



29,
29
Universidad Nacional Autónoma de México

"MODELOS MATEMÁTICOS DE
ILUMINACIÓN PARA LA SÍNTESIS DE
IMAGEN"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN MATEMÁTICAS

Presentada por:
SANTAMARÍA SANCHEZ SERGIO
Director de Tesis
MAT. ANA LUISA SOLIS

GONZÁLEZ COSÍO
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. ENTORNO DE LOS MODELOS DE ILUMINACION	4
ETAPAS DE LA SINTESIS DE IMAGEN	4
1.1 DETERMINACION DE LA VISIBILIDAD	7
1.1.1 ALGORITMOS DISCRETOS	10
1.1.2 ALGORITMOS CONTINUOS	12
1.2 ILUMINACION DIRECTA	13
1.3 SOMBREADO	14
1.4 ALIASING	14
1.5 TEXTURAS	15
1.6 MODELADO	16
CAPITULO 2. EL PROCESO FISICO DE LA ILUMINACION	17
2.1 LA LUZ COMO PARTICULAS	17
2.2 MECANISMOS DE INTERACCION DE LA LUZ	18
2.3 MECANISMOS FUNDAMENTALES DE INTERACCION DE LA LUZ	23
2.3.1 REFLEXION ESPECULAR PERFECTA	23
2.3.2 REFLEXION DIFUSA PERFECTA	25
2.3.3 REFRACCION ESPECULAR PERFECTA	26
2.3.3.1 REFLEXION INTERNA TOTAL	28
2.3.3.2 GEOMETRIA DE LA REFRACCION	29
2.3.4 TRANSMISION DIFUSA PERFECTA	31
2.3.5 CONSIDERACIONES GEOMETRICAS Y DE COLOR	31
2.3.6 REFLEXION DIFUSA [dr(C ₀)	33

2.3.7 REFLEXION ESPECULAR $I_{2r}(C)$	34
2.3.7.1 EL TERMINO G DE ATENUACION GEOMETRICA	37
2.3.7.2 EL TERMINO D DE DISTRIBUCION DE MICROFACETAS	39
2.3.7.3 EL TERMINO F DE REFLECTANCIA DE FRESNEL	41
CAPITULO 3. MODELOS DE ILUMINACION	44
3.1 IMPORTANCIA DE LOS MODELOS DE ILUMINACION	44
3.2 CLASIFICACION DE LOS MODELOS DE ILUMINACION	45
3.3 MODELOS DE ILUMINACION EN BASE AL OBSERVADOR	49
3.4 MODELOS DE ILUMINACION BASADOS EN LAS FUENTES DE LUZ	53
3.5 MODELOS DE ILUMINACION EMPIRICOS	55
3.5.1 MODELO DE BOUKNIGHT	56
3.5.2 FUNCIONES DE ATENUACION ATMOSFERICA	58
3.5.3 MODELO EMPIRICO DE PHONG	60
3.5.4 MODELO EMPIRICO DE BLINN	61
3.5.5 MODELO DE GOURAUD PARA SIMULACION DE SUPERFICIES CURVAS	62
3.5.6 MODELO DE PHONG PARA SIMULACION DE SUPERFICIES CURVAS	64
3.6 MODELOS TRANSICIONALES. "RAY TRACING"	65
3.6.1 MEJORAS EN LA ILUMINACION ESPECULAR	65
3.6.2 PROPIEDADES MACROSCOPICAS DE LAS SUPERFICIES	67
3.6.3 REFLEXION Y REFRACCION RECURSIVA	68
3.6.4 CONSIDERANDO LA ABSORCION Y DISPERSION DE LA LUZ EN UN MATERIAL TRANSPARENTE	69
3.6.5 AJUSTE DINAMICO EN LA CONTRIBUCION DE LA ILUMINACION	71

3.6.6 RAY TRACING DISTRIBUIDO	71
3.6.7 INTRODUCCION DE REGIONES DE PENUMBRA	72
3.7 FUTUROS DESARROLLOS. MODELOS ANALITICOS.	
RADIOSIDAD	75
3.7.1 HEMISFERIO DE ILUMINACION Y ANGULO SOLIDO	76
3.7.2 INTENSIDAD Y ENERGIA DE LA LUZ	78
3.7.3 APLICACION DEL CONCEPTO DE ENERGIA AL MODELO DE ILUMINACION	80
3.7.4 VALIDEZ TEORICA DEL MODELO DE ILUMINACION	82
3.7.5 RADIOSIDAD PARA MEDIOS DIFUSOS	83
CAPITULO 4. DESARROLLO DE UN MODELO DE ILUMINACION	
GLOBAL BASADO EN EL MODELO DE WHITTED	89
4.1 ILUMINACION	89
4.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA	91
4.3 PRINCIPALES RUTINAS UTILIZADAS	94
4.3.1 PROCEDIMIENTO PARA ESTABLECER LA BASE DE DATOS	95
4.3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACION DEL RAYO QUE PASE POR EL PIXEL (I,J)	96
4.3.3 PROCEDIMIENTO PARA GENERACION DE LA ECUACION DEL RAYO	97
4.3.4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL SEGUIMIENTO DEL RAYO	97
4.3.5 RUTINAS DE INTERSECCION RAYO-SUPERFICIE	98
4.3.6 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA NORMAL A UNA SUPERFICIE EN UN PUNTO	99
4.3.7 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA COMPONENTE DE REFLEXION ESPECULAR DEL MODELO DE ILUMINACION	99

4.3.8 PROCEDIMIENTO PARA DAR EL EFECTO DE BRILLO PRODUCIDO POR UNA FUENTE DE LUZ	100
4.3.9 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA COMPONENTE DE REFLEXION DIFUSA DEL MODELO DE ILUMINACION	101
4.4 COMO MODIFICAR EL MODELO DE ILUMINACION	102
CONCLUSIONES	106
APENDICE A	
CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS EN LOS CUALES SE HA EMPLEADO EL SISTEMA	109
GLOSARIO DE TERMINOS	112

INTRODUCCION

Al generar imágenes con una computadora, lo que quisiéramos es comunicar y extender nuestro entendimiento del mundo, proporcionando información visual que de otra manera podría escapar de nuestra percepción. Mediante la generación de imágenes podemos ver cosas que no existen, porque están en un estado de diseño o visualización, podemos ver cosas que de otra forma no podrían ser observadas por estar fuera del dominio de nuestra percepción visual, o bien, ver cosas que no podrían existir, porque podemos crear modelos y desplegar conceptos que son inconsistentes con la realidad tridimensional. También podemos ver conceptos abstractos o conceptos para los cuales la verdadera realidad visual es confusa.

El problema que se intenta resolver en la creación de imágenes con computadora, se describe más fácilmente si hacemos una analogía con el mundo real. Ver una imagen del medio ambiente es similar a ver el medio ambiente directamente en el sentido que la luz de algún color está llegando al ojo del observador desde alguna dirección dentro de su campo de visión. Cuando vemos el medio ambiente, la luz viene al ojo a través del proceso de reflexión, refracción y dispersión, o bien, directamente de las fuentes de luz. En cambio al ver una imagen, la luz es radiada desde un monitor de video o reflejada de alguna superficie impresa. En la simulación del realismo se intenta igualar la percepción del observador de un medio ambiente real reproduciendo el color e intensidad correcta de la luz para cada punto en la imagen.

El proceso de crear una imagen sobre un dispositivo de graficación de tipo raster, es análogo al proceso fotográfico. Si

reemplazamos al observador por una cámara fotográfica y grabamos una proyección del medio ambiente en película, la película será el plano de la imagen, y la intensidad y el color de la luz del medio será enfocada (proyectada) dentro del plano de la imagen por la lente de la cámara y grabada en la película. La película es procesada a un medio de despliegue tal como el papel fotográfico o transparencia. Ver el medio de despliegue resulta ser una reconstrucción mental del medio que fué fotografiado.

Para poder simular el medio ambiente real es necesario dar una descripción matemática del medio (escena). Esta descripción es procesada por la computadora para determinar la posición, visibilidad y color de los objetos en una imagen plana, así creando un archivo de la imagen. Es entonces cuando el archivo es procesado para poder ser desplegado.

El presente trabajo está enfocado al estudio de las leyes de interacción de la luz con los objetos dependiendo de las características físicas de éstos, teniendo como objetivo poder elaborar un modelo matemático que describa el comportamiento de la luz y utilizarlo en la generación de imágenes de aspecto real.

El trabajo de Tesis consiste en comprender los modelos de iluminación que se han creado y estar en condiciones de crear nuevos modelos para alguna aplicación específica, así como de crear un sistema para generar imágenes en las cuales se tenga control sobre el modelo de iluminación empleado y éste pueda ser modificado fácilmente.

Para llevar a cabo esto el trabajo ha sido dividido en cuatro capítulos:

El primer capítulo tiene como objetivo ubicar el problema de la

iluminación en el contexto de la generación de imágenes, describiendo cada una de las etapas que se deben cubrir para generar una imagen.

El segundo capítulo proporciona las bases necesarias en lo que se refiere a la descripción física de la luz y su interacción con los distintos tipos de materiales.

El tercer capítulo es una revisión de los Modelos de Iluminación que se han desarrollado y una explicación de las técnicas usadas para su aplicación.

En el último capítulo se describe el sistema que se construyó para probar los Modelos de Iluminación desarrollados en base al material de los capítulos anteriores, proporcionando una herramienta para la generación de imágenes.

CAPITULO I.

ENTORNO DE LOS MODELOS DE ILUMINACION.

ETAPAS DE LA SINTESIS DE IMAGEN.

Los modelos de iluminación pueden utilizarse como una fase dentro de un proceso de generación de imágenes "realistas". A este proceso se le llama "Síntesis de Imagen".

La Síntesis de Imagen es en cierto grado una simulación del proceso óptico que acontece en el mundo real. La física actual de la propagación e interacción de la luz con la materia es demasiado extensa y complicada para simular en magnitudes macroscópicas, por lo que se han desarrollado modelos simplificados. La Síntesis de Imagen se ha concentrado en obtener modelos que hagan que los objetos se vean lo suficientemente bien, en vez de modelos exactos de la realidad física.

Basada en una simulación de la propagación de la luz en el mundo real, la Síntesis de Imagen puede dividirse en tres subproblemas:

Formación de la imagen - Que es la determinación de las componentes de la imagen que son dependientes de la posición del observador en la escena. Esto incluye analizar la distribución de la luz que viene de los objetos visibles y producir una imagen desde un punto de visión particular (formación directa de la imagen), y analizar la distribución de la luz de objetos no visibles directamente desde el punto de visión, produciendo efectos dependientes del punto de visión (formación indirecta de la imagen). La formación directa de la imagen ha sido nombrado como "el problema de las superficies

ocultas" o "visibles", pero es sólo una de las múltiples "etapas" de determinación de la visibilidad que deben tener lugar en el proceso completo de la Síntesis de Imagen.

La etapa de la formación indirecta de la imagen incluye el cálculo de reflexiones desde superficies de tipo espejo, y refracciones a través de objetos transparentes. Esto involucra etapas adicionales de determinación de visibilidad con diferentes puntos de visión.

Iluminación - Es la determinación de las componentes de la imagen que son dependientes de la propagación de la luz a través de la escena e independientes de la posición del observador. Esto incluye el proceso de distribución de la luz que incide directamente de la fuente de luz a la superficie del objeto (iluminación directa) y de calcular la luz que proviene de los demás objetos, la cual no es debida a la propagación directa de la fuente al objeto (iluminación indirecta).

La iluminación directa es conocida como "el problema de las sombras", el cual involucra la determinación de la visibilidad desde las fuentes de luz. La iluminación indirecta puede incluir reflexiones de otros objetos o fuentes de luz y luz que pasa a través de objetos transparentes o translúcidos. Aquí se requiere de determinación de la visibilidad con puntos de visión distribuidos sobre la superficie de cada objeto.

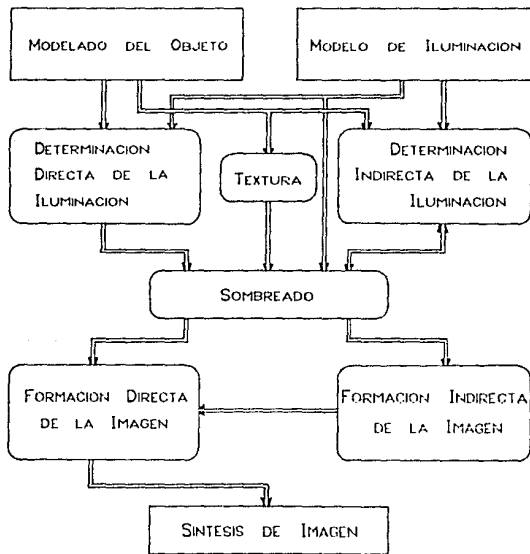
Sombreado - Es el proceso de determinar la distribución de la luz que llega desde una superficie, dada la luz incidente y las propiedades ópticas de la superficie. En la forma más general esto es descrito por una función de distribución bidireccional $F(x,y,z,\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$. Esta función describe que fracción de la luz que llega al punto (x,y,z) en un objeto desde un ángulo

(θ_{in}, ϕ_{in}) de incidencia, sale del objeto en el ángulo $(\theta_{out}, \phi_{out})$.

La dependencia de (x, y, z) en el cálculo de esta función es llamado el mapeo de textura.

Estos subproblemas de la Síntesis de Imagen se muestran en la figura 1.1. Como es posible observar, la mayoría de las etapas involucran la determinación de la visibilidad, lo cual constituye el costo dominante en la mayoría de los sistemas de Síntesis de Imagen. Incorporar todos estos subproblemas dentro de un sistema de Síntesis de Imagen es una tarea bastante elaborada. Simular tan solo unos pocos efectos ópticos puede ser muy costoso computacionalmente.

FIGURA 11 ETAPAS DE LA SÍNTESIS DE IMAGEN.



11 DETERMINACION DE LA VISIBILIDAD

La determinación de la visibilidad es un subproblema fundamental y recurrente en la Síntesis de Imagen, la cual ocurre en distintas formas. El problema de visibilidad simple, con un punto de visión fijo es uno de los más estudiados. Este es el problema tanto para la formación directa de la imagen como para la iluminación directa desde una fuente de luz. Los algoritmos para resolver el problema de visibilidad simple forman la base para extensiones y resolver problemas de visibilidad de orden mayor (como los utilizados para calcular objetos en movimiento, profundidad de campo, o efectos de iluminación indirecta). El problema de superficies visibles para el caso simple del problema de formación directa de la imagen se puede establecer así:

Dados

- un conjunto de superficies en 3D
- un punto de visión
- un plano orientado para la formación de la imagen
- y un campo de visión.

Para cada punto en el plano de la imagen dentro del campo de visión

- { Determinar cual punto en que superficie está más cerca del punto de visión a lo largo de una línea que pase a través del punto de visión y el punto en el plano de la imagen.
- }

Esta es una descripción muy abstracta del problema. En un sistema de Síntesis de Imagen, el algoritmo para resolver este subproblema no se encuentra aislado como en la descripción anterior, sino que se relaciona con los otros subproblemas de diversas

maneras. Pero por razones de claridad los algoritmos básicos se verán en forma aislada.

Hay dos clases básicas de algoritmos para resolver este problema: los algoritmos continuos y los algoritmos discretos. Cada clase ataca el problema de forma completamente diferente. Los algoritmos continuos operan desarrollando determinación de la visibilidad sobre áreas continuas cubriendo totalmente el plano de la imagen. Cada parte visible de cada superficie será detectada sin tomar en cuenta su posición o tamaño. Los algoritmos discretos forman una aproximación a la solución del problema de superficies visibles. Estos algoritmos determinan visibilidad sólo en un número finito de puntos y la visibilidad de los objetos entre los puntos muestreados es ignorada.

Cualquier algoritmo continuo puede ser transformado a un algoritmo discreto simplemente tomando muestras de la salida continua. Desafortunadamente, no necesariamente es posible generalizar un algoritmo discreto a uno continuo.

En la práctica, las ventajas teóricas de los algoritmos continuos son anuladas por la complejidad y por la cantidad limitada de primitivos gráficos y efectos que pueden manejar. Usualmente sólo son manejables polígonos sin efectos de luz indirecta. Los algoritmos discretos para resolver problemas de visibilidad y sombreado permiten usar muchos efectos avanzados y modelos complejos (como reflexiones y refracciones múltiples en superficies curvadas), los cuales son muy difíciles, si no hasta imposibles, para cualquier algoritmo continuo. Los algoritmos para superficies visibles pueden ser clasificados en distintas formas. Las dos clases más amplias son los algoritmos continuos y los discretos. Una subdivisión adicional

de esta clasificación puede ser hecha observando la estructura general del algoritmo con más detalle.

Basado en estas estructuras se pueden identificar siete tipos fundamentales de algoritmos:

• Algoritmos discretos

Algoritmo de Z-Buffer

Algoritmo de Ray Tracing

Algoritmo del Pintor

Algoritmo de Scan-Line

• Algoritmos continuos (Coherencia)

Algoritmo de Subdivisión de Area / Volumen

Algoritmo de Scan-Plane

• Otro tipo

Algoritmo de Propagación de Ondas.

Se considerarán los algoritmos de la forma más simple e idealizada para mostrar las estrategias básicas conocidas para resolver los problemas de visibilidad, sin detalles de eficiencia que oscurezcan la idea, ni combinación de técnicas.

Los primeros seis algoritmos operan usando un modelo simple de propagación de la luz. Se asume que la luz viaja en un medio homogéneo, en trayectorias rectas, y sólo interactúa con objetos en sus superficies de acuerdo a las reglas de la óptica geométrica. La difracción, fase, polarización y cualquier relación entre los tamaños de la longitud de onda de la luz y los objetos, es ignorada. No hay dependencia del tiempo sobre cualquier aspecto de los rayos de luz y un número infinito de rayos son supuestos para llenar la escena (ningún efecto de cuantización). Por otra parte, el algoritmo de propagación de ondas trata la luz como un fenómeno oscilatorio de

valor complejo, el cual se propaga en frentes de onda esféricos desde cada punto en la escena. Se han reportado algunos experimentos que usan el modelo de frentes de onda de la luz, pero el resultado ha sido desalentador debido a las limitaciones sobre el tamaño y espaciamiento entre primitivos, a la cantidad masiva de datos y cálculos, a serios problemas en la difracción y a manchas de la luz coherente. En estos momentos, no es razonable esperar que la Síntesis de Imagen por este método compita con métodos de óptica geométrica, así que sólo los algoritmos que utilizan el modelo de óptica geométrica de la luz serán considerados.

1.11 ALGORITMOS DISCRETOS

La mayor distinción entre los tipos de algoritmos discretos es el orden dentro de la clasificación. La distinción por el orden de clasificación es explicada en el siguiente análisis. Los cuatro algoritmos discretos son esbozados a continuación con una descripción del orden que se utiliza en cada uno de ellos.

Z-BUFFER

Para todos los objetos

{ Para todos los pixels cubiertos (x,y)

{ Compara z } }

RAY TRACING

Para todos los pixels (x,y)

{ Para todos los objetos

{ Compara z } }

PINTOR

Clasifica los objetos con respecto a z

Para todos los objetos

{ Para todos los pixels cubiertos (x,y)

{ Ilumina } }

SCAN-LINE

Clasifica los objetos con respecto a y

Para todo y

{ Clasifica los objetos con respecto a x

Para todo x

{ Compara z } }

Los algoritmos de Z-Buffer y Ray Tracing difieren en el orden de anidamiento de sus ciclos principales. Mientras que el algoritmo de Z-Buffer actúa sobre un solo objeto a la vez y opera sobre todos los pixels que este objeto cubre, el algoritmo de Ray Tracing maneja un pixel a la vez y compara cada profundidad de todos los objetos en este pixel. Así, los algoritmos de Z-Buffer y Ray Tracing son duales con respecto a el orden de anidamiento del ciclo.

El algoritmo de Z-Buffer difiere del algoritmo del Pintor cuando se realiza la comparación de profundidades. Mientras que el algoritmo de Z-Buffer hace la comparación a través de los cálculos en su ciclo interno. El algoritmo del Pintor hace todas las comparaciones de profundidad en una fase preliminar de clasificación (suponiendo que un orden válido de clasificación exista y pueda ser encontrado). Así, el algoritmo de Z-Buffer y el algoritmo del Pintor son duales respecto al momento de determinación de la profundidad.

El algoritmo de Scan-Line difiere del Z-Buffer en que el Scan-Line primero divide la imagen bidimensional (en el espacio de la imagen) en una sucesión de "scan-lines" unidimensionales y entonces aplica un algoritmo de superficies visibles unidimensional en cada "scan-line". Sólo aquellos primitivos, que intersectan el "scan-line" son incluidos en el problema de superficies visibles para el scan-line. Esta clasificación y división por scan-line ocurre antes de que cualquier operación del algoritmo de superficies visibles sea aplicada a cada scan-line. Esto es un intento para reducir la complejidad del subproblema (coherencia por línea).

1.12 ALGORITMOS CONTINUOS

Los algoritmos de visibilidad continuos regresan descripciones de áreas continuas visibles desde un punto de visión particular. Esto es una operación de "entrada al polígono, salida del polígono". Hay dos subclases de algoritmos continuos: los algoritmos de Scan-Plane, los cuales mueven un plano a través de la escena para reunir los datos que le permitan la generación de una reconstrucción poligonal exacta de los objetos visibles; y los algoritmos de subdivisión, los que particionan la escena, buscando reducir el problema y resolverlo por métodos más sencillos. Los algoritmos de subdivisión pueden ser a su vez clasificados por la forma de hacer la subdivisión. Esta puede ser bidimensional o tridimensional en puntos fijos en el espacio, haciendo una subdivisión uniforme o jerárquica.

La mayoría de los algoritmos en la práctica, combinan distintos algoritmos básicos. Algunos algoritmos de Scan-Line realizan la subdivisión vertical en cada scan-line independientemente y entonces

usan un algoritmo continuo sobre el subproblema resultante de dimensión menor. Esto permite eliminar las discontinuidades de intensidad (aliasing) en la dirección horizontal pero no en la vertical.

Los algoritmos de subdivisión se han utilizado como un preproceso útil para los algoritmos discretos. La subdivisión reduce la magnitud del problema que el resto del algoritmo debe resolver. Esta ha sido una técnica utilizada para aumentar la velocidad de Ray Tracing.

Hace algunos años, cuando la memoria era demasiado cara y el procesamiento muy lento, se pensó que los algoritmos de Ray Tracing y Z-Buffer eran técnicas sumamente ineficientes. Con la reducción en el costo de la memoria y los procesadores más rápidos, estos algoritmos han resurgido nuevamente como los más usados para resolver el problema de superficies visibles.

En el ambiente de investigación, el más popular ha sido el Ray Tracing, por la gran flexibilidad del algoritmo, aunque esta técnica sufría de gran lentitud y problemas de discontinuidad (aliasing) avances recientes la han hecho competitiva con respecto a los otros algoritmos para superficies visibles.

1.2 ILUMINACION DIRECTA

El problema de determinación de la iluminación directa, es muy similar al problema de formación directa de la imagen. Las partes de los objetos son iluminadas si estas son visibles a las fuentes de luz. Con la mayoría de los algoritmos de sombras es posible manejar múltiples fuentes de luz con la aplicación independiente del mismo algoritmo para cada una de las fuentes de luz. Usar demasiadas fuentes de luz causaría que el tiempo de procesamiento de la

iluminación domine sobre el tiempo requerido para la formación de la imagen.

Un algoritmo continuo del tipo "entrada al polígono, salida del polígono" puede ser usado como un preproceso para calcular los polígonos de sombra, los cuales son combinados con los polígonos originales como una textura y recubriendo con cualquier tipo de algoritmo de formación directa de la imagen.

La prueba de detección de sombras en Ray-Tracing es semejante a la formación directa de la imagen al trazar rayos, sólo que ahora los rayos parten de la fuente de luz y no del observador.

Efectos de formación de la imagen indirecta (reflexión y refracción) son elegantemente manejados por Ray Tracing, siendo el único que ha resuelto el problema general de reflexión y refracción de superficies curvadas.

1.3 SOMBREADO

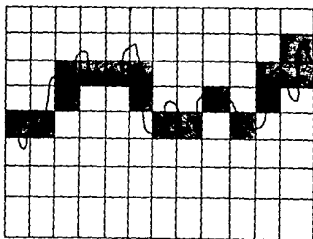
El sombreado es el proceso de determinar la intensidad de la luz que sale de un objeto, dada la distribución de la luz que llega a él y las propiedades del objeto. En el cálculo de la iluminación indirecta se involucra la aplicación repetida de sombreado local cuando la luz viaja entre los objetos. Las mejores aproximaciones a el cálculo de la iluminación indirecta son a través de la técnica de sombreado llamada Radiosidad.

1.4 ALIASING

La salida del proceso de Síntesis de Imagen es una imagen de tipo raster (una representación discreta de una imagen continua). El proceso de convertir una señal continua en una señal discreta es

llamado muestreo. El espaciamiento entre las muestras limita la cantidad de detalles que pueden ser representados en la señal discreta. Cualquier intento por representar detalles más finos (frecuencias espaciales más altas en la señal continua) resultará en la introducción de una señal burda no deseada (frecuencias espaciales más bajas). Esta señal se conoce como un "alias" y este proceso es llamado "aliasing". El proceso para prevenir el aliasing es llamado antialiasing, y para realizarlo la señal continua debe ser filtrada antes de hacer el muestreo para eliminar todos los detalles que sean demasiado pequeños. Las escaleras o aristas dentadas son un ejemplo de aliasing espacial, causado por muestrear sin filtrar la señal. El aliasing temporal puede ocurrir cuando se crea una secuencia de imágenes para una animación. El antialiasing temporal de imágenes se conoce como motion blur (movimiento borroso), donde el efecto del filtrado es lo borroso de los objetos en movimiento.

FIGURA 12 ALIASING



15 TEXTURAS

La textura es el detalle superficial de los objetos desplegados. Hay dos problemas principales asociados con la creación de texturas; el problema del mapeo inverso y el problema del

antialiasing. El problema del mapeo es para encontrar que punto en la imagen corresponde a un punto sobre el objeto. Esto es una simple proyección. El problema del mapeo inverso involucra determinar que región de la textura corresponde a un pixel dado en la imagen. El problema del antialiasing involucra representar las propiedades de cada región de la textura con una muestra simple sin introducir aliasing.

Tres de los métodos más usados para la generación de imágenes sintéticas sofisticadas son:

- 1) mapeo de texturas consistente en "pintar" una imagen sobre una superficie lisa o agregar un patrón a la superficie, no obstante la superficie tendrá una apariencia lisa.
- 2) mapeo de protuberancias, también conocido como perturbación normal, añadiendo la apariencia de rugosidad a la superficie. El método consiste en perturbar el vector normal, el cual es usado en el cálculo de la iluminación.
- 3) texturas sólidas, el cual usa funciones de textura definidas a través de una región del espacio tridimensional.

1.6 MODELADO

Una escena consiste de objetos, y el modelado es usado para definir estos objetos que deseamos visualizar. Este proceso incluye la definición de la forma, posición y orientación de cada objeto, las propiedades ópticas de cada uno y la posición, color e intensidad de cada una de las fuentes de luz en la escena. Los objetos son usualmente modelados describiendo sus superficies.

CAPITULO II

EL PROCESO FISICO DE LA ILUMINACION

2.1 LA LUZ COMO PARTICULAS

Existen varios modelos que explican muchas de las características de la luz. El modelo de partículas es el modelo más usado para la generación de imágenes que explica la luz como un conjunto de muchas pequeñas partículas llamadas fotones.

En particular los métodos de Ray Tracing están basados en el modelo de partículas, el cual esencialmente dice que un rayo de luz es la trayectoria recta de una partícula de luz.

El fotón no sólo se mueve a lo largo de una línea recta, sino también se encuentran vibrando. Esta vibración es un tipo de abstracción matemática. La explicación del color mediante la vibración es muy útil y poderosa para empezar a entender el color.

A cada fotón se puede asociar una frecuencia de vibración particular, otra forma de describir la vibración del fotón es con una medida llamada su longitud de onda. La longitud de onda de un fotón es la distancia que recorre en el transcurso de un ciclo completo de vibración.

En algunas situaciones es conveniente hablar de la frecuencia de un fotón, mientras que en otras resulta más natural hablar de su longitud de onda. También es útil saber que la energía de un fotón es directamente proporcional a su frecuencia.

$$E = h \cdot f \quad h = \text{constante de Planck}$$

La frecuencia de un fotón (así como su energía) que llega al ojo está relacionada directamente con el color que se ve, así la

frecuencia individual de distintos fotones nos permiten percibir los colores de los objetos que nos rodean, aún cuando estos objetos no radíen luz por sí mismos, pero sí la reflejan.

2.2 MECANISMOS DE INTERACCION DE LA LUZ

Para generar imágenes realistas, se necesita entender como se comporta la luz con las superficies de los objetos (fronteras entre materiales). Esta no es una tarea sencilla, muchas de las sutilezas de la interacción de la luz son poco entendidas, o simplemente no se comprenden. No obstante hay algunas aproximaciones que pueden generar imágenes muy buenas.

Es posible dividir la interacción de la luz con una superficie, dentro de cuatro clases: reflexión especular, reflexión difusa, transmisión especular y transmisión difusa.

Cuando un fotón toca una superficie, este cambia de dirección y color como consecuencia de estos cuatro efectos.

Antes de revisar como es que la luz interactúa con las superficies, es importante entender el espectro de luz incidente, cómo y por qué el espectro cambia cuando éste toca una superficie coloreada.

El estudio actual del color tiene una historia larga y detallada, así que serán mencionados sólo los conceptos fundamentales que son relevantes para la Síntesis de Imagen.

Uno podría preguntarse a sí mismo, ¿qué frecuencia corresponde al blanco?, esta pregunta no tiene una respuesta, porque el blanco

no es un color espectral puro, es decir, ninguna vibración de un fotón puede dar la impresión de luz blanca. La impresión de la luz blanca viene cuando fotones de muchas frecuencias distintas llegan a la misma región del ojo de manera simultánea y muy cercana. El ojo mezcla todos estos colores, dando la impresión de luz blanca.

Es interesante y útil saber cuantos fotones de cada frecuencia son generados por una fuente de luz. Se puede con la ayuda de un instrumento de medición, contar el número promedio de fotones en cada longitud de onda visible en un período de tiempo y graficar los resultados. A una gráfica de intensidad vs. amplitud se le llama la gráfica del espectro de frecuencias (o simplemente espectro).

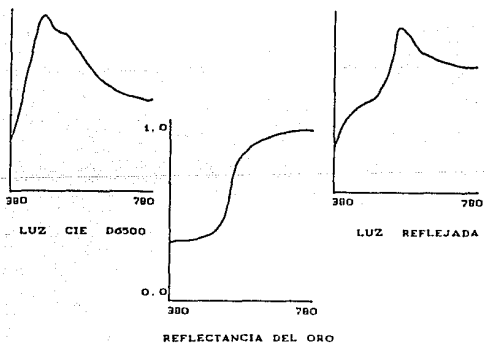
Aunque los principios básicos se ejemplificarán con fotones simples, es importante tener en mente que el fenómeno del color es producido por fotones en todas las longitudes de onda. Así, cuando se hable de un fotón en alguna situación se estará hablando de una agrupación de fotones viajando al mismo tiempo y a través del mismo rayo, pero con diferentes longitudes de onda. Cuando se hable de intensidad de la luz en una cierta longitud de onda, se referirá a cuantos fotones de esa longitud de onda viajan a lo largo del rayo.

Una forma conveniente de representar toda esta información es asociar un espectro a cada rayo. Con este esquema, el espectro resume todos los fotones viajando a lo largo de un rayo, siendo esta una abstracción muy útil. Un problema con este esquema es que la refracción no la modela muy bien. Cuando un rayo pasa entre dos medios, usualmente cambia de dirección dependiendo de la longitud de onda. Si se utiliza un solo rayo para modelar todas las longitudes de onda visibles simultáneamente, entonces no existirá una sola dirección que lo haga trabajar correctamente.

Una forma de evitar este problema es utilizar un rayo para cada longitud de onda particular.

Un aspecto importante a considerar antes de revisar los mecanismos geométricos de la reflexión es: como los objetos responden selectivamente a los fotones que llegan en diferentes longitudes de onda. La descripción de la respuesta será mostrada con un ejemplo: Supongamos que iluminamos una barra de oro con una luz D6500 (es la luz equivalente a la del sol en un día nublado). Una forma de describir como el oro reacciona a la luz que llega (en un ángulo particular) es trazar un espectro de reflectancia. En cada ángulo de incidencia, este espectro indica el porcentaje de la luz recibida que la superficie refleja en cada longitud de onda. De tal modo que para encontrar la luz que sale de la superficie de oro, multiplicamos la cantidad de la luz que llega por el porcentaje de reflectancia del oro en cada longitud de onda. Figura 2.1.

FIGURA 2.1 ESPECTRO DE REFLECTANCIA



Todos los objetos físicos tienen una frecuencia a la cual vibran más fácilmente, esta es su frecuencia de resonancia. Si un objeto vibrando es acercado a otro (inicialmente en reposo) con una frecuencia de resonancia similar, el objeto originalmente quieto empezará a vibrar.

Considérese un fotón vibrando que toca la superficie de un objeto. Los átomos de este objeto están siempre vibrando en una variedad de frecuencias, cuando un fotón toca un átomo, este tiene la oportunidad de transferir alguna o toda su energía. Si el fotón tiene exactamente la energía necesaria para llevar al átomo al siguiente estado de energía estable, el fotón será absorbido y llevará al átomo a un nivel de energía mayor por un tiempo. Si no hay suficiente energía para esta transferencia, el átomo absorberá sólo un poco de esta energía del fotón por un momento, para luego perderla por radiación de la energía en forma de calor.

En caso de que el fotón tenga exactamente la frecuencia exacta para transferir su energía al átomo, este absorberá la energía del fotón (destruyendo el fotón) y oscilando en un nivel mayor. El átomo no puede mantenerse en este estado, así que después de un lapso de tiempo regresa al estado previo a la llegada del fotón.

En el proceso de liberación de esta energía, un nuevo fotón es generado llevando la energía desprendida por la transición. En resumen, un fotón toca un átomo, este absorbe al fotón y empieza a vibrar más rápido, entonces empieza a perder esta vibración adicional y genera un nuevo fotón con la misma frecuencia del fotón que llegó, apareciendo como la reflexión de la luz sobre una superficie. Figura 2.2.

FIGURA 2.2

UN RESULTADO DE LA MECANICA CUANTICA

ES QUE LOS ATOMOS SE MUEVEN DE UN ESTADO DISCRETO DE ENERGIA A OTRO.

ESTO SE PUEDE ESQUEMATIZAR REPRESENTANDO LOS NIVELES DE ENERGIA CON LINEAS HORIZONTALES. UNA EN CADA NIVEL DE ENERGIA PERMISIBLE.

INCREMENTANDO LA CANTIDAD DE ENERGIA DE ABAJO A ARRIBA. SI UN FOTON LLEGA SIN LA SUFICIENTE ENERGIA PARA MANDAR A EL ATOMO AL SIGUIENTE NIVEL DE ENERGIA, LA ENERGIA DEL FOTON ES ABSORBIDA Y CONVERTIDA EN CALOR.

POR OTRA PARTE, SUPONGASE QUE UN ATOMO ESTA EN SU NIVEL DE ENERGIA E_0 Y UN FOTON LLEGA CON UNA ENERGIA $E = E_1 - E_0$.

EL ATOMO ABSORBE AL FOTON, Y PASA A UN NIVEL DE ENERGIA MAYOR.

EL ATOMO NO PUEDE MANTENERSE EN ESTE ESTADO EXCITADO INDEFINIDAMENTE. ASI EVENTUALMENTE, REGRESA A SU ESTADO INICIAL E_0 , Y EN EL PROCESO EMITE UN NUEVO FOTON DE ENERGIA

$E_1 - E_0$.

VISTO A UN NIVEL MACROSCOPICO, ESTO APARACE COMO LA LUZ QUE FUE REFLEJADA DE UNA SUPERFICIE.



En general la interacción de la luz tiene consideraciones geométricas y consideraciones de color, estas últimas ya han sido revisadas brevemente y serán estudiadas con más detalle posteriormente.

2.3 MECANISMOS FUNDAMENTALES DE INTERACCION ENTRE LA LUZ Y LAS SUPERFICIES

Como ya se mencionó hay cuatro mecanismos fundamentales mediante los cuales la luz interactúa con las superficies (y medios). Estos son llamados modos de transporte de luz y son: Reflexión especular perfecta, reflexión difusa perfecta, Transmisión especular perfecta (o refracción especular perfecta) y Transmisión difusa perfecta.

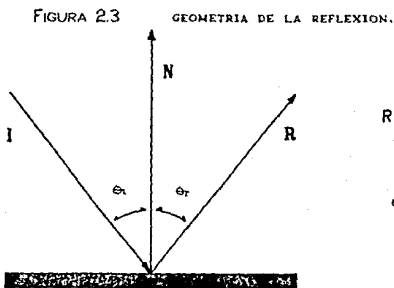
2.3.1 REFLEXION ESPECULAR PERFECTA

Este tipo de reflexión es la luz que rebota en la superficie de un objeto y que no está sujeta a la absorción y reemisión. Cabe hacer notar que no existen superficies con reflexión especular perfecta, pero este modelo ideal será muy útil, además este puede ser ajustado para la reflexión especular imperfecta que existe en el mundo real. Como un ejemplo, la mayoría de lo que vemos en un espejo es la reflexión especular de la luz que llega. Los destellos de una superficie brillante son también ejemplos de reflexión especular.

La luz que viene de las fuentes y toca la superficie de un objeto es rebotada. Para algunas superficies la luz que aparece como reflejada especularmente es débilmente afectada por la coloración de la superficie en cada rebote, pero para la mayoría de las

superficies el color no es alterado después de uno o dos rebotes.

En la figura 2.3 se muestra un fotón que llega a una superficie plana reflejante. El ángulo entre el vector normal a la superficie, llamado N , y la dirección del rayo incidente I , es el ángulo de incidencia θ_i . El ángulo entre el vector normal y el rayo reflejado R , es llamado el ángulo de reflexión θ_r . Ahora el problema es que dados N e I , se desea encontrar R .



$$R = \alpha I + \beta N$$

$$\theta_i = \theta_r$$

Hay dos leyes físicas que ayudan a encontrar una expresión para R . La primera es que el rayo incidente, el vector normal y el rayo reflejado son coplanares, así el rayo reflejado es combinación lineal del vector normal y el rayo incidente. El segundo principio es que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Se puede encontrar R de distintas formas (algebraica o geométrica). A continuación se dará una solución algebraica.

Expresando matemáticamente las dos leyes se tiene:

$$R = \alpha I + \beta N$$

$$\theta_i = \theta_r$$

de la figura 2.3 se tiene que $\cos(\theta_i) = -\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}$ y $\cos(\theta_r) = \mathbf{N} \cdot \mathbf{R}$

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) &= \cos(\theta_r) \\ -\mathbf{I} \cdot \mathbf{N} &= \mathbf{N} \cdot \mathbf{R} \\ &= \mathbf{N} \cdot (\alpha \mathbf{I} + \beta \mathbf{N}) \\ &= \alpha(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I}) + \beta(\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}) \quad \text{si } |\mathbf{N}| = 1 \\ &= \alpha(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I}) + \beta \end{aligned}$$

haciendo arbitrariamente $\alpha = 1$ se obtiene que $\beta = -2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})$

Así que la fórmula para la dirección del rayo reflejado especularmente es :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})\mathbf{N}$$

Si además añadimos que $|\mathbf{I}| = 1$, entonces $|\mathbf{R}| = 1$.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} \cdot \mathbf{R} &= (\alpha \mathbf{I} + \beta \mathbf{N}) \cdot (\alpha \mathbf{I} + \beta \mathbf{N}) \\ &= \alpha^2(\mathbf{I} \cdot \mathbf{I}) + 2\alpha\beta(\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}) + \beta^2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}) \\ &= \alpha^2 + 2\alpha\beta + \beta^2 \\ &= 1 + 2[-2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})](\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}) + [-2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})]^2 \\ &= 1 - 4(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})^2 + 4(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})^2 \\ &= 1 \end{aligned}$$

2.3.2 REFLEXION DIFUSA PERFECTA

La sencillez de la reflexión especular usualmente sólo funciona para superficies brillantes y lisas. Una superficie rugosa se comporta de manera distinta, las características de la luz reflejada no tienen la sencillez geométrica que tiene una superficie lisa.

Cuando la luz es reflejada especularmente es rebotada sobre la superficie del objeto. En cambio la luz reflejada difusamente interactúa con la superficie. Cuando un fotón es absorbido por un átomo de la superficie, el fotón puede ser convertido en calor o ser

eventualmente radiado. Si el fotón es radiado, no hay algo que determine en que dirección saldrá el nuevo fotón. Aunque un fotón dado irá sólo en una dirección, gran cantidad de fotones tenderán a ir en todas las direcciones posibles. Esto quiere decir que la luz reflejada difusamente es reflejada de la superficie en todas direcciones con igual intensidad.

La única geometría que hay que considerar es que porción de la superficie es visible a la fuente de luz. Esto se obtiene del ángulo entre el vector de luz incidente y el vector normal. La cantidad de luz que llega a la superficie es proporcional a el coseno de este ángulo.

Este es el modelo de reflexión Lambertiano de reflexión difusa perfecta, y por supuesto es un modelo idealizado al igual que la reflexión especular perfecta.

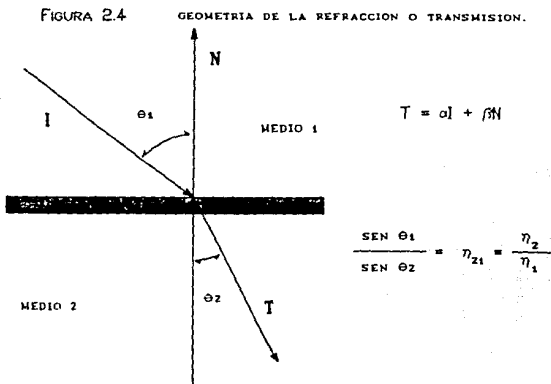
2.3.3 REFRACCION ESPECULAR PERFECTA

En un objeto transparente, la luz puede llegar desde atrás de la superficie del objeto y pasar a través de él contribuyendo a la luz que sale de este. Esta luz es llamada luz transmitida o refractada.

No es necesario que los medio de ambos lados del objeto sean el mismo. Por ejemplo, en un vaso con agua, la luz pasa del medio ambiente al vidrio, después del vidrio al agua, del agua al vidrio y de nuevo del vidrio al medio ambiente. Cada una de estas transiciones causa que la dirección del rayo cambia.

Para el adecuado manejo de la luz transmitida, es necesario manejar la desviación de la luz cuando ésta cruza la frontera entre dos medio. Es importante notar que cada medio tiene un índice de

refracción, el cual describe la velocidad de la luz en el medio comparada con la velocidad de la luz en el vacío. Para determinar como es desviada la luz cuando cambia de medio, se comparan los índices de refracción de los dos medios y el ángulo de la luz incidente.



En la figura 2.4, se tiene el rayo de luz incidente I, que llega a una superficie con normal N. El rayo incidente hace un ángulo θ_1 con el vector normal. El rayo de luz transmitida T hace un ángulo θ_2 (ángulo de refracción) con el vector normal reflejado. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado son todos coplanares. La ecuación que relaciona los ángulos de incidencia y refracción es la ley de Snell.

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} = n_{21} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

donde:

n_1 es el índice de refracción del medio 1 con respecto al vacío

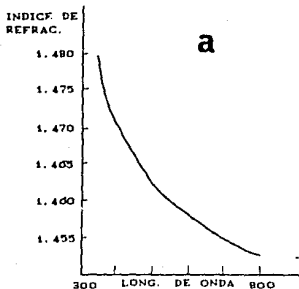
n_2 es el índice de refracción del medio 2 con respecto al vacío

n_{21} es el índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1

Una consideración importante es que el índice de refracción es dependiente de la longitud de onda de la luz que llega. Esto explica el porque un prisma separa la luz en un espectro.

En la figura 2.5.a. se muestra el índice de refracción como función de la longitud de onda para el cuarzo fundido. Algunos índices de refracción de materiales comunes son listados en la figura 2.5.b. Aunque estos valores son medidos con respecto al vacío son muy similares a los valores con respecto al aire.

FIGURA 2.5 INDICE DE REFRACCION.



INDICE DE REFRACCION DEL CUARZO FUNDIDO CON RESPECTO AL VACIO, EN FUNCION DE LA LONGITUD DE ONDA.

MEDIO	INDICE DE REFRACCION.
WATER	1.33
ETHYL ALCOHOL	1.36
CARBON BISULFIDE	1.63
AIR (1 ATM. 20° C)	1.0003
METHYLENE IODIDE	1.74
FUSED QUARTZ	1.46
GLASS, CROWN	1.52
GLASS, DENSE FLINT	1.66
SODIUM CHLORIDE	1.53

* MEDIDO CON RESPECTO AL VACIO.

b

2.3.3.1 REFLEXION INTERNA TOTAL

Un fenómeno del comportamiento de la luz en la frontera entre dos medios es la reflexión interna total (RIT). La RIT es un

fenómeno físico el cual ocurre cuando la luz intenta pasar de un medio denso a uno menos denso con un ángulo demasiado grande. El resultado es que la luz en vez de atravesar la frontera entre los medios, es reflejada especularmente en lugar de ser transmitida. Este efecto es el principio del funcionamiento de las fibras ópticas; estas mantienen la luz dentro del tubo de la fibra asegurándose que la RIT ocurra cuando la luz intente salir.

Se puede encontrar una fórmula matemática para encontrar el ángulo crítico a partir del cual ocurre la reflexión interna total. Pero para la Síntesis de Imagen sólo es necesario saber cuando ocurre la RIT, de tal forma que cuando se detecte la RIT sólo se deje a un lado la ecuación para la transmisión de la luz y en su lugar se utilice la dirección de la reflexión especular.

2.3.3.2 GEOMETRIA DE LA REFRACCION

La fórmula para la determinación de la dirección de la luz refractada se basa en dos leyes físicas. Al igual que el rayo de reflexión, el rayo refractado es coplanar con el vector normal y el rayo incidente. La otra ley es la ley de Snell.

A continuación se dará una solución algebraica para el rayo de la luz transmitida T :

$$\cos(\theta_t) = N \cdot -I \quad \cos(\theta_t) = -N \cdot T$$

De la ley de Snell e identidades trigonométricas tenemos:

$$\begin{aligned} \sin^2(\theta_t) n_{tt}^2 &= \sin^2(\theta_i) \\ (1 - \cos^2 \theta_t) n_{tt}^2 &= 1 - \cos^2 \theta_i \\ 1 - (1 - \cos^2 \theta_t) n_{tt}^2 &= \cos^2 \theta_i \\ &= (-N \cdot T)^2 \\ &= (-N \cdot (\alpha I + \beta ND))^2 \end{aligned}$$

$$= (\alpha(-N \cdot I) + \beta(-N \cdot N))^2$$

$$= (\alpha \cos \theta_i - \beta)^2$$

por otra parte se desea que T tenga magnitud 1, entonces:

$$1 = T \cdot T$$

$$= (\alpha I + \beta N) \cdot (\alpha I + \beta N)$$

$$= \alpha^2(I \cdot I) + 2\alpha\beta(I \cdot N) + \beta^2(N \cdot N)$$

$$1 = \alpha^2 + 2\alpha\beta(\cos \theta_i) + \beta^2$$

De las ecuaciones obtenidas :

$$1 - (1 - \cos \theta_i) \eta_{11}^2 = (\alpha \cos \theta_i - \beta)^2$$

$$1 = \alpha^2 - 2\alpha\beta \cos \theta_i + \beta^2$$

Resolviendo simultáneamente para α y β se tienen las cuatro soluciones siguientes:

$$\alpha_1 = \eta_{11} \quad \beta_1 = \eta_{11} \cos \theta_i - \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1)}$$

$$\alpha_2 = \eta_{11} \quad \beta_2 = \eta_{11} \cos \theta_i + \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1)}$$

$$\alpha_3 = -\eta_{11} \quad \beta_3 = -\eta_{11} \cos \theta_i + \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1)}$$

$$\alpha_4 = -\eta_{11} \quad \beta_4 = -\eta_{11} \cos \theta_i - \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1)}$$

La primer solución es la que se buscaba y las otras representan reflexiones de este vector en los otros cuadrantes formados por el vector normal y el tangente de la superficie.

Así la fórmula para T es:

$$T = \eta_{11} I + (\eta_{11} \cos \theta_i - \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1)}) N$$

Cuando la expresión bajo el radical sea negativa, será la señal que indique que la reflexión interna total está tomando lugar, y la luz no será transmitida a través de la frontera de los materiales.

2.3.4 TRANSMISION DIFUSA PERFECTA

Quando se dice que un medio tiene transmisión especular perfecta, se entiende que la luz pasa a través del medio sin interferencia alguna. Esto es una situación ideal que nunca sucede en la realidad, aún para cristales muy finos. Esto es porque un medio tiene muchas pequeñas partículas que interfieren con el viaje de los fotones. Un ejemplo de tal material es el plástico translucido; este material permite que la luz pase y adquiere el color de esta luz, pero no es posible ver claramente lo que está del otro lado del plástico.

Un medio transparente perfectamente difuso, dispersa la luz igualmente en todas direcciones cuando ésta pasa a través del medio, de la misma forma en que una superficie reflectiva perfectamente difusa, esparce la luz en todas direcciones cuando la luz es reflejada. Así, la intensidad de la luz transmitida difusamente es la misma en cualquier dirección.

Al igual que en el caso de la reflexión difusa, no hay consideraciones geométricas especiales que se deban tomar en cuenta para modelar la luz transmitida difusamente. La luz que llega de todas direcciones puede contribuir a la luz que saldrá en la dirección del rayo incidente. Esto es básicamente el coseno del ángulo formado entre el rayo incidente y el vector normal a la superficie del material, al igual que con la reflexión difusa.

2.3.5 CONSIDERACIONES GEOMETRICAS Y DE COLOR

En la explicación previa de los mecanismos para el transporte de luz, se enfocó sólo a la geometría en circunstancias idealizadas. La simplificación más importante que se hizo fue asumir que sólo hay

una dirección (R) hacia la cual la luz puede ser reflejada especularmente. Esto no es cierto en general. Si una superficie tiene cierta rugosidad, entonces la luz que llega a la superficie es reflejada especularmente en determinada proporción, aún para direcciones distintas de la dirección de reflexión especular perfecta, en la sección 2.3.7 será explicado más detalladamente.

También se ignoró cualquier coloración de la luz durante su interacción con la superficie.

Esto se puede ejemplificar si se observa un objeto de cobre iluminado por una luz blanca que está cerca del lugar donde se está observando. Los brillos que se ven en la superficie son más de color cobre que de color blanco.

Si se desea hacer imágenes de aspecto realista, es necesario manejar dos fenómenos: rugosidad de superficies y cambios de color. La situación ideal sería manejar ambos en un modelo sencillo. Así que, en vez de verlos separadamente y después tratar de reunir la información, se verán ambos dentro del contexto de un modelo de sombreado completo que realice todo el trabajo.

Hay unos puntos que es importante mencionar. El primero es que la naturaleza de la interacción entre la luz y la superficie es una función de la longitud de onda de la luz y el ángulo de incidencia con el cual se llega a la superficie. Segundo, la cantidad de color que se ve en un punto de la superficie puede ser influenciado por la posición desde donde se le ve. Este punto resulta muy familiar, pues al ver un espejo, lo que se vea dependerá de la posición en la que uno se encuentre. Así el mismo punto sobre un objeto puede reflejar distintos colores de luz en distintas direcciones.

La discusión de la luz reflejada y transmitida ha sido llevada

a los extremos; la reflexión y transmisión especular perfecta (de tipo espejo), y la reflexión y transmisión difusa perfecta. El área entre éstas no es simple, ahora se vera detenidamente como manejar la luz reflejada. El resultado será aplicable directamente a el estudio de la luz transmitida.

La distribución de la luz reflejada de superficies rugosas ha sido estudiada tanto con mediciones físicas como con modelos teóricos. El resultado ha sido considerar la luz reflejada como una combinación de componentes difusa y especular. Esto simplifica el estudio de la luz reflejada en el estudio de dos componentes.

2.3.6 REFLEXION DIFUSA $I_{dr}(\lambda)$

La descripción dada de la reflexión de la luz difusa es muy completa; el color de la luz absorbida y nuevamente radiada es sólo débilmente afectado, con un ángulo de incidencia de hasta 70° a partir de la normal. Y donde la misma cantidad de luz es radiada en todas direcciones, no dependiendo desde donde se este observando. Así la reflexión difusa es simplemente una cuestión de el color de la luz que llega, la curva de absorción de el objeto y el ángulo entre la normal y el vector de luz;

$$I_{dr}(\lambda) = I_j(\lambda) F_{dr}(\lambda) (N \cdot L)$$

donde $I_{dr}(\lambda)$ es la luz reflejada difusamente
 $I_j(\lambda)$ es el espectro de luz de la fuente j
 $F_{dr}(\lambda)$ es la curva de reflexión difusa del material
 N es el vector normal
 L es el vector de luz.

2.3.7 REFLEXION ESPECULAR $I_r(\lambda)$

Antes de hablar de la reflexión especular, uno se debe preguntar ¿Cómo pensar en reflexión especular de superficies rugosas?, si este tipo de reflexión se entiende en términos de reflectores perfectos (lisos). Lo que es posible hacer es que la superficie está compuesta de muchos diminutos reflectores poligonales llamados microfacetas.

Considérese la figura 2.6.a, la cual muestra una superficie rugosa, aquí la luz llega desde una dirección cercana a la normal principal (la normal principal será el vector normal de la superficie vista en forma macroscópica), en cuya dirección se localiza el observador. Siguiendo la trayectoria de la luz desde la fuente cuando ésta es reflejada especularmente de las microfacetas al observador. Lo que se observa es que la luz es reflejada de una microfaceta a otra varias veces. En cada rebote, la luz es débilmente coloreada por el material. Si el número de rebotes es sólo uno o dos este efecto es casi imperceptible. Pero la luz que viene de esta dirección puede rebotar entre las microfacetas muchas veces. Después de ciertos rebotes, el color de la luz es notoriamente afectado por el material. Así en esta dirección, el color de los brillos en la superficie es el color del objeto sujeto a la modificación del espectro de la luz incidente.

En la figura 2.6.b, la luz llega en un ángulo casi perpendicular a la normal principal de la superficie. Si la luz es rebotada hacia el observador, entonces puede tocar uno o dos microfacetas. De tal forma que la luz debe viajar en casi una línea recta, cualquier otra luz será bloqueada o redireccionada en el camino. Así con esta dirección el color de los brillos es el color

de la fuente de luz, y el color del objeto es irrelevante.

Estas observaciones se pueden resumir en el siguiente enunciado: El color y la intensidad de la luz reflejada especularmente que sale de un punto dado es dependiente de la dirección y color de la luz que llega al punto, el color del objeto y la distribución de las microfacetas en la superficie.

FIGURA 2.6

REFLEXION ESPECULAR EN SUPERFICIES FORMADAS POR MICROFACETAS

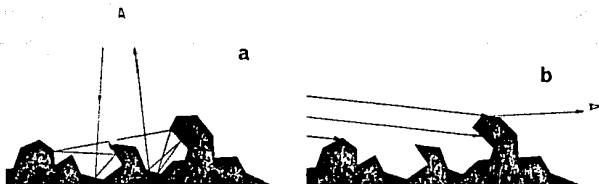
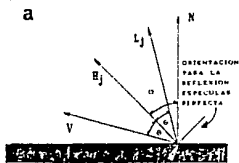
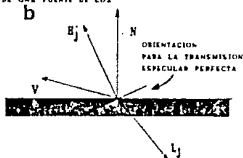


FIGURA 2.7

GEOMETRIA DE LA REFLEXION ESPECULAR
DE UNA FUENTE DE LUZ



GEOMETRIA DE LA TRANSMISION ESPECULAR
DE UNA FUENTE DE LUZ



El modelo de microfacetas es un modelo teórico, y es descrito por distintas ecuaciones. Varios investigadores han encontrado ecuaciones que hacen un buen trabajo en la descripción del mundo real, de las cuales se estudiará su significado.

La figura 2.7 muestra un esquema típico. Una superficie es iluminada y se desea saber cuanta luz es reflejada a el observador. El punto en la superficie es P . El vector en la dirección del observador desde P es indicado por V . La normal en P es N . El vector apuntando hacia la fuente de luz (J) desde P es L_j . Se tiene también el vector bisector de V y L_j , llamado H_j . El ángulo entre V y H_j es θ y el ángulo entre H_j y N es α (todos los vectores se asume que están normalizados).

Recordado que la reflexión especular perfecta ocurre cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Este será el caso para las microfacetas con normal paralela a H_j .

Así la luz que viene de la fuente (es decir, del vector L_j) puede ser reflejada especularmente a el observador (el vector V), si esta llega a una microfaceta con normal H_j .

La expresión para $I_{sr}(\lambda)$ es compleja, porque aquí se deben considerar efectos que dependen del material y la geometría del espacio de observación. $I_{sr}(\lambda)$ dice como se colorea la luz incidente por el material antes de ser reflejada especularmente, reduciendo la intensidad de la luz en cada longitud de onda por una cantidad dependiente de la longitud de onda y el ángulo de incidencia. Así $I_{sr}(\lambda)$ proporciona la curva de reflectancia de un material, dada la luz incidente y un ángulo de incidencia.

La luz especular $I_{sr}(\lambda)$ es:

$$I_{sr}(\lambda) = \frac{F(\lambda, \theta) D(\alpha) G(N, V, L)}{n (N \cdot L) (N \cdot V)}$$

donde

- $I_{sr}(\lambda)$ es la luz reflejada especularmente
 $F(\lambda, \theta)$ describe la reflexión para una longitud de onda (λ) y ángulo de incidencia θ
 $G(N, V, L)$ describe la orientación de las microfacetas
 $D(\alpha)$ describe cuantas microfacetas están orientadas en la dirección H
 N es el vector normal
 V es el vector del observador
 L es el vector de luz.

2.3.7.1 EL TERMINO G DE ATENUACION GEOMETRICA

La geometría de la superficie para superficies rugosas introduce condiciones adicionales donde parte de la superficie produce sombra o cubre otras partes de la superficie. La función de atenuación geométrica G , describe la fracción de microfacetas orientadas para reflejar la luz de la fuente al observador, las cuales son visibles tanto a la fuente como al observador. Torrance y Sparrow (1967) investigaron este fenómeno y formularon una expresión para G asumiendo que:

- Cada faceta forma un lado de una cavidad simétrica en forma de V .
- El eje longitudinal de la cavidad es paralelo a la tangente principal de la superficie.

- Los vértices más altos están en el mismo plano.
- Las cavidades no tienen una orientación preferente.

La función de atenuación resultante es:

$$G = \min \left(1, \frac{2(N \cdot H) (N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H) (N \cdot L)}{(V \cdot H)} \right)$$

Esta función es independiente de la rugosidad de la superficie, exhibiendo discontinuidades y es asimétrica, centrada alrededor de la dirección de reflexión especular. Estas propiedades son resultado de la geometría de la superficie definida por las suposiciones hechas.

La rugosidad de una superficie está descrita por una función $\zeta(x,y)$, que da la variación hacia arriba o abajo de la superficie principal en cualquier posición (x,y) de la superficie. El valor medio de esta función de rugosidad ($\langle \zeta(x,y) \rangle$), es la variación promedio de la superficie.

La elevación rms (root mean square) σ , describe la variación promedio de elevación sobre la superficie principal, y está definida por:

$$\sigma = \langle \zeta^2(x,y) \rangle^{1/2} = \left[\iint \zeta^2(x,y) dx dy \right]^{1/2}$$

La distancia promedio entre una cresta local y un valle local en la superficie es llamada la distancia de correlación τ . La inclinación promedio de la superficie m , es usada para caracterizar una superficie. Una aproximación sencilla de la inclinación promedio, es utilizando la diferencia de la elevación entre la cresta y el valle, 2σ , y la distancia de correlación τ , expresando la inclinación por: $m = (2\sigma) / \tau$.

Para una superficie con rugosidad aleatoria y $z(x,y)$ dada por una distribución Gaussiana, se tiene una aproximación más rigurosa dando m por:

$$\bar{m} = \sigma \sqrt{2} / \tau .$$

Para definir cual relación de m con σ y τ es correcta es cuestión de contexto. La relación de m es más bien conveniencia notacional, mientras que la relación \bar{m} es el resultado de un análisis estadístico más riguroso.

2.3.7.2 EL TERMINO D DE DISTRIBUCION DE MICROFACETAS

La función D de distribución de la inclinación de las microfacetas, representa la fracción de las microfacetas que están orientadas en la dirección H . Algunas de las funciones de distribución de la inclinación de las microfacetas han sido consideradas por Blinn. Una de estas formulaciones es el modelo Gaussiano: $D = c e^{-\alpha/m^2}$. Donde c es una constante arbitraria.

Además de los mencionados por Blinn, otros modelos de distribución han sido desarrollados. Davies describió la distribución espacial de la radiación electromagnética reflejada de superficies rugosas hechas de un conductor eléctrico perfecto. Bennett y Porteus extendieron los resultados a metales reales y Torrance y Sparrow mostraron que también era aplicable a no metales. Beckmann desarrolló una amplia teoría que sirve para todos estos materiales y es aplicable a un amplio rango de condiciones de superficies, variando desde lisas hasta muy rugosas. Para superficies rugosas, la función de distribución de Beckmann es :

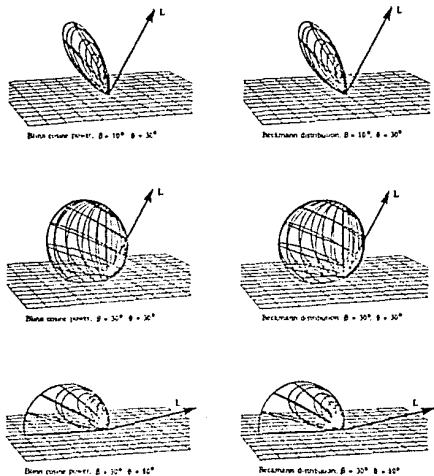
$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \alpha} e^{-(\tan \alpha / m)^2}$$

Esta distribución es similar en su forma a las mencionadas por Blinn. La ventaja de la distribución de Beckmann es que da la magnitud absoluta de la reflectancia sin introducir constantes arbitrarias. Figura 2.8.

En todas las funciones de distribución de la inclinación de las microfacetas, la tendencia de la componente especular depende de la inclinación promedio m . Valores pequeños de m significan una inclinación suave y dan una distribución que es altamente direccionada alrededor de la dirección especular.

Valores grandes de m , implican una inclinación empinada de las microfacetas dando una distribución que es más extendida.

FIGURA 2.8 FUNCIONES DE DISTRIBUCION DE MICROFACETAS



Algunas superficies tienen dos o más escalas de rugosidad, o inclinación m , y pueden ser modeladas usando dos o más funciones de distribución. En tales casos, D es expresada como la suma de las funciones de distribución con sus constantes de peso respectivas, cada una con un valor diferente de m ;

$$D = \sum_j w_j D(m_j) \quad \text{con} \quad \sum_j w_j = 1$$

donde m_j es la inclinación promedio de la j -ésima distribución y w_j es el peso asociado a la j -ésima distribución.

2.3.7.3 EL TERMINO F DE REFLECTANCIA DE FRESNEL

La reflectancia F puede ser obtenida teóricamente de la ecuación de Fresnel. Esta ecuación expresa la reflectancia, de una superficie de espejo perfectamente lisa, en términos de el índice de refracción (n_λ) y el coeficiente de absorción (k_λ) de la superficie y el ángulo de iluminación (θ). En general tanto η como k varían con la longitud de onda, pero sus valores son frecuentemente desconocidos. Por otra parte, valores de la reflectancia en incidencia normal, medidos experimentalmente son frecuentemente conocidos.

Para obtener la variación espectral y angular de F , se adopta una convención práctica. Si η y k son conocidos, se utiliza la ecuación de Fresnel. En otro caso, Si la reflectancia normal es conocida, se adopta la ecuación de Fresnel a la reflectancia normal medida para una superficie pulida. Para no metales, para los cuales $k = 0$, esto da inmediatamente una estimación para el índice de refracción η . Para los metales, en los que k es generalmente distinto de cero, se da un valor de cero a k y obtenemos un valor

aproximado para η de la reflectancia normal. La dependencia angular de F es entonces disponible de la ecuación de Fresnel. El procedimiento descrito da el valor correcto de F para la incidencia normal y una buena estimación de su dependencia angular, la cual no depende significativamente de el coeficiente de absorción k .

Para ilustrar este procedimiento, se tiene la ecuación de Fresnel para luz incidente no polarizada y $k = 0$ es:

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left[1 + \frac{[c(g+c) - 1]^2}{[c(g-c) + 1]^2} \right]$$

donde $c = \cos(\theta) = V \cdot H$ $g^2 = \eta^2 + c^2 - 1$.

En la incidencia normal $\theta = 0$; así que; $c = 1$, $g = \eta$

$$y \quad F_0 = \left[\frac{\eta - 1}{\eta + 1} \right]^2$$

resolviendo para η se tiene la ecuación;

$$\eta = \frac{1 + \sqrt{F_0}}{1 - \sqrt{F_0}}$$

Los valores de η determinados de esta forma son substituidos en la ecuación original de Fresnel, para obtener la reflectancia F en otros ángulos de incidencia. El procedimiento puede ser repetido en otras longitudes de onda obteniendo la dependencia espectral y direccional de la reflectancia.

La dependencia de la reflectancia sobre la longitud de onda y el ángulo de incidencia implica que el color de la luz reflejada cambia con ángulo de incidencia. Cuando el ángulo de incidencia se aproxima a $\pi/2$, el color de la luz reflejada se aproxima al color de la fuente de luz (que es cuando la reflectancia F se aproxima a la unidad).

El cálculo del cambio de color, es computacionalmente costoso, así que esto puede ser simplificado de dos formas: creando una tabla de búsqueda o usando la siguiente aproximación.

Los valores de F son calculados primero para una valor de η correspondiente al promedio de reflectancia normal. Estos valores son entonces usados para interporlar entre el color de el material en $\theta = 0$ y en el color en $\theta = \pi/2$, correspondiente a el color de la fuente de luz, porque $F_{\pi/2} = 1$ para cualquier longitud de onda.

Así finalmente la fórmula para estimar la intensidad en la longitud de onda λ y ángulo de incidencia θ , es:

$$\begin{aligned}
 C_{\theta}(\lambda) &= C_0(\lambda) + [C_{\pi/2}(\lambda) - C_0(\lambda)] \frac{\text{Max} \{ 0, F_{\theta}(\lambda) - F_0(\lambda) \}}{F_{\pi/2}(\lambda) - F_0(\lambda)} \\
 &= F_0(\lambda)I_{ij}(\lambda) + [I_{ij}(\lambda) - F_0(\lambda)I_{ij}(\lambda)] \frac{\text{Max} \{ 0, F_{\theta}(\lambda) - F_0(\lambda) \}}{F_{\pi/2}(\lambda) - F_0(\lambda)} \\
 C_{\theta}(\lambda) &= I_{ij}(\lambda) \left\{ F_0(\lambda) + [1 - F_0(\lambda)] \frac{\text{Max} \{ 0, F_{\theta}(\lambda) - F_0(\lambda) \}}{F_{\pi/2}(\lambda) - F_0(\lambda)} \right\}
 \end{aligned}$$

Así tenemos una expresión para $C_{\theta}(\lambda)$ en términos de la luz incidente $I_{ij}(\lambda)$, la curva de reflectancia en $\theta=0$, $F_0(\lambda)$, y la función de reflectancia de Fresnel en θ , $F_{\theta}(\lambda)$. El valor final asociado a $C_{\theta}(\lambda)$ es el valor usado por F en el modelo de reflexión especular.

CAPITULO III

MODELOS DE ILUMINACION

3.1 IMPORTANCIA DE LOS MODELOS DE ILUMINACION

Dentro de la Síntesis de Imagen es importante tener una formulación matemática que describa el comportamiento natural de la luz en un medio. A ésta formulación se le llamará Modelo de Iluminación. Este modelo tomará las características físicas de los objetos, las fuentes de luz y las leyes de transmisión e interacción de la luz con el medio y asignará un valor de intensidad a cada punto en la escena en base a lo anterior.

Si no se utilizara un modelo de iluminación por simple que éste fuera, al intentar desplegar una esfera que ha sido modelada mediante polígonos y a la cual se le asignó un color; después de eliminar los polígonos ocultos y colorear todos los polígonos visibles con el color definido para la esfera, lo que obtenemos es ; un círculo !. Esto es debido a que nuestra percepción de la tridimensionalidad de un objeto esta grandemente relacionada con la reflexión de la luz. En el caso de la esfera, cada punto sobre la superficie refleja la luz en forma distinta y al no existir un modelo de iluminación, lo que percibimos es una imagen que no nos proporciona la sensación de volumen.

Por la enorme complejidad del comportamiento de la transmisión de la luz en un medio, los modelos existentes sólo describen de manera simplificada algunos fenómenos de la luz, sin dar una solución completamente satisfactoria a estos.

Para la Síntesis de Imagen, no es necesario contar con un modelo de iluminación que describa exactamente el comportamiento de

la luz, por lo que en su lugar se desarrollan modelos que aproximen la realidad que percibimos y que proporcionen la sensación de realidad. Para desarrollar estos modelos hay que mantener un equilibrio entre el realismo que proporcionan y su costo computacional, aunque con el actual desarrollo del hardware se están dejando a un lado estas consideraciones y por lo mismo se emplean modelos cada vez más complejos que proporcionan imágenes difícilmente distinguibles de objetos reales.

3.2 CLASIFICACION DE LOS MODELOS DE ILUMINACION

Los modelos de iluminación usados actualmente caen dentro de tres clasificaciones generales: los modelos empíricos, los transicionales y los analíticos. Las técnicas de sombreado con las que se hace el recubrimiento de la imagen son divididas en cuatro clasificaciones: incrementales, Ray Tracing, Radiosidad y una técnica híbrida que combina las técnicas de Ray Tracing y Radiosidad, esta clasificación es mostrada en la tabla 3.1, en donde se ubican los principales Modelos de Iluminación.

En un principio los modelos de iluminación fueron empíricos en su naturaleza. La forma en que manejaban la interacción de la luz con las superficies era demasiado simplificada como para obtener un resultado satisfactorio. Además, estos modelos eran evaluados después de que el algoritmo de superficies visibles había transformado la geometría del espacio del objeto dentro de el espacio de la imagen. En estos modelos, las mismas técnicas usadas para la determinación de las superficies visibles que utilizan el algoritmo de Scan-Line fueron empleadas para calcular la iluminación. Es por ello que estos modelos y técnicas de aplicación

TABLA 3.1 CLASIFICACION DE LOS MODELOS DE ILUMINACION

TECNICA	REFERENCIA	CONTRIBUCIONES A LA ILUMINACION
	BOUKNOHT 1970	COLOR CONSTANTE A TRAVES DE POLIGONOS.
SCANLINE	WARNOCK 1969 ROMNEY 1970	ATENUACION CON LA DISTANCIA BRILLOS PRIMITIVOS.
GEOMETRIA PERSPECTIVA EN EL ESPACIO DE LA IMAGEN	GOURAUD 1971 NEVELL 1972 PHONG 1975 BUFF 1976 BISHOP-WEIMER 1986	INTERPOLACION DE COLOR A TRAVES DE POLIGONOS. PSEUDO TRANSPARENCIA. INTERPOLACION NORMAL A TRAVES POLIGONOS, BRILLOS MAS REFINADOS.
	CATHULL 1975 BLINK-NEVELL 1976	MAPEO DE TEXTURA MAPEO DE REFLECCIONES
RAY TRACING	BLINK 1977	REFLECCION INCOHERENTE
GEOMETRIA EUCLIDEANA ESPACIO DEL OBJETO	KAY-GREENBERG 1977 WHITTED 1980 HALL-GREENBERG COOK 1984 AMANATIDES 1984 KAJIYA 1986	ATENUACION CON LA DISTANCIA Y REFRACCION EN MATERIALES TRANSPARENTES REFLEXION Y REFRAC. RECURSIVAS TRANSMISION INCOHERENTE MUESTREO DISTRIBUIDO MUESTREO DE AREA EQUILIBRIO DE ENERGIA EN RAY T.
	COOK-TORRANCE 1984 GORAL 1984	CARACTER ESPECTRAL DE BRILLOS. FORMULACION DE ENERGIA EQUILIBRIO DE ENERGIA DIFUSA
RADIOSIDAD	COHEN-GREENBERG NISHITA-NAKAMAE 1986	ESCENAS DIFUSAS COMPLEJAS, INCLUSION SOMBRA
MODELOS DE	INMEL-GREENBERG 1986	BRILLOS ESPECULARES EN SOLUCIONES DE RADIOSIDAD.
EQUILIBRIO DE ENERGIA	MAX 1986 RUSHMEIER-TORRANCE NISHITA-NAKAMAE 1987	EFFECTOS ATMOSFERICOS

tuvieron un desarrollo paralelo a los algoritmos de Scan-Line.

Los modelos transicionales a diferencia de los empíricos, se basan en los trabajos realizados en física y óptica, para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas.

El mapeo de texturas, mapeo de reflexiones y el Ray Tracing recursivo demuestran un avance en el color, sombras y detalles de la imagen, obtenidos con estos modelos. Los modelos transicionales requieren del uso de la geometría Euclidea (en el espacio del objeto) para ser evaluados y posteriormente realizan la transformación de proyección al espacio de la imagen. Así que con los modelos transicionales las reflexiones, refracciones y sombras son geoméricamente correctas. Inicialmente el Ray Tracing fué restringido a superficies reflectivas lisas. El Cone Tracing y Ray

Tracing Distribuido intentan extender la metodología para incluir medio difusos.

La clasificación analítica hace que los modelos de iluminación apliquen las técnicas de equilibrio de energía para la generación de imágenes. Los modelos que caen dentro de esta clasificación, además de mantener la verdadera geometría de los objetos, debe modelar la distribución de la luz a través de todo el medio, proporcionando la información que se requiere para evaluar el modelo de iluminación. Inicialmente las técnicas de radiosidad fueron restringidas a superficies reflectivas idealmente difusas. La introducción de efectos especulares con métodos de radiosidad se dió con el modelo de Immel (1986).

La clasificación híbrida integra las técnicas de Ray Tracing y Radiosidad para manejar efectos difusos y especulares, utilizando cada una de las técnicas para modelar la componente de la iluminación para la cual funcionan mejor. Así el Ray Tracing maneja la componente especular y Radiosidad maneja la componente difusa.

Existen dos técnicas para aplicar los modelos de iluminación en la generación de imágenes. Una técnica empieza en el observador y considera las superficies que son visibles. Para las superficies que son visibles se debe responder la pregunta: ¿Qué información es requerida para evaluar el color de esta superficie?. La información requerida dicta que las otras superficies deben ser consideradas, y la pregunta es repetida para estas superficies.

Este proceso continua recursivamente hasta que es satisfecho un cierto criterio, para el cual no es necesaria información adicional. Un ejemplo de esto es "Ray Tracing".

La otra técnica empieza en las fuentes de luz y traza la energía de la luz cuando esta se mueve a través del medio. Cada superficie es revisada relativa a las fuentes de luz y emisores de luz en la escena. La pregunta que se hace es: ¿Cómo es reflejada o transmitida esta luz por esta superficie?. Cada superficie iluminada se convierte entonces en un emisor de luz. Cada superficie es revisada otra vez, y el proceso continua recursivamente hasta que el equilibrio es alcanzado. Un ejemplo de esta aproximación es Radiosidad ("Radiosity").

La primer técnica prepara un mapeo de la luz moviéndose a través de la escena, formada por las superficies visibles para el observador, el cual es dependiente de la posición del observador. Así un nuevo mapeo es creado para cada nueva posición del observador. El segundo método prepara un mapeo independiente del observador, de la luz moviéndose a través de la escena formada por las fuentes de luz y todas las superficies. Para revisar con más detalle las técnicas considérese la formación de la imagen de una escena simple consistente de una fuente de luz y cada objeto en la escena formado por segmentos regulares de superficies (patches)

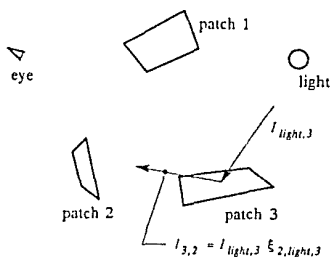


FIGURA 3.1 ESCENA FORMADA POR PATCHS.

suspendidos en el espacio (Figura 3.1). Supóngase que para cada "patch" en el medio se puede generar un coeficiente el cual relaciona la intensidad reflejada o transmitida a un "patch" destino con la intensidad recibida de un "patch" fuente. $\xi_{destino,fuente,activo}$. Se usará la notación $I_{fuente,destino}$ para denotar la intensidad de una fuente hacia un destino.

El tamaño y tipo de superficie del "patch" usado en el cálculo del coeficiente ξ afecta la utilidad del coeficiente. Para superficies difusas ideales, cualquier energía que llegue es reflejada igualmente en todas direcciones. De tal forma que el hemisferio completo sobre la superficie contribuye a la intensidad de la superficie, haciendo el valor de ξ significativo para patches relativamente grandes, debido a la naturaleza de la interacción.

Las superficies lisas reflejan y refractan de forma muy direccional. Por lo tanto, los "patches" considerados degeneran en un punto y ξ relaciona la intensidad que sale de un punto en una sola dirección desde un punto en la dirección de la reflexión o refracción especular. Así que, muchos pequeños "patches" son requeridos para modelar la interacción exacta.

3.3 MODELOS DE ILUMINACION EN BASE AL OBSERVADOR

Las técnicas que empiezan el cálculo de la iluminación en el observador son intrínsecas a la graficación por computadora.

Los cálculos de la visibilidad son hechos desde donde se observa la escena (coordenadas de observación) y las superficies que deben ser sombreadas son identificadas por el cálculo de la visibilidad. Este tipo de técnicas se utiliza tanto en los algoritmos incrementales y "Ray Tracing".

La expresión de iluminación es aplicada a las superficies visibles. Considerando la escena de la figura 3.1, si un punto en el "patch" 3 es visible, la expresión de iluminación (modelo de iluminación) es aplicado. La primer pregunta es: ¿Qué información es requerida para evaluar el modelo en este punto?

Las técnicas de formación de la imagen (rendering) más antiguas, asumen que las superficies son difusas ideales y que son iluminadas únicamente por fuentes de luz. Se extrae información de las fuentes de luz y el modelo de iluminación es evaluado. El resto de la escena se asume que está iluminada con una luz ambiental constante en toda la escena. Esta técnica funciona muy bien para objetos aislados suspendidos en el espacio e iluminados por el sol.

Los modelos de iluminación siguientes incluyeron superficies lisas con brillo, aunque sólo eran consideradas fuentes de luz primarias, los brillos de las superficies eran siempre del color de la fuente de luz. Estos modelos daban una apariencia plástica a las imágenes, debido a el color de los brillos. La naturaleza direccional de la iluminación significó que la información global fueran menos importante en la evaluación del modelo de iluminación.

La extensión inmediata de la técnica fué el revisar la intensidad que llega a la superficie de la dirección de reflexión, e integrarla al modelo de iluminación. Una técnica llamada mapeo de reflexiones fué utilizada primero por Blinn y Newell para determinar intensidades desde cualquier dirección. Esta técnica usa una proyección de la escena alrededor del objeto reflector. Un problema con esta técnica es que todos los rayos reflejados en la misma dirección reflejan el mismo punto en el mapeo, sin tomar en cuenta la posición de inicio del rayo. De esta forma, los espejos planos

tienden a reflejar un solo color. El Ray Tracing elimina las distorsiones geométricas del mapeo de reflexiones, realizando la determinación de la visibilidad para cada rayo reflejado. Esto preserva las relaciones geométricas. La superficie que es vista por el rayo reflejado, requiere de la evaluación del modelo de iluminación. Si esta superficie es reflectiva entonces la información de la dirección de la reflexión es requerida. Este proceso continua recursivamente hasta alguna profundidad máxima o hasta que algún criterio de corte es alcanzado.

La metodología de "Ray Tracing" es extendida a objetos transparentes, preguntando por la luz recibida en la dirección refractada, e incluyendo este término en el modelo de iluminación.

El "Ray Tracing" fué originalmente limitado a escenas sencillas, por el cálculo requerido para resolver el problema de intersección entre rayos y objetos, y a escenas altamente reflectivas debido a las limitaciones del modelo de iluminación. Los avances en los algoritmos y la velocidad de cálculo, han hecho al "Ray Tracing" posible para escenas complejas, aunque el manejo de escenas difusas es un problema más serio.

Considérese nuevamente la escena de la figura 3.1 como una escena difusa. Cuando el "patch" 3 es visible, el color es calculado utilizando el modelo de iluminación. Para proporcionar una adecuada información para el modelo de iluminación, las contribuciones de todas las otras superficies en la escena deben ser conocidas. Así la primera aproximación es expresada por:

$$I_{obs,3} = \xi_{obs,luz,3} I_{luz,3} + \xi_{obs,1,3} I_{1,3} + \xi_{obs,2,3} I_{2,3}$$

La intensidad de la fuente de luz es la única cantidad conocida para la primera aproximación; así que $I_{1,3}$ e $I_{2,3}$ se toman ya sea como 0 o como algún valor ambiental global.

Esta primera aproximación sólo toma en cuenta la fuente de luz y la iluminación ambiental global. Lo cual corresponde al modelo original utilizado en la graficación por computadora.

En la segunda aproximación $I_{1,3}$ e $I_{2,3}$ son expandidas:

$$I_{1,3} = \xi_{3,luz,1} I_{luz,1} + \xi_{3,2,1} I_{2,1} + \xi_{3,3,1} I_{3,1}$$

$$I_{2,3} = \xi_{3,luz,2} I_{luz,2} + \xi_{3,1,2} I_{1,2} + \xi_{3,3,2} I_{3,2}$$

Usando una aproximación de la iluminación ambiental global de 0 y sustituyendo tenemos, la segunda aproximación:

$$I_{obs,3} = \xi_{obs,luz,3} I_{luz,3} + \xi_{obs,1,3} \xi_{3,luz,1} I_{luz,1} + \xi_{obs,2,3} \xi_{3,luz,2} I_{luz,2}$$

Esta segunda aproximación considera reflexiones sencillas y dobles de luz antes de llegar al observador.

Esto da una idea de que si la escena es compleja, el cálculo para un solo pixel se vuelve agobiante. Además, muchos de los cálculos son repetidos para el siguiente pixel, y son requeridos n^3 coeficientes de ξ , donde n es el número de "patches".

El siguiente avance en "Ray Tracing" vino con la selección más cuidadosa del conjunto de rayos usados para un muestreo representativo de la escena. El "Cone Tracing" y el "Ray Tracing distribuido" fueron dos métodos para muestrear selectivamente una escena. El "Ray Tracing distribuido" tiene otros beneficios incluyendo el manejo de profundidad de campo, penumbra y el efecto borroso provocado por los objetos en movimiento ("motion blur").

3.4 MODELOS DE ILUMINACION BASADOS EN LAS FUENTES DE LUZ

Las técnicas de sombreado que empiezan el cálculo de la iluminación en la fuente de luz, son más bien independientes del proceso de generación de la imagen. Los cálculos son realizados aún para superficies que no son visibles, lo cual puede parecer ineficiente. Sin embargo, si las superficies difusas son correctamente iluminadas, la complejidad del problema de iluminación que comienza en la luz es todavía razonable. Además, si distintas imágenes de la misma escena son hechas, los cálculos de la iluminación empezando desde la luz, necesitan ser realizados sólo una vez.

Una escena difusa ideal simplifica significativamente los cálculos. Para superficies difusas idealmente, la intensidad saliendo de cualquier superficie es independiente de la dirección. Así, el término $\xi_{\text{fuente,destino}}$ relaciona la intensidad radiada en cualquier dirección del "patch" activo a la intensidad recibida de la fuente. Esto requiere n^2 coeficientes, donde n es el número de "patches" en la escena.

El medio difuso es resuelto recursivamente, preguntando por la intensidad de los "patches" en la escena. Examinando la escena de la figura 3.1, ésta es caracterizada por:

$$\begin{aligned} I_1 &= \xi_{1,2,1} I_{1,2} + \xi_{2,1} I_2 + \xi_{3,1} I_3 \\ I_2 &= \xi_{1,2,2} I_{1,2} + \xi_{1,2} I_1 + \xi_{3,2} I_3 \\ I_3 &= \xi_{1,2,3} I_{1,2} + \xi_{1,3} I_1 + \xi_{2,3} I_2 \end{aligned}$$

La primer iteración proporciona la iluminación de la fuente de luz únicamente. Las intensidades de los "patches" es 0 al principio de la primer iteración. La segunda iteración incluye el primer

rebote de luz en las superficies. La energía total que sale de un superficie es siempre menor que la energía incidente en la superficie. La rápida convergencia es garantizada debido a esta restricción física en la validez de los coeficientes ρ .

El conjunto de ecuaciones para el caso difuso ideal es resuelto iterativamente, o resolviendo directamente el sistema de ecuaciones donde se tiene el mismo número de ecuaciones y de incógnitas. Cualquiera de las técnicas numéricas estándares, tales como eliminación Gaussiana, iteración de Gauss-Jordan e iteración de Gauss-Seidel son posibilidades para resolver el conjunto de ecuaciones. Se puede ver que para escenas difusas sencillas con pocos "patches", la técnica de empezar desde la luz no es prohibitiva computacionalmente.

Esta técnica, es conocida como Radiosidad y es usada rutinariamente en el cálculo de transferencia de radiación y calor. Y sólo recientemente fué introducida a la graficación por computadora.

Para medios no difusos, tanto los coeficientes ρ como las intensidades son direccionales. Esto agrega gran complejidad al conjunto de ecuaciones. La direccionalidad de los términos de la intensidad reflejada significan que hay n^2 ecuaciones con n^2 incógnitas. Además, se requiere utilizar "patches" pequeños para modelar materiales más reflectivos.

Las técnicas que combinan métodos introducen ventajas, ya que es posible manejar escenas con superficies especulares y difusas de forma consistente al utilizar el método más adecuado dependiendo del tipo de superficie. Las técnicas combinadas fueron introducidas recientemente (1987, Wallace), y su exploración apenas comienza. Los

resultados han sido muy impresionantes y estas técnicas son área fértil para la investigación futura.

3.5 MODELOS DE ILUMINACION EMPIRICOS

Los modelos de iluminación originalmente desarrollados con sistemas de Scan-Line para la determinación de las superficies visibles también utilizan la técnica de actualizar la información en forma creciente a lo largo del scan-line. El punto importante de esta técnica es actualizar incrementalmente la información de la iluminación en una cantidad mínima del scan-line o pixel previo, en vez de repetir el cálculo completo del modelo de iluminación.

Los algoritmos de superficies visibles usados, realizan un mapeo inicial del espacio del objeto dentro del espacio de la imagen. Todos los cálculos subsecuentes de visibilidad y sombreado, se realizan en el espacio de la imagen.

La transformación de la proyección no es una transformación lineal, así que, la geometría del espacio de la imagen es distorsionada respecto a la geometría del espacio del objeto. Esta distorsión simplifica cálculos en la determinación de visibilidad, pero tiene efectos adversos para la iluminación.

La tarea de determinar la visibilidad es lo principal y sólo un poco de cálculo es dedicado a la iluminación de la imagen. Esto lleva a que las suposiciones de iluminación, tales como la existencia de una sola fuente de luz a una distancia infinita, algunas veces en la dirección del observador, reduzcan la complejidad de la geometría de la iluminación. Los modelos de iluminación usados por aplicaciones de Scan-Line son casos particulares de un modelo de la forma:

$I(\lambda) = f(d) \text{ (ambiental + difusa + especular)}$

$$I(\lambda) = f(d) \left\{ k_a(\lambda) I_a(\lambda) + k_d(\lambda) \sum_{n=1}^{11} (N_n \cdot L_n) I_n(\lambda) + k_s(\lambda) \sum_{n=1}^{11} f(V, L_n, \zeta) I_n(\lambda) \right\}$$

La iluminación es dividida en tres componentes: ambiental, difusa y especular. Las componentes ambiental y difusa son tomadas de superficies difusas idealmente. La intensidad reflejada para estas componentes es igual en todas direcciones. El término especular es un término direccional, donde $f(V, L_n, \zeta)$ es una función de reflexión direccional. Esto produce brillos que son relacionados a la geometría de V, L, N y a la función de rugosidad ζ de la superficie. En esta expresión, $f(d)$ es una atenuación en función de la distancia d , entre el observador y la superficie iluminada.

Las técnicas de sombreado son dependientes del observador y el modelo requiere solamente de información específica de iluminación de las fuentes de luz. Las fuentes de luz son consideradas las únicas formas de iluminación significativas requiriendo un cálculo especial. Cualquier otra información de iluminación global, es agrupada dentro de la iluminación ambiental, $I_a(\lambda)$ la cual es un nivel de luz constante no direccional existente dentro de la escena.

3.5.1 MODELO DE BOUKNIGHT

El modelo descrito por Bouknight (1970), es representativo de los primeros modelos de iluminación. Este modelo usa sólo los términos ambiental y difuso, sin atenuación por la distancia, y una fuente de luz colocada a una distancia infinita en la dirección del observador. La intensidad ambiental e intensidad de la fuente de luz

son implícitas en el modelo. El modelo fué originalmente usado para escala de grises únicamente y está dado por:

$$I = k_a + k_d (N \cdot L) \quad (k_a + k_d) < 1.0$$

Nótese que si $L = (0,0,1)$ cuando la luz está a una distancia infinita en la dirección del observador. La expresión se reduce a:

$$I = k_a + k_d N_z$$

La normal usada es la normal en el espacio del objeto. El modelo es evaluado una vez por polígono (en estas técnicas los objetos estaban definidos generalmente por polígonos) y el área visible del polígono es cubierta con el color obtenido por el modelo de iluminación. A lo largo del scan-line (sobre el dispositivo raster), el color del pixel cambia si la visibilidad cambia, de otra manera el pixel actual es del mismo color del pixel anterior. Este modelo se extiende fácilmente para considerar color tanto de la fuente de luz como del material, fuentes de luz en cualquier lugar y múltiples fuentes de luz, así:

$$I(\lambda) = k_a(\lambda) I_a(\lambda) + k_d(\lambda) \sum_{n=1}^N (N \cdot L_n) I_n(\lambda)$$



FIGURA 3.2 BANDAS DE MACH.

El sombreado difuso de un punto exhibe bandas de Match (Figura 3.2) en la transición entre el área iluminada ambientalmente y el área que combina ambiental con difusa. Esta es debido a una discontinuidad entre el color constante del área ambiental y el rápido cambio del sombreado difuso, cerca de la transición. Esta discontinuidad puede ser eliminada añadiendo un exponente a el producto punto, el cual sea ligeramente mayor que uno.

Estos modelos difusos evaluados sólo una vez por polígono, resultan en que los polígonos que sean paralelos son indistinguibles uno del otro, porque son sombreados idénticamente (en el caso de que la distancia al observador y a las fuentes de luz sea infinita). Las funciones de atenuación atmosférica fueron introducidas como una solución a este problema. Las funciones que se encuentran actualmente están poco documentadas y su origen no es claro.

3.52 FUNCIONES DE ATENUACION ATMOSFERICA

Una función de atenuación $f(d)=1/d$ es presentada por Warnock (1969), y una función $f(d)=1/d^x$ es presentada por Romney. En estas funciones d es una medida de distancia desde el observador. La función de Warnock, intenta considerar la atenuación debida a la niebla o bruma. La función de Romney intenta considerar la ley de propagación de la energía desde un punto fuente.

Romney revisa distintas alternativas para la potencia x , concluyendo que para una fuente en la posición del observador, la teoría dicta que se use $x = 2$. Mientras que su experiencia empírica lo lleva a usar $x = 4$ para una mejor apariencia.

En aplicaciones en general, la función describe tanto la atenuación de la intensidad de la fuente antes de llegar a la

superficie como la atenuación de la luz desde la superficie a el observador. Una forma comúnmente usada es desvanecer la intensidad del objeto $I_0(\lambda)$, dentro de un color semejante a la neblina $I_n(\lambda)$. El color $I_0(\lambda)$, la distancia de inicio del cambio (i), y la distancia donde termina el cambio de intensidad (t), son especificados por esta función:

$$I(\lambda) = \begin{cases} I_0(\lambda) & \text{si } d < i \\ \frac{i-d}{i-t} I_0(\lambda) + \frac{d-t}{i-t} I_n(\lambda) & \text{si } i < d < t \\ I_n(\lambda) & \text{si } d > t \end{cases}$$

Nótese que esta función es opuesta a la función del inverso de la distancia sugerida originalmente. La justificación del porque es aplicable, es que la función $f(d)=1/d$ fue basada en un tratamiento teórico mientras que los modelos son aplicados utilizando técnicas que no pueden capturar la información requerida por los modelos basados teóricamente. Además, subjetivamente una buena apariencia es obtenida utilizando este modelo.

Si se observa un objeto brillante, en el mundo real, es posible percibir "destellos" (brillos) en su superficie, estos brillos son reflexiones de fuentes de luz o de otros objetos brillantes en la escena. Empíricamente, esto se puede modelar con una función que tenga un máximo en la dirección de la reflexión especular (espejo) desde la fuente de luz y decrezca rápidamente conforme la dirección se desvía de la dirección del espejo.

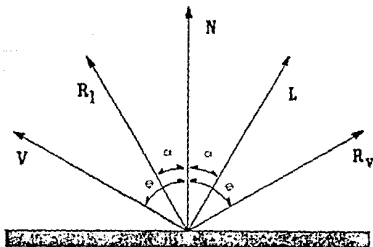
Romney sugiere que una función coseno elevada a cierta potencia creará la apariencia de brillos. En las escenas que iluminó, la fuente de iluminación esta en la posición del observador. Así cuando una superficie es normal a el vector del observador, la dirección de espejo está atrás del observador. La desviación de esta posición

cambia la dirección de espejo lejos del vector del observador. La expresión encontrada por Romnev que producía las mejores imágenes fue $(NL)^2/d^4$ donde d es la distancia de la superficie a el observador.

3.5.3 MODELO EMPIRICO DE PHONG

Phong (1975) formalizó un modelo más general utilizando una combinación de los términos ambiental, difuso y especular. El término $f(V, L, N, \rho)$ del modelo general es reemplazado por una función de reflectancia direccional $(V \cdot R_1)^{N_s}$ donde N_s es una medida de la rugosidad de la superficie (ver figura 3.3). Es importante hacer notar que el modelo de Phong K_s no es dependiente de la longitud de onda, así que los brillos son siempre blancos. En la caracterización original, el observador y la fuente de luz están a una distancia infinita, así que los vectores V y L son constantes.

FIGURA 3.3 ESQUEMA DE LOS VECTORES USADOS POR EL MODELO DE PHONG



Las propiedades de la reflexión son usadas para escribir una forma alterna para el término especular $(R_v \cdot L)^{N_s}$. El modelo de iluminación utilizado es entonces:

$$I(x) = k_d(x) + k_s(x) (N \cdot L) + k_r (R_v \cdot L)^{N_s}$$

El vector R_v (reflexión del vector del observador) es más sencillo de calcular que R_l (reflexión del vector de iluminación) porque el vector V tiene dos componentes cero, esto es $V=(0,0,1)$ antes de la transformación de perspectiva, cuando el observador está a una distancia infinita. La expresión para el vector reflejado,

$$R_v = 2 N (N \cdot V) - V, \text{ que se reduce a: } R_v = (2N_x N_y, 2N_z N_y, 2N_z^2 - 1).$$

3.5.4 MODELO EMPIRICO DE BLINN

Una función de reflexión direccional alternativa fué propuesta por Blinn (1977), esta usa el vector bisector H , entre V y L , en vez del vector de reflexión R_v . La razón de esto es que H representa la dirección normal de una superficie que produce la reflexión de espejo de la luz al observador. La función de reflexión describe la probabilidad de que las microfacetas de la superficie estén orientadas en esta dirección particular. Así, la normal de la superficie y la normal de las microfacetas en cuestión son requeridas para evaluar la función de reflexión. Si la fuente y el observador están a una distancia infinita, entonces el vector H sólo necesita ser calculado una vez para la escena completa, produciendo una considerable eficiencia computacional.

Este modelo se extiende fácilmente para considerar el color de las fuentes de luz y los materiales, y para múltiples fuentes de luz

colocadas en cualquier lugar dentro de la escena, como:

$$I(\lambda) = k_a(\lambda) I_a(\lambda) + k_d(\lambda) \sum_{n=1}^{fl} (N \cdot L_n) I_n(\lambda) + k_s \sum_{n=1}^{fl} (N \cdot H_r)^{N_s} I_n(\lambda)$$

Los parámetros de iluminación k_a , k_d , k_s y N_s son determinados empíricamente. La selección de estos para obtener una buena apariencia es más bien por experiencia que por fundamentos teóricos. Cuando se tiene un modelo empírico, no hay una conexión clara entre estos parámetros y su efecto sobre la apariencia.

3.5.5 MODELO DE GOURAUD PARA SIMULACION DE SUPERFICIES CURVAS

Los algoritmos de Scan-Line generalmente usan polígonos para el modelado de objetos y representan curvas como un conjunto de polígonos de aproximación, esto produce una apariencia de bloques. Gouraud (1971) presentó un método para crear la apariencia de una superficie curva, interpolando el color a través de los polígonos. La normal a la superficie curvada es utilizada en vez de la normal de los polígonos, para calcular el color en cada vértice. El color es entonces interpolado a través de los polígonos utilizando un método incremental cuando la imagen es procesada por el scan-line. El modelo de iluminación no cambia pero el método de utilización produce una mejor calidad visual añadiendo un mínimo costo computacional.

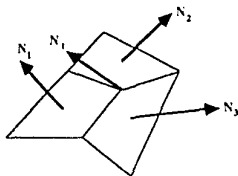
El principio del sombreado de Gouraud es de la siguiente manera. Para cada vértice común a distintos polígonos, la normal a cada uno es calculada, y entonces se calcula el promedio de los vectores normales asignando este como el vector normal en el vértice.

Las intensidades son calculadas para cada vértice utilizando

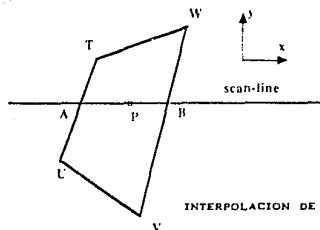
alguno de los modelos de iluminación. Como cada polígono tiene diferente iluminación en cada vértice, la intensidad de cualquier punto en el interior del polígono, es encontrada interpolando linealmente las intensidades de los vértices a lo largo de las aristas y después entre las aristas a lo largo del scan-line. (Figura 3.4).

Este método elimina las discontinuidades de la iluminación constante a través de los polígonos. Aunque en el lugar donde la inclinación de las superficies cambia el efecto de bandas de Match es aún visible.

FIGURA 3.4 ESQUEMA DEL MODELO DE GOURAUD.



CALCULO DE EL VECTOR NORMAL EN UN VERTICE: $N_i = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3}$



INTERPOLACION DE LA INTENSIDAD UTILIZADA POR GOURAUD.

$$I_A = \frac{I_T(Y_A - Y_U) + I_U(Y_T - Y_A)}{Y_T - Y_U} \cdot I_B = \frac{I_W(Y_B - Y_V) + I_V(Y_W - Y_B)}{Y_W - Y_V} \cdot I_P = \frac{I_A(X_B - X_P) + I_B(X_P - X_A)}{X_B - X_A}$$

3.56 MODELO DE PHONG PARA SIMULACION DE SUPERFICIES CURVAS

Phong (1975) propuso un método de sombreado interpolando los vectores normales. Esto significa que en vez de interpolar las intensidades como en el método de Gouraud, Phong interpola el vector normal a la superficie.

Con esta aproximación, el sombreado de un punto es calculado con la orientación de la normal aproximada. Con el método de Phong, se obtiene una mejor aproximación de la curvatura de una superficie y de los brillos debidos a la simulación de reflexión especular, aunque con este método se requiere de mucho más cálculos, ya que en vez de calcular el valor de la intensidad se tienen que calcular las tres componentes del vector normal y este vector tiene que ser normalizado antes de evaluar la función de iluminación. El esquema de interpolación lineal usado por Phong para aproximar la orientación de la normal, no garantiza una primera derivada continua de la función de iluminación, a lo largo de la arista de un modelo poligonal. En particular hay un cambio abrupto en la orientación de dos polígonos adyacentes a lo largo de una arista común, así que el efecto de bandas de Match es posible. Esto significa que una brillantez subjetiva (esta brillantez es debida a la interpretación del cerebro de los estímulos visuales) puede ser percibida a lo largo de las aristas, siendo este efecto menos visible en el modelo de Phong que el de Gouraud.

3.6 MODELOS TRANSICIONALES. "RAY TRACING"

Las técnicas de formación de imágenes que mantienen la información geométrica del espacio del objeto, puede ser agrupadas como técnicas de trazado de rayos. La consideración computacional fundamental de las técnicas de Ray Tracing es que la información geométrica y el color son calculados para cada pixel. Los modelos de iluminación usados para aplicaciones con Ray Tracing son casos particulares de un modelo de iluminación de la forma:

$$\begin{aligned} I(\lambda) &= \text{ambiental} + \text{difusa} + \text{especular} + \text{transmitida} \\ I(\lambda) &= k_a(\lambda) I_a(\lambda) + k_d(\lambda) \sum_{n=1}^{f1} (N \cdot L_n) I_n(\lambda) \\ &\quad + k_r(\lambda) \left[I_r(\lambda) + \sum_{n=1}^{f1} f_r(V, L_n, N, \zeta) I_n(\lambda) \right] \\ &\quad + k_t(\lambda) \left[I_t(\lambda) + \sum_{n=1}^{f1} f_t(V, L_n, N, \zeta) I_n(\lambda) \right] \end{aligned}$$

Los términos I_r e I_t representan la iluminación de las direcciones de reflexión y refracción.

3.6.1 MEJORAS EN LA ILUMINACION ESPECULAR

Blinn investigó el mejoramiento de la función de iluminación especular incorporando los conocimientos de la física y óptica en el modelo. Blinn sugirió una forma alternativa para la función de reflexión especular, basado en los trabajos de Torrance-Sparrow, y Trowbridge y Reitz (1967). La función está dada por:

$$f_r(V, L_n, N, \zeta) = \frac{D G F}{N \cdot V}$$

D es una función de distribución de las microfacetas que describe el porcentaje de las microfacetas que forman una superficie para la cual su normal está orientada en la dirección H. G es una función de atenuación geométrica, que estima la sombra que se produce a sí misma la superficie. F_r es la reflectancia de Fresnel, de las microfacetas orientadas en la dirección H. Blinn utiliza la formulación de la reflectancia para dieléctricos y no considera la dependencia de la longitud de onda de la reflectancia. La dependencia de la longitud de onda, es introducida por Cook y Torrance (1982) en su método de aproximación de la reflectancia de Fresnel.

La función de atenuación geométrica G, utilizada por Blinn es la descrita por Torrance y Sparrow. Además de la función de Torrance y Sparrow, existe una función descrita por Sancer (1969) la cual es muy diferente de la desarrollada por Torrance y Sparrow. Esta función elimina las discontinuidades que presenta la otra función y puede por lo tanto esperarse que elimine cualquier efecto de bandas de Match que llega a ocurrir con la función de Torrance y Sparrow.

Blinn presenta tres posibles funciones de distribución de microfacetas. La primera es una revisión de la función de Phong dada por:

$$D = (N \cdot H)^{N_g}$$

La segunda función, basada en una distribución Gaussiana usada por Torrance y Sparrow es:

$$D = \exp(- (C_1 \arccos(N \cdot H))^2)$$

La tercera función, está basada en el trabajo de Trowbridge y Reitz, es:

$$D = \left[\frac{C_2^2}{(N \cdot H)^2 (C_2^2 - 1) + 1} \right]^2$$

Blinn hace notar que cada una de las funciones tiene un valor máximo de 1, cuando $H=N$. Las constantes N_1 , C_1 y C_2 , controlan el decaimiento de la función de distribución.

3.6.2 PROPIEDADES MACROSCÓPICAS DE LAS SUPERFICIES

Catmull (1975), y Blinn y Newell (1976) describen el mapeo paramétrico de texturas tales como rugosidad, color y perturbación normal sobre superficies, antes de realizar los cálculos de color. Esto proporciona mayor detalle visual y complejidad, para una apariencia subjetivamente más realista. Las texturas son utilizadas para cambiar las propiedades de la superficie en un nivel macroscópico, esto es, un nivel donde los cambios no afecten la aplicación del modelo de iluminación.

En la forma general, la textura es un arreglo de datos de una, dos o tres dimensiones, describiendo un patrón. El mapeo relaciona una posición en el objeto con una localidad en el arreglo de textura. Después de que un punto visible en una superficie es determinado, las coordenadas de textura son calculadas, y estas son usadas para obtener el valor en la textura. La geometría de la superficie y las propiedades del material son alteradas basadas en el parámetro de textura, antes de que el modelo de iluminación sea aplicado. De esta forma el modelo de iluminación no es alterado cuando se usan superficies con textura.

Las coordenadas de las texturas son típicamente interpoladas a lo largo de polígonos. Así que, la aplicación de texturas es sujeta a las mismas anomalías que el sombreado, si no es usada la verdadera geometría de las superficies.

3.6.3 REFLEXION Y REFRACCION RECURSIVA

Blinn (1978) sugiere que las reflexiones de superficies altamente reflectivas pueden ser modeladas con una función especular que tenga un valor de 1, cuando $H=N$ y cero en otro caso. La intensidad reflejada es entonces la intensidad en la dirección del espejo. El mapeo de reflexiones, como ya se mencionó es usado para proporcionar la intensidad reflejada.

Whitted (1980) formalizó un procedimiento general que considera reflexión y refracción, al introducir el Ray Tracing recursivo al área de Graficación por Computadora. En cada superficie visible, las fuentes de luz son cuestionadas y la escena es revisada, para obtener información de las direcciones de reflexión y refracción. Una determinación de las superficies visibles es realizada, para identificar las superficies vistas en la dirección reflejada y refractada. El modelo de iluminación es evaluado para obtener las intensidades de estas superficies, preguntando nuevamente que se ve en las direcciones de reflexión y refracción. Esta técnica captura reflexiones y refracciones repetidas, para un mayor realismo. Además el camino de la luz desde la fuente al objeto es revisada, con el fin de investigar si es bloqueada por otro objeto, produciendo sombra. El notable realismo de este método es principalmente resultado de la técnica de sombreado recursivo. Los cambios en el modelo de iluminación para ajustar esta técnica son mínimos. El modelo de iluminación resultante es una extensión del modelo generalizado de Phong, para incluir términos para la luz incidente desde la dirección de reflexión de espejo y la dirección de refracción de Snell;

$$I(\lambda) = k_a(\lambda) I_a(\lambda) + k_d(\lambda) \sum_{n=1}^{l_1} (N \cdot L_n) I_n(\lambda) + k_e \left[I_r(\lambda) + \sum_{n=1}^{l_1} (N \cdot H_n) I_n(\lambda) \right] + k_t I_t(\lambda)$$

El criterio para detener la recursividad descrito por Whitted, fué un límite máximo en el número de reflexiones y/o refracciones por rayo trazado desde el observador. Sólo objetos reflectores requieren información de la dirección de espejo y sólo objetos transparentes requieren información de la dirección de refracción. La máxima profundidad es escogida empíricamente antes de empezar el cálculo de la imagen.

3.6.4 CONSIDERANDO LA ABSORCION Y DISPERSION DE LA LUZ EN UN MATERIAL TRANSPARENTE

Kay y Greenberg manejan la atenuación de la luz pasando a través de un material mientras viaja entre fronteras, extendiendo los términos de reflexión y refracción a: $k_r I_r A^d$ y $k_t I_t A^d$ respectivamente. Los factores A^d son la atenuación por unidad de longitud y d es la distancia que I_r o I_t han viajado desde la intersección previa, el resultado es una mejor representación de objetos transparentes.

Hall y Greenberg agregan un término para la transmisión incoherente (esta es la luz que es transmitida especularmente, pero no en la dirección exacta de la refracción) y relacionan k_e y k_t con la relación de Fresnel. El término de transmisión incoherente proporciona una mejor representación de las fuentes de luz vistas a

través de objetos transparentes. La función especular de potencia del coseno presentada por Blinn, es utilizada en este modelo y adaptada para la transmisión incoherente. La relación de Fresnel proporciona una mejor representación de reflexiones en metales y de los destellos de fuentes de luz en una dirección cercana a la tangente de la superficie. La aproximación a la reflectancia de Fresnel hecha por Cook y Torrance, es usada para considerar la dependencia de la longitud de onda y el ángulo de incidencia de los términos de reflexión y refracción.

Este modelo agrupa trabajos previos dentro de una sola expresión de la forma:

$$I(\lambda) = \text{ambiental} + \text{difusa} + \text{especular} + \text{transmitida}$$

$$\begin{aligned}
 I(\lambda) = & k_a M(\lambda) I_a(\lambda) + k_d M(\lambda) \sum_{n=1}^{11} (N \cdot L_n) I_n(\lambda) \\
 & + k_s \left\{ F_r I_r(\lambda) A_r^d + \sum_{n=1}^{11} (N \cdot H)^{N_s} F_r I_n(\lambda) \right\} \\
 & + k_t \left\{ F_t I_t(\lambda) A_t^d + \sum_{n=1}^{11} (N \cdot H)^{N_s} F_t I_n(\lambda) \right\}
 \end{aligned}$$

La dependencia de la longitud de onda de los términos de la reflexión y la transmisión especular, es incluida en los factores de Fresnel F_r y F_t . La aproximación de Cook permite que estos valores sean estimados de la curva de reflectancia espectral para el material.

Nótese que las curvas espectrales del material $M(\lambda)$, son usadas en los términos ambiental y difuso, al igual que en los términos de Fresnel.

3.6.5 AJUSTE DINAMICO EN LA CONTRIBUCION DE LA ILUMINACION

Hall también introduce el uso de ajuste dinámico de profundidad de la búsqueda en la reflexión y refracción. Un umbral de contribución mínimo es establecido el cual es visualmente menor que un nivel de resolución del color en el archivo de la imagen. La máxima contribución es hecha por la primer reflexión $k_r F_r$ y por la primer refracción $k_t F_t$. Para la siguiente reflexión la atenuación A_r^d y el $k_r F_r$ son multiplicados a la intensidad de la siguiente reflexión. Esto se repite hasta que la contribución caiga por debajo del umbral. Para esto se asume que todos los cálculos son hechos en un medio normalizado, donde la intensidad no excede el valor de 1.

Para el índice de refracción de el material sólo un valor es considerado cuando se calcula la dirección de refracción. Esto significa que las aberraciones cromáticas y efectos prismáticos no son posibles de simular.

Además de las fuentes principales de iluminación, las contribuciones de las direcciones reflejada y transmitida son consideradas, pero esto es aún una descripción muy limitada de la iluminación incidente en una superficie. El método trabaja bien para superficies reflectivas muy lisas, mientras que los resultados son decepcionantes cuando esta técnica es utilizada para superficies semibrillantes. Las sombras son muy marcadas y en general las imágenes trazadas por rayos tienen una apariencia sintética muy aguda y carecen de la sutileza de la realidad.

3.6.6 RAY TRACING DISTRIBUIDO

Cook (1984) usa un método de perturbación pseudoaleatoria de

muchos de los vectores en el modelo para proporcionar mayor información global a la evaluación final del color. Amanatides (1984) traza conos en la escena, para obtener mayor información global. Estos modelos empiezan la transición hacia las técnicas de equilibrio de energía. La distribución de los puntos de muestra o el área de muestra de los conos trazados, intentan cuantificar lo que pasa en el hemisferio de iluminación global.

La técnica del Ray Tracing distribuido es la generalización más sencilla para una amplia gama de tipos de objetos y medios complejos. El Ray Tracing distribuido proporciona un método para modelar superficies difusas y translúcidas, sombras tenues, movimiento borroso y profundidad de campo.

3.6.7 INTRODUCCION DE REGIONES DE PENUMBRA

El Ray Tracing tradicional, utiliza un solo rayo para obtener cada información. Mayor información global es obtenida, usando un conjunto de rayos para cada búsqueda de información. Por ejemplo, un grupo de rayos puede ser enviado hacia una fuente de luz para probar la sombra, o bien ser enviado en la dirección de la reflexión para obtener más información.

Las sombras producidas por una fuente que no es puntual (es decir una fuente que tiene cierto volumen) dan una idea de la técnica. Considérese el aspecto de una sombra. El Ray Tracing tradicional, utiliza un solo rayo a la fuente de luz para obtener las sombras y la información requerida por el modelo de iluminación. Esto produce sombras con bordes muy marcados y no existe penumbra.

Verbeck y Greenberg (1984) sugieren modelar fuentes no

puntuales como un colección de puntos de luz distribuidos en el volumen de la fuente que se quiere modelar. Supóngase que cuatro puntos son usados para modelar la fuente de luz. Entonces, un conjunto de cuatro rayos es usado para la determinación de las sombras, uno para cada punto de luz. (Figura 3.5)

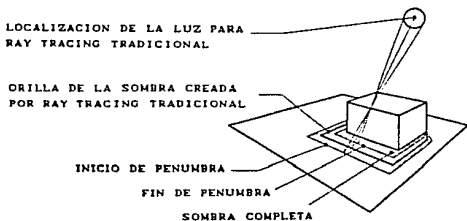


FIGURA 3.5 INTRODUCCION DE PENUMBRA (FUENTES DISTRIBUIDAS).

Hay dos inconvenientes para la solución del conjunto de rayos a puntos de luz fijos. El primero es que el uso de localidades fijas para las fuentes puntuales, produce bandas en la sombra. El segundo es el incremento en el tiempo de computación de los rayos adicionales.

El primer inconveniente es el resultado de intentar representar un evento de área con un conjunto de muestras fijas. Esto produce aliasing como si la luz fuera de cuatro fuentes puntuales. Una solución es usar un gran número de sub-luces. Esta solución converge a una imagen aceptable cuando hay suficientes sub-luces para reducir las bandas a un tamaño menor del pixel, aunque esto es indeseable debido a los cálculos adicionales requeridos. Otra solución es usar

un generador de puntos de luz aleatorios. Para cada rayo el generador selecciona una posición de la luz en forma aleatoria para muestrear.

El segundo inconveniente es que el conjunto de rayos es usado para cada muestra. Es fácil ver que si el conjunto de rayos es proyectado para reflexión, hay muchas nuevas ramas agregadas a el árbol de rayos, resultando en una gran cantidad de trabajo para el pequeño impacto en el color final del pixel.

Los materiales difusos translúcidos, son modelados distribuyendo un conjunto de rayos en las direcciones de reflexión y refracción. Cook nota que la distribución podría ser con pesos basados en la función de distribución de las microfacetas del modelo de iluminación.

El "motion blur" (movimiento borroso) es realizado distribuyendo los rayos para un pixel sobre el tiempo de duración de el cuadro. Requiriendo las transformaciones de los objetos, en cada momento de muestra, para evaluar cada uno de los rayos correspondientes a un punto (pixel).

La profundidad de campo es fácilmente llevada a cabo, promediando las intensidades de los rayos distribuidos en el área que corresponde a un pixel, en la rejilla del plano de proyección. (Figura 3.6).

El "aliasing" es eliminado utilizando una perturbación en la localización de las muestras sobre la rejilla.

La principal dificultad en el Ray Tracing distribuido es seleccionar las localizaciones de los rayos que son distribuidos. Una distribución fija produce aliasing en forma de bandas en la imagen. Introducir demasiados valores aleatorios resulta en la

generación de ruido en la imagen, manifestado con una apariencia granulosa.

El Ray Tracing distribuido produce imágenes muy buenas. Desafortunadamente, hay un alto costo asociado a los rayos extras requeridos por pixel en la simulación de efectos difusos. Y aunque una mayor información es disponible en el Ray Tracing distribuido, el equilibrio de la energía en el medio no es completamente manejado.

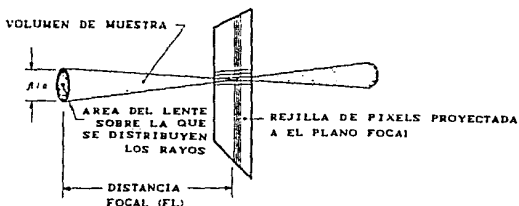


FIGURA 3.6 PROFUNDIDAD DE CAMPO.

3.7 FUTUROS DESARROLLOS.

MÓDELOS ANALÍTICOS. RADIOSIDAD

El desarrollo de los modelos analíticos ha sido limitado por la falta de habilidad de las técnicas existentes, de formación de imágenes, para proporcionar suficiente información para la evaluación del modelo. Las investigaciones en el área de mejoramiento de los modelos de iluminación de equilibrio de energía

están forzando al desarrollo de nuevas técnicas para la formación de imágenes.

Los modelos de iluminación analíticos y sus técnicas son aún limitados a aplicaciones de investigación. Las demandas de cálculo y almacenamiento de datos, hace estas técnicas imprácticas para aplicaciones en otras áreas, aunque el desarrollo del hardware hace posible esperar que estas técnicas se conviertan en práctica común.

Antes de describir las técnicas de los modelos analíticos, se definirán algunos conceptos y relaciones importantes.

3.7.1 HEMISFERIO DE ILUMINACION Y ANGULO SOLIDO

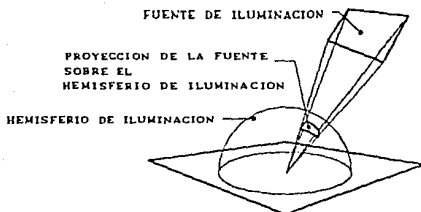


FIGURA 3.7

HEMISFERIO DE ILUMINACION.

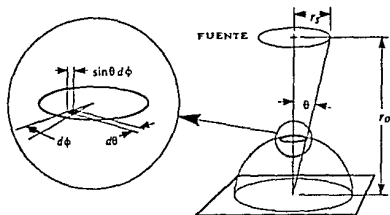
El concepto de hemisferio de iluminación, es descrito por la figura 3.7. El hemisferio de iluminación es una conveniencia notacional para describir los eventos de iluminación encima o abajo de una superficie. Estos eventos tales como fuentes de luz u otras superficies reflejantes, son proyectados sobre el hemisferio. Usualmente se utiliza un hemisferio de proyección con radio 1, por conveniencia en los cálculos.

Un ángulo sólido ω , describe la cantidad de el hemisferio de iluminación que es cubierta por la proyección de un evento de

iluminación sobre el hemisferio. La diferencial del ángulo sólido, es definida como la diferencial del elemento de superficie proyectado en el hemisferio y dividido por el cuadrado del radio del hemisferio. El ángulo sólido de un evento de iluminación es determinado por la integración de la diferencial del ángulo sólido sobre la región de la proyección de el evento.

Considérese una fuente de luz vista desde una superficie (figura 3.8). El ángulo sólido de esta superficie, es determinado proyectando ésta sobre el hemisferio arriba de la superficie e integrando el área de la proyección. El ángulo θ define el perímetro proyectado de la fuente y esta dado por: $\theta = \arctan(r_s/r_o)$. La diferencial del área de proyección de la fuente sobre el hemisferio es expresado por: $dA = \sin\theta \, d\phi \, d\theta$.

FIGURA 3.8 PROYECCION SOBRE EL HEMISFERIO



Integrando sobre la región del área proyectada, el ángulo sólido es expresado por:

$$\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi (1 - \cos(\arctan(r_s/r_o)))$$

Calcular el ángulo sólido rigurosamente es demasiado costoso computacionalmente. Pero en el caso de que r_s/r_o es muy pequeño,

esto es, un ángulo sólido muy pequeño. En este caso la aproximación $\theta = \arctan(r_s/r_o) \cong \sin(r_s/r_o) \cong r_s/r_o$ es válida. Así un ángulo sólido pequeño es aproximado por:

$$\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_s/r_o} \theta \, d\theta \, d\phi = \pi (r_s/r_o)^2$$

Pero πr_s^2 es el área de la fuente proyectada hacia la superficie iluminada. Los ángulos sólidos pequeños son frecuentemente aproximados por el cociente del área proyectada sobre la distancia al cuadrado:

$$d\omega = dA_p / r_o^2$$

Integrar sobre el hemisferio significa considerar todos los eventos sobre la superficie, afectados por el peso de los ángulos sólidos de sus proyecciones sobre el hemisferio. En otras palabras, esto significa que la importancia de un evento de iluminación, tal como una fuente de luz, es una función que depende tanto del carácter del evento como del ángulo sólido del evento. Esto es, la cantidad de energía recibida de las fuentes de luz depende tanto de la brillantez de la fuente como de el ángulo sólido de la fuente cuando es vista por el observador.

3.7.2 INTENSIDAD Y ENERGIA DE LA LUZ

La intensidad de la luz y la energía de la luz son usadas frecuentemente en forma indistinta, aunque estas son muy diferentes. Lo que comúnmente describimos como brillantez es la intensidad. La energía recibida por un observador o una superficie iluminada es una función tanto de la intensidad como del ángulo sólido cubierto por

la fuente de la intensidad. Algunos aspectos de la iluminación de superficies son directamente relacionados a la intensidad de las fuentes de iluminación, otros son una función de la energía recibida.

El flujo de energía Φ , es la energía por unidad de tiempo. La densidad de la energía $|E^2|$ es la energía por unidad de tiempo por unidad de área (E es la magnitud de campo eléctrico). La intensidad I , es definida como el flujo de energía por unidad de área proyectada de la fuente A_{ps} , por ángulo sólido ω , a través del cual la fuente radia.

$$I = \frac{\Phi}{A_{ps} \omega}$$

Considérese una fuente de luz esférica de radio r_0 radiando una energía total de Φ_0 en todas direcciones. El área proyectada de esta fuente en cualquier dirección es πr_0^2 . El ángulo sólido a través del cual la fuente radia es 4π (el ángulo sólido de una esfera). La intensidad de la fuente en cualquier dirección I_0 es entonces;

$$I_0 = \frac{\Phi_0}{4 \pi^2 r_0^2}$$

Nótese que la intensidad de la fuente es independiente de la distancia del observador a la fuente. Considérese el problema de determinar la densidad de energía en una superficie iluminada por la fuente descrita. A una distancia r_0 de la fuente, el flujo de energía pasa a través de una esfera de radio r_0 y área $4\pi r_0^2$. La densidad de energía en una distancia r_0 está dada por el cociente de el flujo de energía entre el área a través de la cual es radiado;

$$|E^2| = \frac{\Phi_0}{4 \pi r_0^2}$$

Esto está basado en considerar el área de la esfera a una distancia r_0 y que para cualquier punto en esta esfera, la normal es

paralela a la dirección en que la energía de la luz está viajando desde la fuente. Para determinar el flujo de energía de una superficie orientada en otra dirección, el área proyectada debe ser considerada. El producto punto entre la normal a la superficie N_0 y el vector hacia la fuente es multiplicado por la expresión que se tenía, la densidad de la energía es entonces dada por:

$$|E_0^2| = |E^2|(N_0 \cdot L) = \frac{I_0}{4\pi r_0^2} (N_0 \cdot L)$$

y la densidad de la energía expresada en término de la intensidad de la fuente por:

$$|E_0^2| = \frac{I_0 (N_0 \cdot L) \pi r_s^2}{r_0^2} = I_0 (N_0 \cdot L) \omega_0$$

La segunda igualdad es debida a la aproximación para el ángulo sólido de la fuente de luz cuando es vista desde una superficie.

$$\omega_0 = \frac{\pi r_s^2}{r_0^2}$$

3.7.3 APLICACION DEL CONCEPTO DE ENERGIA AL MODELO DE ILUMINACION

Estas relaciones pueden ser aplicadas al caso general de evaluar la energía que llega a un "patch" en una superficie, desde una fuente de iluminación (figura 3.9). Si la fuente y los "patches" de la superficie son suficientemente pequeños comparados con la distancia, la aproximación del ángulo sólido es apropiada. Entonces integrando sobre el ángulo sólido y el área proyectada, se obtiene la expresión para la energía recibida:

$$\phi = \frac{I A_s A_o (N_s \cdot R) (N_o \cdot L)}{r_o^2}$$

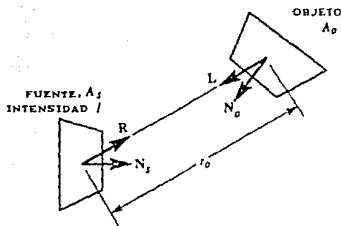


FIGURA 3.9 CALCULANDO EL FLUJO DE ENERGÍA.

Cook y Torrance (1982) proponen una formulación de energía para el modelo de iluminación. Este modelo usa la energía, en lugar de la intensidad, que llega a una superficie iluminada por las fuentes de luz. Como con los modelos previos, la iluminación es dividida dentro de componentes ambiental, difusa y especular. El modelo resultante es:

$$I(\omega) = k_a(\lambda) I_a + k_d R_d(\lambda) \sum_{n=1}^{N_s} I_n(\omega) d\omega_n + k_s \sum_{n=1}^{N_s} R_{bd}(\lambda) I_n(\omega) (N \cdot L_n) d\omega_n$$

La reflectancia difusa, R_d relaciona la intensidad reflejada en cualquier dirección con el flujo de energía incidente por unidad de área incidente en la superficie. Típicamente $R_d(\lambda) = M(\lambda) / \pi$, donde $M(\lambda)$ es la curva espectral del material para la componente difusa del material.

Por consistencia entre la reflexión difusa y ambiental $k_s(\lambda) = M(\lambda)$. La suma de k_s y k_d es igual a uno en la fórmula original. La función de reflectancia bidireccional R_{bd} , relaciona la

intensidad reflejada en una dirección específica con el flujo de energía por unidad de área incidente desde una dirección dada. La función de reflectancia bidireccional es una combinación de un término de Fresnel, una función de rugosidad, una función de atenuación geométrica y algunos factores adicionales para satisfacer el equilibrio de energía. La función es entonces:

$$R_{bd} = \frac{D G F_r}{(N \cdot L_n) (N \cdot V)}$$

La función de distribución de las microfacetas usada por Cook es adaptada del trabajo de Beckmann (1963):

$$D = \frac{1}{4\pi n^2 (N \cdot H_n)} \exp \left\{ \frac{(N \cdot H_n)^2 - 1}{(N \cdot H_n)^2 m^2} \right\}$$

Cook considera que la ventaja de esta función es que, ésta da el valor absoluto sin la introducción de constantes arbitrarias, como en las distribuciones de Blinn.

El término de Fresnel considera la dependencia de la longitud de onda de los brillos. Cook presenta un método de aproximación para determinar la reflectancia de Fresnel, esta aproximación ha sido adoptada por los modelos de iluminación para Ray Tracing. La función de atenuación geométrica, usada por Cook fué la presentada por Torrance y Sparrow, aunque la función de Sancer también se puede usar.

3.7.4 VALIDEZ TEORICA DEL MODELO DE ILUMINACION

Un modelo teóricamente válido debe satisfacer la revisión de

equilibrio de energía. Si la reflectancia de Fresnel es igual a 1, entonces toda la energía es reflejada. Si la iluminación ambiental es cero, entonces la energía llega a la superficie únicamente de las fuentes de luz. En vista de que la función de distribución puede ser usada sin la introducción de constantes arbitrarias, k_0 es igualada a 1. La ecuación para equilibrio de energía puede ser entonces usada para examinar el modelo de iluminación. La ecuación de equilibrio de energía está dada por:

$$1.0 = \int^{2\pi} R_{bd} \cos \theta_1 d\omega_{frente} + \int^{2\pi} T_{bd} \cos \theta_2 d\omega_{atras}$$

Esta ecuación verifica la validez de las funciones bidireccionales, ya que comprueba el equilibrio de energía.

3.7.5 RADIOSIDAD PARA MEDIOS DIFUSOS

Goral (1984) adapta las técnicas de radiosidad usadas en ingeniería termal, para modelar el movimiento de la energía de la luz a través de un medio ambiente. Esta técnica asume que todas las superficies son rugosas y los materiales son opacos reduciendo la expresión del modelo de iluminación. Simplificaciones adicionales se hacen asumiendo que las superficies son reflectoras, emisoras y difusas ideales. El modelo de iluminación usado es:

$$I(\lambda) = \epsilon(\lambda) + R_d(\lambda) \int^{2\pi} I_L(\lambda) (NL) d\omega$$

donde R_d es la reflectancia difusa y es $R_d(\lambda) = M(\lambda)/\pi$. El término $\epsilon(\lambda)$ es la emisividad de la superficie. Esta emisividad se refiere al comportamiento de la superficie como fuente de luz. La emisividad de una superficie es usualmente causada por elevar la temperatura de

la superficie y la actividad molecular resultante. En un sentido general, la emisividad es el resultado de la energía absorbida que es radiada o emitida de la superficie como luz visible.

La evaluación de el Modelo de Iluminación, para una sección particular de superficie n , en el medio es aproximada sumando las contribuciones de todos los "patches" o secciones del objeto en la escena;

$$I_n(\lambda) = \epsilon_n(\lambda) + R_{d,n}(\lambda) \sum^P I_m(\lambda) F_{m,n}$$

El factor de forma $F_{m,n}$, es introducido como una conveniencia notacional. Este es el factor que relaciona la densidad de energía incidente en el "patch" n desde el "patch" m , con la intensidad reflejada del "patch" m . Específicamente;

$$\bar{\Phi}_{m,n} / A_n = |E_{m,n}^2| = I_m F_{m,n}$$

Sustituyendo la relación de energía y la expresión del ángulo sólido visto anteriormente, el factor de forma está dado por:

$$F_{m,n} = \frac{1}{A_n} \int^n \int^m \frac{\cos \theta_n \cos \theta_m}{r_{m,n}^2} dA_m dA_n$$

En la figura 3.10, se describe el factor de forma. En la práctica el cálculo explícito del factor de forma ha sido reemplazado por aproximaciones numéricas. El factor de forma es una función que depende únicamente de la geometría. Una vez que los factores de forma han sido calculados para una escena, estos permanecen válidos siempre que la geometría no cambie. Las reflectancias y emisividades de los patches pueden ser cambiadas sin afectar los factores de forma.

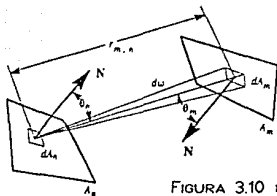


FIGURA 3.10 FACTOR DE FORMA.

Considérese una vez más la escena que consta de 3 "patches" y una fuente de iluminación (figura 3.1). La fuente de luz es generalizada como un cuarto "patch", con la emisividad de este "patch" distinta de cero.

En este ejemplo los "patches" están suspendidos en el espacio, no hay iluminación ambiental excepto la generada por la reflexión de los "patches". Una restricción adicional es que ninguno de los "patches" produce sombra sobre algún otro "patch".

La técnica de aplicación de este modelo ya fué mencionada al principio del capítulo. Para simplificar la notación se omitirá la dependencia de la longitud de onda de los términos $I(\lambda)$, $\epsilon(\lambda)$ y $R_d(\lambda)$. El sistema de ecuaciones que describe la iluminación de la escena es:

$$I_1 = \epsilon_1 + R_{d1} I_1 F_{11} + R_{d1} I_2 F_{21} + R_{d1} I_3 F_{31} + R_{d1} I_4 F_{41}$$

$$I_2 = \epsilon_2 + R_{d2} I_1 F_{12} + R_{d2} I_2 F_{22} + R_{d2} I_3 F_{32} + R_{d2} I_4 F_{42}$$

$$I_3 = \epsilon_3 + R_{d3} I_1 F_{13} + R_{d3} I_2 F_{23} + R_{d3} I_3 F_{33} + R_{d3} I_4 F_{43}$$

$$I_4 = \epsilon_4 + R_{d4} I_1 F_{14} + R_{d4} I_2 F_{24} + R_{d4} I_3 F_{34} + R_{d4} I_4 F_{44}$$

Este sistema de ecuaciones es reescrito en su forma generalizada, para una escena con n "patches" y en forma matricial.

$$\begin{pmatrix} 1 - R_{d1}F_{11} & -R_{d1}F_{21} & \dots & -R_{d1}F_{n1} \\ -R_{d2}F_{12} & 1 - R_{d2}F_{22} & \dots & -R_{d2}F_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -R_{dn}F_{1n} & -R_{dn}F_{2n} & \dots & 1 - R_{dn}F_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}$$

Goral utiliza eliminación Gaussiana para resolver el sistema de ecuaciones. Nótese que hay un sistema de ecuaciones para cada longitud de onda ya que, aunque los factores de forma son los mismos para cada longitud de onda, no ocurre lo mismo para R_d , ϵ e I los cuales son distintos en cada longitud de onda.

La técnica de radiosidad calcula la intensidad para cada "patch" independientemente del proceso de formación de la imagen. Un algoritmo de sombreado de Gouraud puede ser entonces usado para formar la imagen, con el color de los vértices determinado promediando los colores de los patches adyacentes en una superficie.

Cohen, desarrolló un extensión a el método de radiosidad que proporciona una metodología para la aproximación de los factores de forma y considera las sombras en la escena. Esta extensión permite la formación de imágenes con escenas más complejas, usando técnicas de radiosidad.

Cohen observa que cualesquiera dos "patches" que tienen la misma proyección sobre el hemisferio de iluminación, tienen el mismo factor de forma. El propone proyectar la escena en el hemisferio de iluminación de un "patch" dado, realizando los cálculos de superficies visibles para tal "patch". Cada punto muestreado en la

proyección de las superficies visibles representa algún ángulo sólido y corresponde a un factor de forma ΔF_q . El factor de forma para un "patch" particular es aproximado sumando los factores de forma de los puntos muestreados cubiertos por el "patch" :

$$F_{mn} = \sum_{q=t}^n \Delta F_q$$

La proyección de las superficies visibles sobre el hemisferio es difícil, así que Cohen sugiere el uso de un hemi-cubo (o medio cubo) para la proyección de las superficies visibles (figura 3.11).

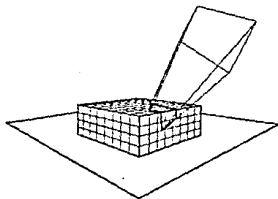


FIGURA 3.11 HEMI-CUBO UTILIZADO POR COHEN.

Un hemi-cubo es colocado en el centro de cada patch. El cálculo de las superficies visibles es realizado para cada superficie de el cubo usando cualquier algoritmo de superficies visibles y ningún cálculo de sombreado es realizado en esta etapa. La frecuencia de muestreo de el hemi-cubo es fijada para la escena. Cohen sugiere una resolución de 50×50 a 100×100 .

La matriz que describe el movimiento de energía a través de la escena, es usada sin cambio. Además hace notar que por las

limitaciones físicas de los factores de forma y la reflectancia, se obtiene una matriz estrictamente diagonal dominante. Por lo tanto se asegura una rápida convergencia con una técnica iterativa para obtener la solución del sistema.

La técnica para formación de la imagen es similar a la usada por Goral con dos diferencias significativas:

► El esquema para determinar el color de los vértices es promediando el color de los "patches" adyacentes para "patches" en el interior de una superficie, y por extrapolación del color en los vértices de las orillas de la superficie. La extrapolación asume que el color en el centro de la distancia desde un vértice en la orilla a un vértice interior adyacente es el color promedio de los "patches" adyacentes. (Figura 3.12).

► La interpolación para cada "patch" es realizada en el espacio del objeto en lugar del espacio de la imagen. De tal forma que las anomalías introducidas por la no linealidad de la transformación de proyección son eliminadas.

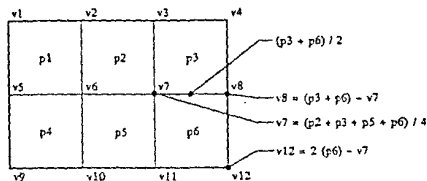


FIGURA 3.12 OBTENCION DEL COLOR EN EL MODELO DE COHEN.

CAPITULO IV

DESARROLLO DE UN MODELO DE ILUMINACION GLOBAL, BASADO EN EL MODELO DE WHITTED.

En los capítulos anteriores se ha mostrado; la importancia del Modelo de Iluminación dentro de la Síntesis de Imagen, también se han establecido las características de la luz y su interacción con los objetos, y se han revisado los modelos ya existentes. Con todo este material ahora se está en condiciones de crear un sistema para la generación de imágenes donde sea posible aplicar distintos Modelos de Iluminación de manera sencilla.

4.1 ILUMINACION

El Modelo de Iluminación que se tomó como base en el sistema fué el modelo de Whitted, el cual ha sido explicado anteriormente. Este Modelo de Iluminación está desarrollado para el modelo de color RGB, es decir el modelo es aplicado a las longitudes de onda correspondientes al rojo, verde y azul, ignorando las contribuciones de otras longitudes de onda.

Como el Modelo de Iluminación debe ser aplicado a cada uno de los registros de color en cada pixel de la imagen, el Modelo de Iluminación ha sido dividido en sus componentes difusa y especular para evaluarlo de manera más eficiente. Por ejemplo, iluminar una superficie que ha sido definida como difusa ideal, de la cual va

sabemos que el valor de la componente especular es cero, por lo que sería ineficiente hacer todos los cálculos de la componente especular que a fin de cuentas no son significativos.

El Modelo de Iluminación está dividido en tres procedimientos y existe un cuarto procedimiento que en caso de que el rayo no intersecte ninguna superficie, asigna un valor de intensidad al cielo (o fondo) de la imagen, para el cual se definen dos colores: el color en el cenit y el color en el horizonte.

Cada uno de los procedimientos se encarga de alguna de las componentes del Modelo de Iluminación, las cuales son:

Iluminación Difusa

Iluminación Especular

Brillos Producidos por las Fuentes de Luz.

El procedimiento de iluminación difusa toma en cuenta la iluminación ambiental definida en la escena y la luz que llega a la superficie desde cada una de las fuentes de luz, revisando que no exista algún objeto entre la superficie y la fuente de luz, en caso de existir dicho objeto, la superficie será considerada en una región sombreada para esta fuente de iluminación y por lo tanto su aportación será nula. En la aportación de cada fuente de iluminación está considerado un factor de atenuación atmosférica debido a la distancia.

El procedimiento de iluminación especular se encarga de generar un nuevo rayo en la dirección de la reflexión especular y calcular la iluminación desde esa dirección.

El procedimiento que revisa los brillos de la superficie producidos por las fuentes de luz, lo que hace es generar un rayo hacia cada una de las fuentes de luz y obtiene el ángulo formado entre éste y el rayo reflejado por la superficie. Si el ángulo obtenido es menor que cierta constante predefinida (en este caso el ángulo debe ser menor de 13°), el punto sobre la superficie está en una zona de gran reflectancia para la fuente, así que su intensidad será la máxima posible, obteniéndose el efecto de brillo.

Estos procedimientos serán explicados con más detalle cuando se revisen cada uno de los módulos del sistema.

4.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El sistema ha sido escrito en el lenguaje de programación C y se encuentra dividido en tres módulos, cada uno de ellos contiene rutinas relacionadas con alguna parte del proceso, de tal forma que sea sencillo modificar las características del sistema para que: pueda ser portable a máquinas con otras tarjetas gráficas, aumentar el número de primitivos gráficos, modificar el tamaño de la imagen y por supuesto cambiar el Modelo de Iluminación.

Los módulos han sido llamados RTA, RTA1 y RTA2.

El módulo RTA es el que contiene el programa principal del sistema, que se encarga de coordinar todos los demás procedimientos. Este módulo también contiene otras rutinas, una de estas rutinas es la que contruye la base de datos que representa la escena que se desea visualizar, y que será la que se esté consultando para formar la imagen y para aplicar el modelo de iluminación.

La escena será definida por medio de un archivo de texto con un formato preestablecido. El formato es el siguiente:

Posición del observador en el espacio del objeto $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Dirección hacia donde el observador está mirando $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

distancia focal $(x) \in \mathbb{R}$

Número de cilindros $(n) \in \mathbb{Z}$

para cada cilindro Posición en el espacio del objeto $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Color $(r,g,b) \in \mathbb{R}^3$

Radio $(x) \in \mathbb{R}$

Tipo de superficie $(t) \in \{ 0, 2 \}$

Número de elipses $(n) \in \mathbb{Z}$

para cada elipse Posición en el espacio del objeto $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Color $(r,g,b) \in \mathbb{R}^3$

Radio $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Tipo de superficie $(t) \in \{ 0, 2 \}$

Número de esferas $(n) \in \mathbb{Z}$

para cada esfera Posición en el espacio del objeto $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Color $(r,g,b) \in \mathbb{R}^3$

Radio $(x) \in \mathbb{R}$

Tipo de superficie $(t) \in \{ 0, 1, 2, 3 \}$

[si tipo = 3

$k_s, k_d \in [0,1]$ tal que $k_s + k_d = 1$]

Número de lamparas $(n) \in \mathbb{Z}$

para cada lampara Posición en el espacio del objeto $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$

Color $(r,g,b) \in \mathbb{R}^3$

Radio $(x) \in \mathbb{R}$

1^{er} color del piso (r,g,b) $\in \mathbb{R}^3$

2^o color del piso (r,g,b) $\in \mathbb{R}^3$

Iluminación ambiental (r,g,b) $\in \mathbb{R}^3$

Color del horizonte (r,g,b) $\in \mathbb{R}^3$

Color del cenit (r,g,b) $\in \mathbb{R}^3$

Los tipos de superficie corresponden a los siguientes:

0 = OPACO

2 = ESPEJO

1 = BRILLANTE

3 = TRANSPARENTE



En el módulo RTA1 se encuentran lo que son las definiciones de las estructuras para manejar los primitivos gráficos, la escena, el observador y una superficie plana.

Además se tienen todas las rutinas para el trazado de rayos, iluminación y manejo de vectores. Este es el módulo que se debe modificar cuando se desea cambiar el modelo de iluminación.

En el módulo RTA2, se tienen las rutinas que realizan el despliegue de la imagen de los datos obtenidos por el módulo RTA1. En este módulo es donde se definen las características de la pantalla y en base a ellas se crea la paleta de colores, se despliega la imagen y se almacena en disco.

Aquí también se inicializa el modo gráfico y se dan valores iniciales a las variables para el manejo de la paleta de colores.

Una vez concluida la graficación se tiene una rutina para liberar la memoria utilizada por el modo gráfico.

Este módulo es importante en la portabilidad del sistema ya que mediante su modificación me permite utilizar el mismo sistema en equipos con capacidades gráficas distintas (ver apéndice A).

4.3 PRINCIPALES RUTINAS UTILIZADAS

Para dar una idea más clara de como es el funcionamiento del sistema se revisarán con mayor detalle algunas rutinas importantes, lo que permitirá ampliar un poco más la explicación de las características del sistema.

El esquema de la rutina principal es como sigue:

SE CREA LA BASE DE DATOS DE LA ESCENA

para (j=Y_inicial; j < #Pixels_Y + Y_inicial; j++)

 para (i=X_inicial; i < #Pixels_X + X_inicial; i++)

 { SE GENERA EL RAYO PARA EL PIXEL EN LA POSICION (I,J).

 SE SIGUE EL RAYO HASTA ENCONTRAR UNA SUPERFICIE

 Y SE OBTIENE EL COLOR DE ESTE PIXEL.

 SE ILUMINA EL PIXEL EN EL DISPOSITIVO DE DESPLIEGUE.

 }

SE ALMACENA LA IMAGEN EN UN ARCHIVO JUNTO CON LA PALETA DE COLORES QUE SE GENERO.

4.3.1 PROCEDIMIENTO PARA ESTABLECER LA BASE DE DATOS

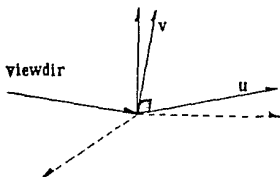
Para crear la base de datos se leen las características desde un archivo con el formato que se mencionó previamente.

Los primeros datos son la posición del observador y la dirección hacia adonde está orientado. Con este último dato se encuentran los vectores (u y v) que generan un plano perpendicular a la dirección de visión.

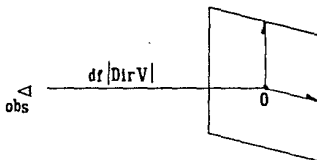
$$U = \text{DIRVISION} \times \text{CENIT}$$

$$V = U \times \text{DIRVISION}$$

$$\text{DIRVISION} \perp U \perp V$$



El siguiente dato es la distancia focal (df) que es la magnitud por la que se multiplicará el vector de dirección de visión para encontrar el origen del plano de la imagen. (Figura 4.1)



$$O = \text{OBS} + df \text{ DIRVISION}$$

Las características de la formación de la imagen, terminan definiendo el tamaño y el número de pixels tanto en x como en y .

Los datos siguientes son los que conforman la escena. Estos son leídos y almacenados en memoria, utilizando una estructura de listas para cada uno de los distintos primitivos gráficos, donde cada nodo de la lista es un primitivo con todas sus características.

4.3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACION DEL RAYO QUE PASE POR EL PIXEL (I,J)

Ya definida la escena y los vectores que forman el plano de la imagen, se forma una rejilla en el plano de la imagen, donde cada celda de la rejilla representa un pixel de la imagen.

Para la generación del rayo para el pixel (i,j), se utilizan la posición del observador y el punto que está en el centro de la celda (i,j) de la rejilla.

El desplazamiento a partir del origen del plano de la imagen está dado por:

$$y = (ny/2 - j) * ty ; \quad ny = \# \text{ de pixels en Y}$$
$$x = (i - nx/2) * tx ; \quad ty = \text{tamaño del pixel en Y}$$

(x,y) son coordenadas en el espacio de la imagen.

Así el punto (P) que le corresponde dentro del espacio del objeto es:

$$P = O + v V + x U$$

y con este punto y la posición del observador se genera la ecuación del rayo.

4.3.3 PROCEDIMIENTO PARA GENERACION DE LA ECUACION DEL RAYO

Para representar el rayo se utiliza la ecuación paramétrica de una recta de la siguiente forma: $OBS + t \cdot VECDIR$ con $t \geq 0$.

Un valor de t negativo no va a tener sentido, ya que son puntos que están detrás del observador.

4.3.4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL SEGUIMIENTO DEL RAYO

Para hacer el seguimiento del rayo se empieza asignándole un valor muy grande a una variable t , que representará el valor del parámetro que se utiliza en la ecuación del rayo.

Para cada lista de primitivos gráficos se revisa su intersección con el rayo (si existe). Si algún primitivo interseca al rayo y el valor de su parámetro es menor que el que tenga la variable t , éste es asignado a t y se deja constancia de que este primitivo es el más cercano al observador hasta esa revisión.

Una vez que se han revisado todos los primitivos gráficos, se obtiene el más cercano (el que tenga el menor valor de t), y se calculan el punto en el espacio al cual corresponde el parámetro, la normal a la superficie del primitivo y el color asociado al primitivo. Con estos datos se aplica el Modelo de Iluminación, según el tipo de superficie definido para el primitivo.

En caso de que no existiera intersección con ninguno de los primitivos, la intensidad del pixel estará en función de la inclinación del rayo, interpolando entre el color del cenit y el color del horizonte.

4.3.5 RUTINAS DE INTERSECCION RAYO - SUPERFICIE

La intersección entre el rayo y la superficie de un primitivo gráfico es localizada resolviendo un sistema de ecuaciones simultáneas. Las ecuaciones que se tienen que cumplir son la ecuación del rayo;

$$1) \quad P = A + t B \quad \text{donde } t \in \mathbb{R} \quad \text{y} \quad P, A, B \in \mathbb{R}^3$$

y la ecuación de la superficie, que tiene la forma;

$$2) \quad a(x-x_0)^2 + b(y-y_0)^2 + c(z-z_0)^2 + d = 0$$

donde $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ y dependen del tipo de primitivo.

La ecuación (1) se puede dividir en 3 ecuaciones lineales;

$$\begin{array}{ll} x = a_x + t b_x & \text{donde:} \\ y = a_y + t b_y & A = (a_x, a_y, a_z) \\ z = a_z + t b_z & B = (b_x, b_y, b_z) \end{array}$$

y sustituirse en la ecuación (2), quedando por resolver una ecuación cuadrática:

$$k_2 t^2 + k_1 t + k_0 = 0$$

Si la ecuación no tiene raíces, querrá decir que no existe intersección entre el rayo y la superficie.

Si el discriminante de la ecuación es mayor que cero, se toma la raíz que sea menor y positiva. En caso de que las raíces sean negativas, la superficie estará detrás del observador, por lo que se asumirá que no existe intersección.

4.3.6 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA NORMAL A UNA SUPERFICIE EN UN PUNTO

Para obtener la normal a la superficie se utiliza el vector gradiente de la función que describe la superficie.

$$f(x,y,z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + d = 0$$

y tenemos que:

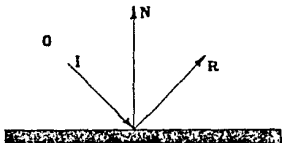
$$N = \nabla f(x,y,z) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) = (2ax, 2by, 2cz)$$

Así en el punto (x_0, y_0, z_0) la normal a la superficie será el vector gradiente evaluado en el punto. Por razones de simplificación de cálculos posteriores el vector normal es normalizado.

4.3.7 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA COMPONENTE DE REFLEXION ESPECULAR DEL MODELO DE ILUMINACION

Para obtener la iluminación que es aportada por la componente especular en una superficie, es necesario generar un nuevo rayo que parta del punto sobre la superficie, para el cual se está evaluando el Modelo de Iluminación, y cuya dirección sea la reflexión del vector incidente al rebotar en la superficie.

En el Capítulo II va se analizó una forma de obtener el vector



de reflexión a partir del vector incidente y la normal a la superficie (figura 4.2), esta es: $R = I - 2(N \cdot I)N$.

El averiguar la iluminación que proviene de esa dirección involucra una llamada recursiva a el procedimiento de seguimiento de rayos, donde la posición del observador es reemplazada por el punto de intersección y la dirección del rayo es modificada por la reflexión.

La iluminación que proviene de la dirección de reflexión en su paso por la superficie es afectada por el color de esta, así que la iluminación de la componente especular esta dado por:

$$I_s(\lambda) = C(\lambda) I_r(\lambda)$$

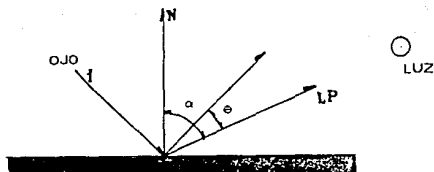
donde: I_r es la iluminación desde la dirección de reflexión
 C es el color de la superficie

4.3.8 PROCEDIMIENTO PARA DAR EL EFECTO DE BRILLO PRODUCIDO POR UNA FUENTE DE LUZ

En este procedimiento lo que se verifica es si el punto de la superficie, para el cual se está evaluando el Modelo de Iluminación está en una zona de alta reflectancia, si este es el caso el color de la superficie es ignorado y la intensidad asignada a este punto será la intensidad de la fuente de luz, en caso contrario, la iluminación es evaluada de la misma forma que para una superficie difusa ideal.

Lo que el procedimiento hace es que para cada fuente de luz que pueda iluminar la superficie (que esté frente a la superficie y que no exista ningún objeto entre la superficie y la fuente que pueda

bloquear la luz), se genera un vector que vaya de la superficie a la fuente de luz (LP) y se obtiene el vector reflejado del rayo incidente. (Figura 4.3).



Para que el punto se encuentre en una zona de brillo es necesario que el vector LP no esté muy desviado de la dirección de reflexión. En este caso se considera una desviación máxima de 13° con respecto a la dirección de reflexión del rayo incidente, para esto sólo hay que comprobar que:

$$LP \cdot \text{VecREF} > \cos (13^\circ)$$

$$\text{donde: } |LP| = |\text{VecRef}| = 1.$$

es decir que $\theta < 13^\circ$.

4.3.9 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA COMPONENTE DE REFLEXION DIFUSA DEL MODELO DE ILUMINACION

En este procedimiento se calcula la iluminación de una superficie, dada por la iluminación ambiental y por la reflexión difusa de la luz proveniente de las fuentes de luz.

En la parte de iluminación ambiental se consideran la normal de la superficie, el color de la superficie y la iluminación ambiental definida para la escena, de la siguiente forma:

$$I_A(\lambda) = [(N \cdot \text{CENIT}) + k_1] k_2 I_{AD}(\lambda) C(\lambda)$$

donde: k_1, k_2 son constantes de atenuación

I_{AD} iluminación ambiental definida en la escena

El factor adicional en la iluminación ambiental en este modelo es para producir un tipo de iluminación como la que produce el sol cuando se encuentra en el cenit.

Para calcular la componente difusa, cada una de las fuentes de luz que pueda iluminar la superficie aportará una porción de la iluminación difusa total. La aportación de una fuente de luz va a estar en función de su posición y el color de la luz que emite.

De acuerdo a la Ley de Lambert para reflexión difusa, la luz es reflejada con la misma intensidad en todas direcciones, así que sólo nos interesa saber el ángulo (α) que forman la normal y el vector LP, y la distancia de la fuente a la superficie para el factor de atenuación atmosférica. Así tenemos que:

$$I_D(\lambda) = \sum \frac{LP \cdot N}{|LP|^2} C(\lambda) I_L(\lambda)$$

4.4 COMO MODIFICAR EL MODELO DE ILUMINACION?

Una manera de modificar el Modelo de Iluminación es plantear un nuevo modelo o mejorar el descrito en este capítulo.

El Modelo de Iluminación empleado en la descripción es:

$$\begin{aligned}
 I(\lambda) = & [(N \cdot \text{CENIT} + k1) k2] I_A(\lambda) C(\lambda) \\
 & + \kappa_d \sum_{n=1}^{n_l} S(n) \left((1 - B_n) \frac{LP_n \cdot N}{|LP_n|^2} C(\lambda) + B_n \right) I_n(\lambda) \\
 & + \kappa_g I_{ref}(\lambda) C(\lambda)
 \end{aligned}$$

donde: N es la normal

CENIT es el vector en la dirección del cenit (0,0,1)

k1, k2 constantes para atenuación de ilum. ambiental

I_A iluminación ambiental definida en la escena

C color de la superficie

S_n función de sombra (indica si el punto está en la sombra de la n-ésima fuente de luz)

B_n función de reflectancia (indica si el punto está en una zona de alta reflectancia para la n-ésima fuente de luz)

LP_n vector en la dirección de la n-ésima lámpara

I_{ref} iluminación que proviene de la dirección de reflexión especular.

Este modelo únicamente maneja el fenómeno de la reflexión, así que para ejemplificar un cambio en el Modelo de Iluminación del sistema, éste será extendido de tal forma que maneje el fenómeno de la transmisión.

En este caso es necesaria mayor información acerca de la superficie, porque para el cálculo de el vector de refracción (transmisión) es necesario saber el índice de refracción del material que forma al objeto. Así que en la estructura que se está utilizando para almacenar las características de los primitivos gráficos, se le agregará un campo, que almacenará el índice de

refracción correspondiente al primitivo. Así, cuando se defina una escena, este nuevo dato será añadido a los ya mencionados.

Para el manejo de la transmisión especular se añadirá un procedimiento cuyo esquema es el siguiente:

OBTENER LOS DATOS NECESARIOS PARA EL CALCULO DEL VECTOR DE REFRACCION.

CALCULAR EL VECTOR DE REFRACCION.

LLAMAR AL PROCEDIMIENTO DE SEGUIMIENTO DE RAYOS PARA OBTENER LA INTENSIDAD PROVENIENTE DE LA DIRECCION DE REFRACCION.

El procedimiento para calcular el vector de refracción hará los cálculos en base a el índice de refracción, el vector incidente y el vector normal, para obtener la dirección de transmisión de acuerdo a la fórmula obtenida en el capítulo II, que establece que:

$$T = \eta_{11} I + (\eta_{11} \cos \theta_i - \sqrt{1 + \eta_{11}^2 (\cos^2 \theta_i - 1) }) N$$

donde: η_{11} es la razón entre el índice en el medio del rayo incidente y el índice en el medio del rayo transmitido

$$\cos \theta_i = N \cdot I$$

De esta forma con estos dos procedimientos y la modificación en la estructura de datos, el Modelo de Iluminación manejará el fenómeno de transmisión de la luz en objetos de materiales transparentes.

Por lo que nuestro modelo anterior se ve extendido por un término más, siendo el modelo final:

$$\begin{aligned}
 I(\lambda) = & [(N \cdot C_{\text{ENIT}} + k_1) k_2] I_A(\lambda) C(\lambda) \\
 & + K_d \sum_{n=1}^{n_1} S(n) \left[(1 - B_n) \frac{LP_n \cdot N}{|LP_n|^2} C(\lambda) + B_n \right] I_n(\lambda) \\
 & + K_s I_{\text{ref}}(\lambda) C(\lambda) \\
 & + K_t I_{\text{tra}}(\lambda)
 \end{aligned}$$

Una consideración extra que se tendría que hacer para que el manejo de iluminación adecuado, es que la función de sombra S_n , debe ser modificado para tener en cuenta que la iluminación que aporta una fuente de luz a un punto dado no es cero cuando ocurre el caso de que un objeto transparente esté en el camino del rayo de luz (a esto se le ha llamado manejo de sombras suaves).

CONCLUSIONES

Este trabajo tiene como objetivo establecer las bases necesarias para la elaboración de Modelos de Iluminación que puedan ser aplicables al proceso de Síntesis de Imagen, así como proporcionar un sistema computacional que permita la generación de imágenes utilizando dichos Modelos de Iluminación.

En cuanto al estudio de los Modelos de Iluminación se revisaron desde las técnicas para la generación de imágenes, hasta los métodos más recientes para la aplicación de Modelos de Iluminación. Todo esto con el fin de crear un marco completo alrededor de los Modelos de Iluminación que nos permitiera entender su problemática y las posibles mejoras que se podrían desarrollar.

Es importante mencionar que el estudio del proceso físico de la luz fué desarrollado de manera informal desde el punto de vista de la física, esto fué debido a que un mayor formalismo no era necesario para el estudio de los Modelos de Iluminación.

Por otra parte cuando se revisó el desarrollo de los Modelos de Iluminación, se incluyeron todas las técnicas y algunos de los modelos más relevantes que se han desarrollado hasta ahora, aunque el sistema que se desarrolló sólo utiliza una de las técnicas y por lo tanto no es posible emplear algunos de los modelos descritos, por ejemplo los modelos que emplean la técnica de Radiosidad.

Por lo que se refiere al sistema desarrollado cabe mencionar que no es un trabajo aislado ya que es parte del proyecto de investigación llamado "Síntesis de Imagen", el cual se lleva a cabo en el Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Este sistema tiene como objetivo generar imágenes con base en el método de Ray Tracing contando con la posibilidad de cambiar el Modelo de Iluminación empleado.

El sistema genera imágenes de muy buena calidad, aunque esto también depende del Modelo de Iluminación elegido y de los recursos disponibles para el despliegue de la imagen.

Hasta el momento en el sistema se han empleado modelos que en algunos casos distan mucho de proporcionar un aspecto real a las imágenes, esto se ha debido a dos causas principales:

- 1) La complejidad de los cálculos necesarios para la evaluación de un modelo más depurado, que en un equipo pequeño (PC o PS) resultan muy significativos en el tiempo requerido para generar una imagen, y
- 2) Las características de los dispositivos gráficos empleados, que limitan la cantidad de colores que se pueden emplear así como la resolución de la imagen.

No obstante estas limitaciones el sistema es capaz de manejar cualquier Modelo de Iluminación que utilice una técnica dependiente del observador.

Como una extensión futura a este sistema es posible incluir el manejo de técnicas independientes del observador (Radiosidad) para obtener mejores resultados al combinar la técnica ya existente con esta nueva.

Otra extensión podría ser el manejo de texturas las cuales proporcionan una mayor grado de realismo, y algún método para el modelado de objetos como CSG ("constructive solid geometry") o superficies generadas por Splines.

APENDICE A

CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS EN LOS CUALES SE HA EMPLEADO EL SISTEMA

Hasta el momento se han empleado tres equipos distintos:

IBM PS / 2, con sistema operativo DOS

IBM PC RT modelo 25, con sistema operativo AIX

SUN SPARC 1 STATION, con sistema operativo SunOS

Los sistemas AIX y SunOS son versiones del sistema operativo UNIX.

A continuación se dan algunas características de estos equipos y algunas observaciones con respecto a la ejecución del programa en ellos.

IBMPS/2

Estos equipos cuentan con una tarjeta gráfica MCGA o bien una VGA, las cuales nos permiten acceder un modo gráfico con una resolución de 320x200 pixel's con 256 colores simultáneos de una gama de 256K colores, en el cual se realiza el despliegue de la imagen generada.

En estos equipos se cuenta con 64 intensidades de luz en cada uno de sus tres cañones de luz (rojo,verde,azul), proporcionando 64 tonos de gris.

Las primeras pruebas del sistema fueron realizadas en un equipo PS/2 modelo 25 sin coprocesador matemático, por lo que llegó a tardar hasta 4 horas en generar una imagen. Las últimas imágenes generadas se han realizado en un modelo 60 con coprocesador

matemático y el tiempo necesario para generar una imagen dependiendo de su complejidad varía de 6 a 30 minutos.

Aún cuando las imágenes obtenidas son de una buena calidad, en los contornos de los objetos se notan una especie de escaleras (aliasing) debidas a la baja resolución de la imagen.

IBM PC RT MODELO 25

Esta es una estación de trabajo de arquitectura RISC la cual posee una velocidad de procesamiento bastante considerable, además de que sus características de despliegue son de mucho mayor resolución.

Cuenta con una resolución de 1024x1024 pixel's y 128 colores simultáneos de una gama de 4K colores, ya que solamente posee 16 intensidades de color por cada registro de color (en esta máquina es posible cambiar el modelo de color, pero sólo se utilizó el modelo RGB). El acceso a los recursos gráficos se hizo mediante graPHIGS que es un estándar para aplicaciones gráficas.

En este equipo la limitación es por el número de colores que se pueden utilizar en la generación de una imagen, produciendo bandas de Match en la imagen. Con esta resolución los contornos de los objetos ya se ven como curvas o líneas continuas.

El tiempo requerido para generar una imagen aún es muy grande en este equipo, pero esto es debido a la gran cantidad de pixel's que forman una imagen. Para generar una imagen consistente de 22 objetos de los cuales la mitad son definidos con superficies de espejo tardó 1 hora 15 minutos.

SUN SPARC 1 STATION

Esta es la máquina más rápida en la que se ha probado el sistema. Cuenta con una velocidad de proceso de 12.5 MIPS (millones de instrucciones por segundo) y posee una resolución de 1152x900 pixel's con 256 colores simultáneos de una gama de 16M colores, permitiendo tener una gama de 256 tonos de gris. El acceso a el modo gráfico se realiza mediante PIXRECT.

En este equipo se combinan las características de la capacidad de color de las PS con la resolución de la PC RT permitiendo generar imágenes de una calidad muy superior a las generadas con los otros equipos, además de que por su velocidad es posible utilizar modelos de iluminación más complejos y generar escenas mas elaboradas.

Como comparación de tiempo se tiene el caso de una escena que consta de 2 objetos uno de ellos transparente. El tiempo requerido para generar la imagen fué de casi 6 minutos en la SUN SPARC y un poco más de 6 minutos en la PS modelo 60, esto quiere decir que la SUN SPARC genera imágenes 12 veces más rápido que la PS, porque mientras la PS calcula 64,000 puntos para una imagen la SUN SPARC tiene que calcular 1,036,800 puntos.

GLOSARIO DE TERMINOS

Aliasing: efecto causado por tratar de representar en una muestra discreta una señal continua la cual contiene elementos muy finos de detalle y que no son representables en la muestra. El efecto visual más común es una especie de escalera que se forma en las aristas de objetos.

Método de radiocidad: un método para calcular la aproximación de la iluminación indirecta dentro de un medio basado en el equilibrio de energía en un medio cerrado.

Motion Blur: (movimiento borroso) es el efecto producido en las fotografías de objetos en movimiento el cual resulta de que el lente de la cámara está abierto por un período de tiempo finito.

Pixel: una abreviación del término "picture element". La superficie de despliegue está constituida de cierto número de líneas, cada una de las cuales está dividida en algún número de partes discretas, cada una de éstas partes es un pixel.

Radiosidad: (radiosity) es el flujo total de luz que sale de una superficie, incluyendo la luz emitida, la reflejada y la transmitida.

Ray Tracing: (Seguimiento de rayos) una familia de algoritmos para realizar el cálculo de superficies visibles que está basada en la técnica de trazar rayos individuales a través del medio.

Renderizar (recubrimiento) el proceso de convertir la descripción de una escena en los valores de color de cada pixel para una superficie de despliegue.

Scan lines: la línea horizontal de ancho finito en las que es dividido el dispositivo de despliegue así como el plano de la imagen.

Síntesis de imagen: la parte de la graficación por computadora que se encarga de producir imágenes de aspecto real. La síntesis de imagen incluye iluminación, formación de la imagen y sombreado.

Facet : pequeños segmentos planos de superficie con los cuales se puede modelar una superficie más compleja.

NOTA: ALGUNOS TERMINOS APARECEN EN INGLES DADO QUE NO EXISTE UNA TRADUCCION UNICA PARA ELLOS, ASI QUE PARA NO CREAR CONFUSION EN LOS CONCEPTOS, SE UTILIZA EL NOMBRE EN INGLES.