asegura que se integra a uno.

El sistema renderiza la escena utilizando la distribución de probabilidad modificada (340). Por ejemplo, el sistema puede reemplazar la técnica de muestreo libre por una técnica de muestreo modificada que tiene la distribución de probabilidad modificada descrita anteriormente. El sistema puede combinar las técnicas de muestreo, incluida la técnica de muestreo modificada, utilizando una función de ponderación apropiada, por ejemplo, utilizando la heurística de equilibrio. El muestreo de importancia múltiple mejorado que utiliza la técnica de muestreo modificada tiene una varianza del estimador MIS reducida en comparación con un estimador MIS convencional.

El sistema obtiene la imagen renderizada (350). Una vez que el sistema obtiene un valor para cada píxel en la imagen renderizada, la imagen puede ser convertida a un formato conveniente y ser visualizada. Ejemplos de formatos de datos de imagen incluyen JPEG, PNG, TIFF, SVG, CGM, FITS, etc.

Mientras que la presente divulgación discute, de acuerdo con la invención, la aplicación de un MIS mejorado al campo de los gráficos por ordenador, en general, el MIS mejorado puede aplicarse a una amplia gama de problemas que dependen de MIS, que no forman parte de la invención.

Por ejemplo, el MIS modificado que se describe en esta especificación puede utilizarse en aplicaciones de guiado de trayectorias de transporte, muestreo de vuelo libre en medios heterogéneos o muestreo de luz para iluminación directa o indirecta. Todos estos acercamientos presentan pdfs construidos empíricamente combinados con una técnica defensiva que se prestan al MIS modificado descrito en esta especificación.

Las realizaciones de la materia y las operaciones funcionales descritas en la presente especificación pueden ser implementadas en circuitos electrónicos digitales, en software o firmware tangible, en hardware, incluyendo las estructuras descritas en la presente especificación y sus equivalentes estructurales, o en combinaciones de uno o más de ellos. Las realizaciones de la materia descrita en la presente especificación pueden ser implementadas como uno o más programas de ordenador, es decir, uno o más módulos de instrucciones de programa de ordenador codificados en un soporte de programa tangible no transitorio para su ejecución por, o para controlar el funcionamiento de, aparatos de procesamiento de datos. Alternativa o adicionalmente, las instrucciones de programa pueden estar codificadas en una señal propagada generada artificialmente, por ejemplo, una señal eléctrica, óptica o electromagnética generada por máquina, que se genera para codificar información para su transmisión a un aparato receptor adecuado para su ejecución por un aparato de procesamiento de datos. El medio de almacenamiento por computador puede ser un dispositivo de almacenamiento legible por máquina, un sustrato de almacenamiento legible por máquina, un dispositivo de memoria de acceso aleatorio o en serie, o una combinación de uno o más de ellos. El medio de almacenamiento por computadora no es, sin embargo, una señal propagada.

El término "aparato de procesamiento de datos" abarca todo tipo de aparatos, dispositivos y máquinas para procesar datos, incluyendo mediante un ejemplo un procesador programable, un ordenador o múltiples procesadores u ordenadores. Un aparato puede incluir circuitos lógicos de propósito especial, por ejemplo, un FPGA (formación de puertas programables en campo) o un ASIC (circuito integrado de aplicación específica). El aparato también puede incluir, además del hardware, código que cree un entorno de ejecución para el programa de ordenador en cuestión, por ejemplo, código que constituya el firmware del procesador, una pila de protocolos, un sistema de gestión de bases de datos, un sistema operativo o una combinación de uno o más de ellos.

Un programa de computador (que también puede ser referido o descrito como un programa, software, una aplicación de software, un módulo, un módulo de software, un script, o código) puede ser escrito en cualquier forma de lenguaje de programación, incluyendo lenguajes compilados o interpretados, o lenguajes declarativos o procedimentales, y puede ser desplegado en cualquier forma, incluyendo como un programa independiente o como un módulo, componente, subrutina, u otra unidad adecuada para su uso en un entorno de computación. Un programa de computador puede, pero no es necesario, corresponder a un fichero en un sistema de ficheros. Un programa puede ser almacenado en una porción de un archivo que sostenga otros programas o datos, por ejemplo, una o más escrituras almacenadas en un documento de lenguaje de marcas, en un único archivo dedicado al programa en cuestión, o en múltiples archivos coordinados, por ejemplo, archivos que almacenen uno o más módulos, subprogramas o porciones de código. Un programa de computador puede ser desplegado para ser ejecutado en un computador o en múltiples computadores que estén ubicados en un sitio o distribuidos a través de múltiples sitios e interconectados por una red de comunicación.

Tal como se utiliza en esta especificación, un "motor" o "motor de software" se refiere a un sistema de entrada/salida implementado en software que proporciona una salida que es diferente de la entrada. Un motor puede ser un bloque de

funcionalidad codificado, tal como una biblioteca, una plataforma, un kit de desarrollo de software ("SDK") o un objeto. Cada motor puede ser implementado en cualquier tipo apropiado de dispositivo de computación, por ejemplo, servidores, teléfonos móviles, tablets, computadores portátiles, reproductores de música, lectores de libros electrónicos, ordenadores portátiles o de sobremesa, PDAs, smartphones, u otros dispositivos fijos o portátiles, que incluyan uno o más procesadores y medios legibles por computador. Adicionalmente, dos o más de los motores pueden ser implementados en el mismo dispositivo de computación, o en diferentes dispositivos de computación.

Los procesos y flujos lógicos descritos en esta especificación pueden ser realizados por uno o más computadores programables ejecutando uno o más programas de computador para realizar funciones operando sobre datos de entrada y generando salida. Los procesos y flujos de lógica también pueden ser procesados por, y los aparatos también pueden ser implementados como, circuitos especiales de lógica de propósito, por ejemplo, un FPGA (Formación de puertas programable en campo) o un ASIC (circuito integrado de aplicación específica).

Los computadores adecuados para la ejecución de un programa de computador incluyen, a modo de ejemplo, pueden estar basados en microprocesadores de propósito general o especial o ambos, o cualquier otro tipo de unidad central de procesamiento. Generalmente, una unidad central de procesamiento recibirá instrucciones y datos desde una memoria de sólo lectura o una memoria de acceso aleatorio o ambas. Los elementos esenciales de un computador son una unidad central de procesamiento para desempeñar o ejecutar instrucciones y uno o más dispositivos de memoria para almacenar instrucciones y datos. También, generalmente, un computador incluye, o esta operativamente emparejado para recibir datos desde o transferir datos a, o ambos, uno o más dispositivos de almacenamiento masivo para almacenar datos, por ejemplo, discos magnéticos, magneto ópticos u ópticos. Sin embargo, no es necesario que un ordenador tenga tales dispositivos. Por otra parte, un computador puede estar incorporado en otro dispositivo, por ejemplo, un teléfono móvil, un asistente digital personal (PDA), un reproductor móvil de audio o video, una consola de juegos, un receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), o un dispositivo de almacenamiento portátil, por ejemplo, una unidad flash de bus serie universal (USB), por nombrar sólo algunos.

Los medios legibles por computador adecuados para almacenar instrucciones y datos de programas informáticos incluyen todas las formas de memoria no volátil, medios y dispositivos de memoria, incluyendo a modo de ejemplo dispositivos de memoria de semiconductores, por ejemplo, EPROM, EEPROM y dispositivos de memoria flash; discos magnéticos, por ejemplo, discos duros internos o discos extraíbles; discos magneto-ópticos; y discos CD ROM y DVD-ROM. El procesador y la memoria pueden ser complementados mediante, o incorporados en, circuitos lógicos de propósito especial.

Para proporcionar la interacción con un usuario, las realizaciones de la materia descrita en esta especificación pueden ser implementadas en un computador que tiene un dispositivo visualizador, por ejemplo, un monitor CRT (tubo cátodo) o LCD (pantalla de cristal líquido), para mostrar información al usuario y un teclado y un dispositivo señalador, por ejemplo, un ratón o un trackball, mediante el cual el usuario puede proporcionar información al computador. Otros tipos de dispositivos pueden ser utilizados para proporcionar la interacción con un usuario también; por ejemplo, la retroalimentación proporcionada al usuario puede ser cualquier forma de retroalimentación sensorial, por ejemplo, retroalimentación visual, retroalimentación auditiva, o retroalimentación táctil; y la entrada del usuario puede ser recibida en cualquier forma, incluyendo la entrada acústica, de voz o táctil. En adición, un computador puede interactuar con un usuario enviando documentos a y recibiendo documentos desde un dispositivo que es utilizado por el usuario; por ejemplo, enviando páginas web a un navegador web en un dispositivo cliente del usuario en respuesta a solicitudes recibidas desde el navegador web.

Las realizaciones de la materia descrita en esta especificación pueden ser implementadas en un sistema de computador que incluye un componente de back-end, por ejemplo, como un servidor de datos, o que incluye un componente de middleware, por ejemplo, un servidor de aplicaciones, o que incluye un componente de front-end, por ejemplo, un ordenador cliente que tiene una interfaz gráfica de usuario o un navegador web a través del cual un usuario puede interactuar con una realización de la materia descrita en esta especificación, o cualquier combinación de uno o más de tales componentes de back-end, middleware, o front-end. Los componentes del sistema pueden estar interconectados mediante cualquier forma o medio de comunicación de datos digitales, por ejemplo, una red de comunicación. Ejemplos de redes de comunicación incluyen una red de área local ("LAN") y una red de área amplia ("WAN"), por ejemplo, Internet.

El sistema de computación puede incluir clientes y servidores. Un cliente y un servidor están generalmente alejados el uno del otro e interactúan típicamente a través de una red de comunicación. La relación entre cliente y servidor surge mediante programas de computador que se ejecutan en los respectivos computadores y que tienen una relación cliente-servidor entre sí.

REIVINDICACIONES

1. Un método implementado por computador, que comprende:

5 recibir (310) datos desde los que se describe una escena, en la que la escena comprende una o más fuentes de luz y uno o más objetos que tienen diferentes propiedades ópticas de superficie; recibir (320) una solicitud para renderizar una imagen de la escena utilizando un método de muestreo de importancia múltiple de iluminación directa que combina el muestreo de un mapa de entorno de alto rango dinámico - HDR - y el muestreo de un producto coseno de una función de distribución de reflectancia bidireccional - BRDF - de la superficie de un objeto, en la que cada técnica de muestreo utiliza una distribución de probabilidad diferente para muestrear una fracción respectiva de un número total de muestras, en la que el muestreo del mapa de entorno HDR se implementa utilizando una función de densidad de probabilidad tabulada, y el muestreo del producto coseno de la BRDF es una fórmula analítica derivada de una función de densidad de probabilidad que depende de la dirección de salida y de la posición de la superficie de un rayo; modificar (330) únicamente la función de densidad de probabilidad del mapa de entorno HDR para reducir una varianza del método de muestreo de importancia múltiple mientras se sostienen fijas las fracciones respectivas y la otra distribución de probabilidad; renderizar (340) la escena utilizando el muestreo de importancia múltiple utilizando la distribución de probabilidad particular modificada y la otra distribución de probabilidad; y emitir (350) la escena renderizada en respuesta a la solicitud.

25 2. El método de la reivindicación 1, en el que la probabilidad asignada a una muestra dada por la distribución de probabilidad particular modificada depende de una diferencia entre (i) un primer valor que es proporcional a una contribución de la muestra dada a un resultado de renderización y (ii) un segundo valor que es una suma ponderada de las probabilidades asignadas a la muestra dada por la otra distribución de probabilidad.

30 3. El método de la reivindicación 2, en la que cada probabilidad en la suma ponderada se pondera mediante la fracción de conteo de muestra respectiva para la otra distribución de probabilidad correspondiente.

4. El método de la reivindicación 2, en la que, cuando la diferencia es mayor que cero, la probabilidad asignada a la muestra dada es la diferencia dividida por la fracción de recuento de muestras para la distribución de probabilidad particular modificada y un factor de normalización.

35 5. El método de la reivindicación 2, en la que, cuando la diferencia no es mayor que cero, la probabilidad asignada a la muestra dada es cero.

40 6. Un sistema que comprende:
Uno o más computadores y uno o más dispositivos de almacenamiento que almacenan instrucciones que son operables, cuando son ejecutadas por el uno o más computadores, para causar que el uno o más computadores realicen el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

45 7. Uno o más medios de almacenamiento legibles por computador codificados con instrucciones que, cuando son ejecutadas por uno o más computadores, causan que el uno o más computadores realicen el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

50

55

60

65

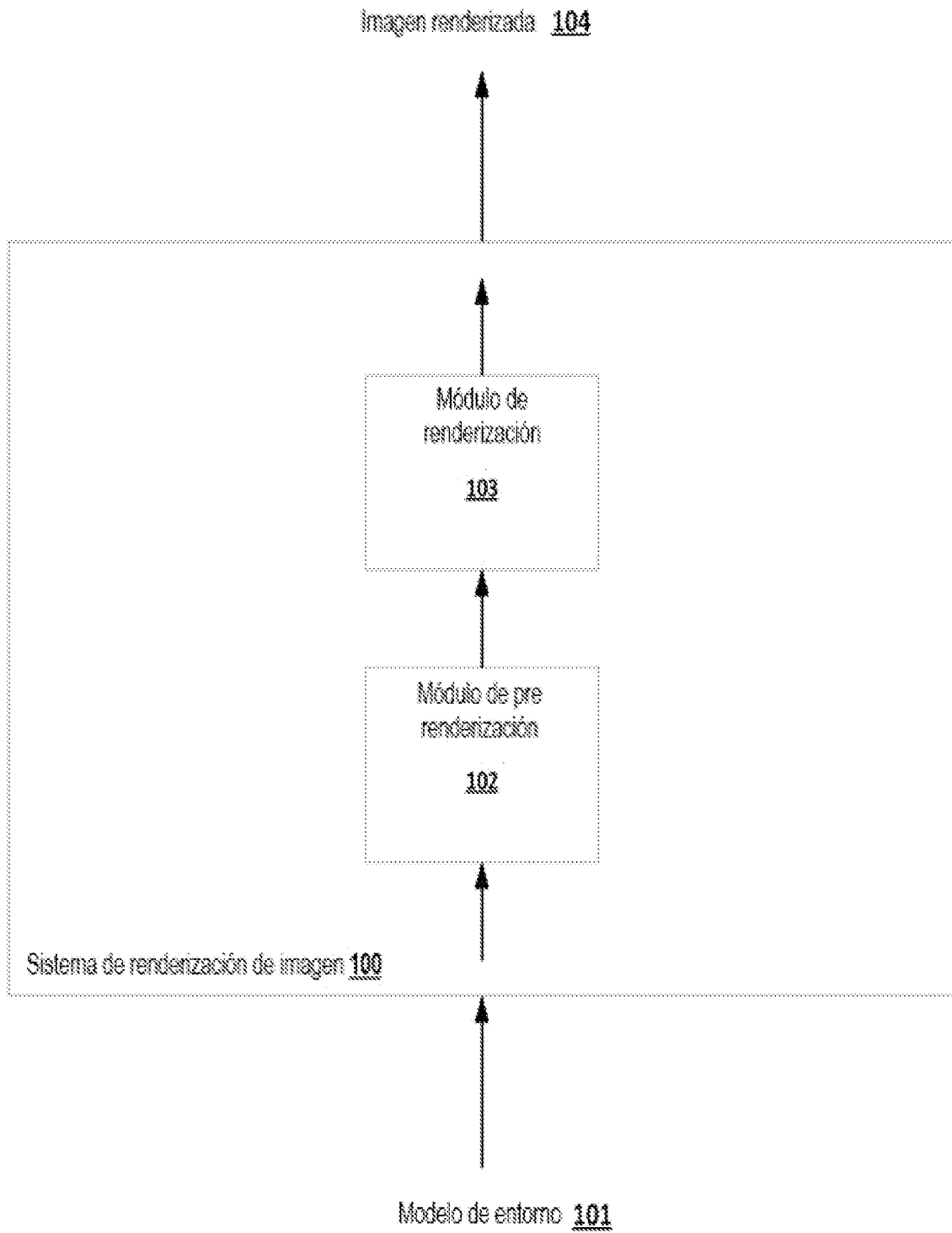


FIG. 1

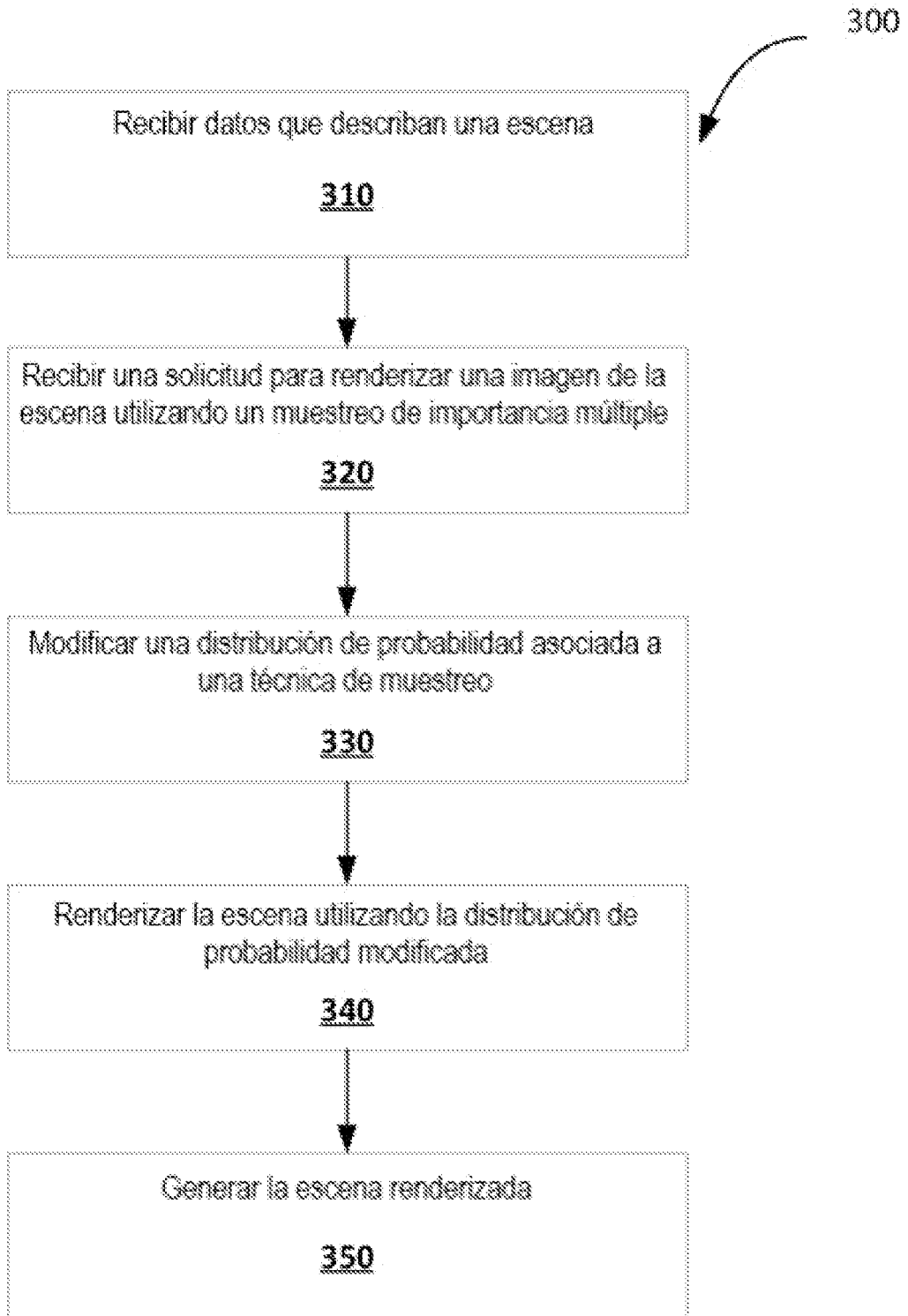


FIG. 3