Gráficos por Ordenador

Proyecto de la Asignatura - NPRs

Autores:

Eric García Arribas

Rubén Llorente Canet

Lucas Martín Gil-Delgado

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Índice

Introducción

Esta es la memoria del Proyecto 2024 Modelos de iluminación NPR (Non Photorealistic Rendering) de Grafico por Ordenador. En esta se describirán las bases sobre las que nos hemos basado a la hora de construir estos distintos modelos de iluminación (los indicados en el enunciado, Phong, Blinn-Phong, Resaltado de silueta y Toon Shading, además de los escogidos por nuestro grupo que son Stippling, Painterly Rendering y Píxel Rendering). Además, se incluye una descripción sobre la ejecución del programa y las distintas funcionalidades que se pueden llegar a hacer en la visualización como el cambio de modelo o el giro de cámara. Finalmente se mencionará brevemente como hemos logrado cargar objetos con formato .obj.

Modelo de iluminación de Phong

Procesado en CPU y GPU

El proceso del programa del modelo de iluminación Phong comienza en la CPU con la carga del modelo 3D, donde se importan los datos de vértices, normales y texturas en la memoria. Las texturas también se cargan desde el disco y se almacenan en la memoria de la CPU. Además, se compilan los shaders y se configuran las variables uniformes necesarias. En la GPU, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices utilizando las matrices **M** y **PV**, ajusta las normales del modelo y calcula el vector desde el vértice hacia la cámara. En el Fragment Shader, las normales interpoladas se normalizan y se calcula la iluminación difusa y especular usando el modelo de Phong. Finalmente, se aplica la textura y se multiplica por la iluminación total.

Especificación del modelo

El modelo de iluminación de Phong es un modelo empírico que se utiliza en la programación de gráficos 3D para simular cómo se comporta la luz al iluminar la superficie de un objeto tridimensional.

El modelo de iluminación Phong se basa en tres componentes básicos:

1. Componente ambiental: Luz que viene rebotada de todas las direcciones e ilumina todas las caras del objeto y se calcula como $A=K_a * C_a$, siendo K_a el factor de luz ambiente y C_a el color de la luz ambiente
2. Componente difusa: Luz que llega directamente desde la fuente de luz, pero rebota en todas direcciones. Se calcula como $D= K_d*C_l*\cos(\theta)$ donde K_d es el factor de luz difusa, C_l el color de la luz y $\cos(\theta)$ es igual a $\max(0,N*L)$ siendo N la normal de la superficie y L el vector de dirección de donde viene la luz.
3. Componente especular: La luz que llega directamente de la fuente de luz y rebota en una sola dirección, según la normal de la superficie. Se calcula como $S= K_s*C_l*\cos(\alpha)^n$ donde K_s es el factor de luz especular, C_l el color de la luz, n el coeficiente de brillo y $\cos(\alpha)^n$ es igual a $\max(0,R*V)^n$ siendo R el vector de la luz reflejada y V el vector que va desde la superficie del objeto hacia el observador.

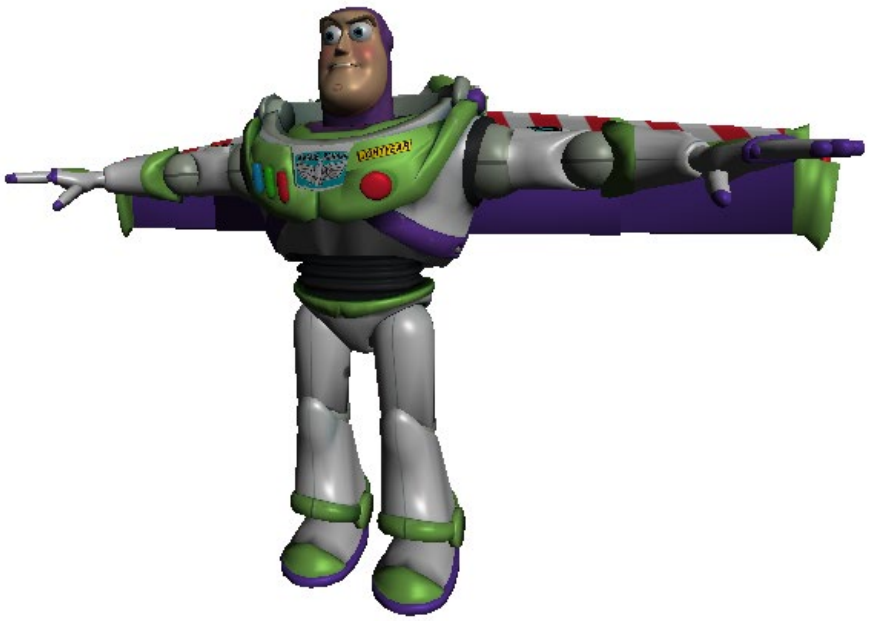
Para calcular la iluminación final de Phong basta con calcular la suma de las 3 componentes I=A+D+S.

Trasladado a código se vería de la siguiente manera:

```
// Vertex Shader de Phong

const char* vertex_prog1 = GLSL(
    layout(location = 0) in vec3 pos; // Posición del vértice
layout(location = 1) in vec3 normal; // Normal del vértice
layout(location = 2) in vec2 uv; // Coordenadas UV del vértice
layout(location = 3) in float texIndex; // Índice de la textura
out vec3 n; // Normal transformada
out vec2 UV; // Coordenadas UV a pasar al fragment shader
out vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara
flat out int TexIndex; // Índice de la textura a pasar al fragment
shader
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección y vista
uniform mat4 M; // Matriz de modelo

void main() {
    gl_Position = PV * M * vec4(pos, 1); // Transformación del vértice

    mat3 M_adj = mat3(transpose(inverse(M))); // Matriz de adjunta de
la matriz de modelo
    n = M_adj * normal; // Transformación de la normal

    vec4 vertex_position_scene = M * vec4(pos, 1.0);
    vec3 pos_scene = vec3(vertex_position_scene); // Posición del
vértice en el espacio de la escena
    v = normalize(campos - pos_scene); // Vector desde el vértice a la
cámara
    UV = uv; // Pasar coordenadas UV
    TexIndex = int(texIndex); // Convertir índice de textura de float
a int
}
);

// Phong - Fragment Shader
const char* fragment_prog1 = GLSL(
    in vec3 n; // Normal interpolada
in vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara interpolado
in vec2 UV; // Coordenadas UV interpoladas
flat in int TexIndex; // Índice de la textura
float ilu; // Factor de iluminación
uniform vec3 luz = vec3(1, 1, 0) / sqrt(2.0f); // Dirección de la luz
uniform sampler2D textures[16]; // Array de texturas

void main() {
    vec3 nn = normalize(n); // Normalizar la normal

    vec3 r = reflect(-luz, nn); // Calcular el vector reflejado

    float spec_intensity = max(dot(r, v), 0.0); // Intensidad
especular
    float spec_component = pow(spec_intensity, 16.0); // Componente
especular

    float difusa = max(dot(luz, nn), 0.0); // Componente difusa
    ilu = (0.1 + 0.6 * difusa + 0.3 * spec_component); // Suma de
componentes de iluminación
```

```
    gl_FragColor = texture(textures[TexIndex], UV); // Aplicar textura
    gl_FragColor = gl_FragColor * ilu; // Modificar color por factor
de iluminación
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:



Modelo de iluminación de Blinn-Phong

Procesado en CPU y GPU

En la implementación del modelo de iluminación Blinn-Phong, la CPU se encarga de nuevo de cargar el modelo 3D y las texturas en la memoria, además de compilar los shaders y configurar las variables uniformes necesarias. El proceso será similar para los siguientes shaders con respecto a lo que se prepare en el lado de la CPU. En la GPU, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices, ajusta las normales y calcula el vector desde el vértice hacia la cámara, de manera similar al Phong Shader. En el Fragment Shader, se utiliza el modelo Blinn-Phong para calcular la iluminación, empleando el vector **halfVector** para la componente especular. La textura se aplica de manera similar, pero con ajustes específicos para la iluminación especular.

Especificación del modelo

El modelo de iluminación de Blinn-Phong es una variante del modelo de iluminación de Phong. La principal diferencia entre el modelo de Phong y el de Blinn-Phong radica en cómo se calcula la reflexión especular. En lugar de usar el vector de reflexión R en el modelo de Phong, el modelo de Blinn-Phong introduce el concepto de un vector medio H, que se calcula como la mitad del vector de reflexión de esta forma: H = (L + V) / |L + V| aproximado como (L + V) / 2

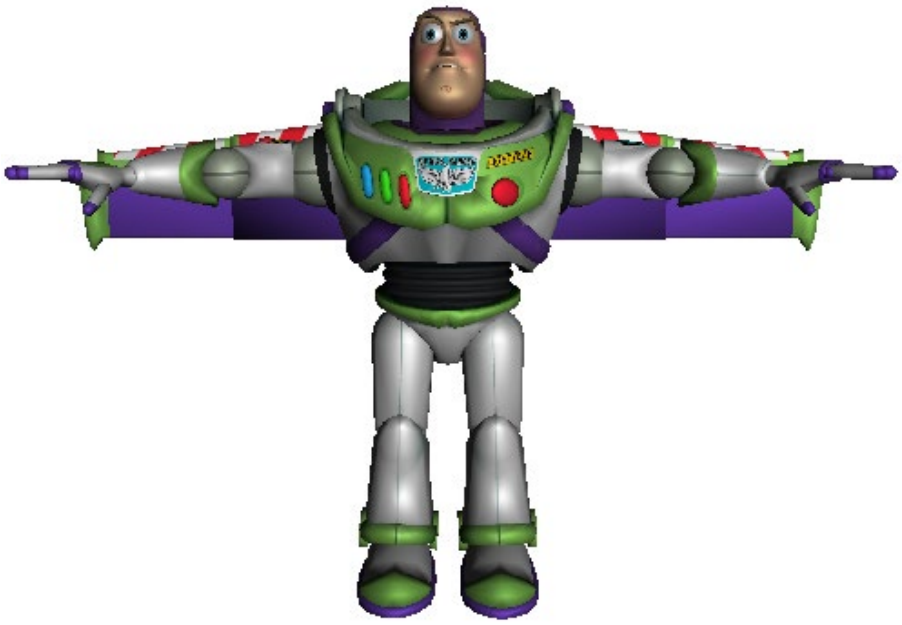
El problema con el modelo de Phong es que el ángulo entre el vector de vista y el de reflexión tiene que ser menor que 90º, para ello el modelo de Blinn-Phong calcula el vector medio H para poder calcular la luz especular incluso cuando el vector es mayor de 90º.

La implementación de Blinn-Phong en código quedaría de la siguiente manera:

```
// Vertex Shader de Bling-Phong
const char* vertex_prog2 = GLSL(
    layout(location = 0) in vec3 pos; // Posición del vértice
layout(location = 1) in vec3 normal; // Normal del vértice
layout(location = 2) in vec2 uv; // Coordenadas UV del vértice
layout(location = 3) in float texIndex; // Índice de la textura
out vec3 n; // Normal transformada
out vec2 UV; // Coordenadas UV a pasar al fragment shader
out vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara
flat out int TexIndex; // Índice de la textura a pasar al fragment
shader
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara
uniform mat4 M; // Matriz de modelo
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección y vista

void main() {
    gl_Position = PV * M * vec4(pos, 1); // Transformación del vértice

    mat3 M_adj = mat3(transpose(inverse(M))); // Matriz adjunta de la
matriz de modelo
    n = M_adj * normal; // Transformación de la normal

    vec4 vertex_position_scene = M * vec4(pos, 1.0);
    vec3 pos_scene = vec3(vertex_position_scene); // Posición del
vértice en el espacio de la escena
    v = normalize(campos - pos_scene); // Vector desde el vértice a la
cámara
    UV = uv; // Pasar coordenadas UV
    TexIndex = int(texIndex); // Convertir índice de textura de float
a int
}
);

// Bling-Phong - Fragment Shader
const char* fragment_prog2 = GLSL(
    in vec3 n; // Normal interpolada
in vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara interpolado
in vec2 UV; // Coordenadas UV interpoladas
flat in int TexIndex; // Índice de la textura
float ilu; // Factor de iluminación
uniform vec3 luz = vec3(1, 1, 0) / sqrt(2.0f); // Dirección de la luz
uniform sampler2D textures[16]; // Array de texturas
vec3 halfVector;  // Half-angle vector

void main() {
    halfVector = normalize(luz + v); // Calcular el vector de mitad de
ángulo

    vec3 nn = normalize(n); // Normalizar la normal

    float spec_intensity = max(dot(nn, halfVector), 0.0); //
Intensidad especular
```

```
    float spec_component = pow(spec_intensity, 16.0); // Componente
especular

    float difusa = dot(luz, nn); // Componente difusa
    if (difusa < 0) difusa = 0;
    ilu = (0.1 + 0.6 * difusa + 0.3 * spec_component); // Suma de
componentes de iluminación

    gl_FragColor = texture(textures[TexIndex], UV); // Aplicar textura
    gl_FragColor = gl_FragColor * ilu; // Modificar color por factor
de iluminación
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:



Resaltado de la silueta

Procesado en CPU y GPU

En este programa, en la GPU, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices, ajusta las normales y calcula el vector desde el vértice hacia la cámara. En el Fragment Shader, se calcula el ángulo entre la normal y la dirección de vista. Si el ángulo está en un rango específico, se dibuja la silueta en negro; de lo contrario, se aplica la textura, logrando así el efecto de resaltado de silueta.

Especificación del modelo

El resaltado de silueta es una técnica utilizada para enfatizar los bordes o contornos de un objeto tridimensional. El resaltado de silueta se logra generalmente dibujando líneas a lo largo de los bordes de un objeto.

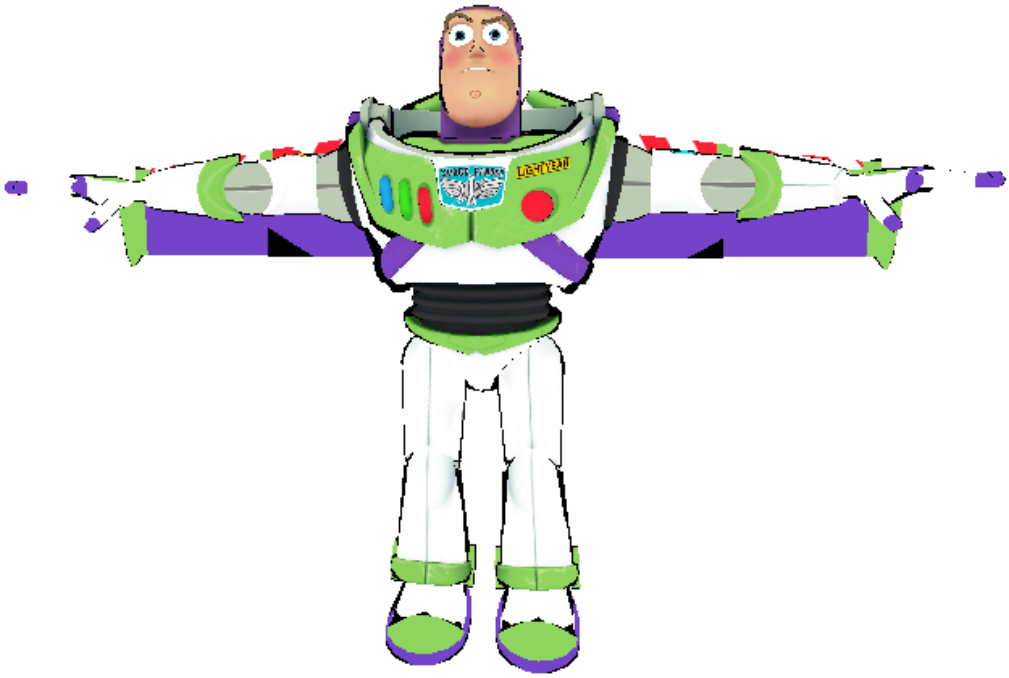
Existen múltiples técnicas para lograrlo, pero nosotros hemos optado por utilizar el vector V y N para dibujar de negro las superficies que generen un ángulo de reflexión entre 75º y 100º. Este ángulo se consigue mediante la operación |VxN|.

La implementación del resaltado de la silueta en código quedaría de la siguiente manera:

```
// Vertex Shader de Resaltado de Silueta
const char* vertex_prog3 = GLSL(
    layout(location = 0) in vec3 pos; // Posición del vértice
layout(location = 1) in vec3 normal; // Normal del vértice
layout(location = 2) in vec2 uv; // Coordenadas UV del vértice
layout(location = 3) in float texIndex; // Índice de la textura
out vec3 n; // Normal transformada
out vec2 UV; // Coordenadas UV a pasar al fragment shader
out vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara
flat out int TexIndex; // Índice de la textura a pasar al fragment
shader
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara
uniform mat4 M; // Matriz de modelo
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección y vista

void main() {
    gl_Position = PV * M * vec4(pos, 1); // Transformación del vértice
    mat3 M_adj = mat3(transpose(inverse(M))); // Matriz adjunta de la
matriz de modelo
    n = M_adj * normal; // Transformación de la normal

    vec4 vertex_position_scene = M * vec4(pos, 1.0);
    vec3 pos_scene = vec3(vertex_position_scene); // Posición del
vértice en el espacio de la escena
    v = normalize(campos - pos_scene); // Vector desde el vértice a la
cámara
    UV = uv; // Pasar coordenadas UV
    TexIndex = int(texIndex); // Convertir índice de textura de float
a int
}
);

// Resaltado de Silueta - Fragment Shader
const char* fragment_prog3 = GLSL(
    in vec3 n; // Normal interpolada
```

```
in vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara interpolado
in vec2 UV; // Coordenadas UV interpoladas
flat in int TexIndex; // Índice de la textura
uniform sampler2D textures[16]; // Array de texturas

void main() {
    vec3 nn = normalize(n); // Normalizar la normal
    float angle = degrees(acos(max(dot(nn, v), 0.0))); // Calcular el
ángulo entre la normal y la vista

    if (angle >= 75.0 && angle <= 100.0) {
        gl_FragColor = vec4(0.0, 0.0, 0.0, 1.0); // Silueta negra
    }
    else {
        gl_FragColor = texture(textures[TexIndex], UV); // Aplicar
textura
    }
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:



Sombreado Toon

Procesado en CPU y GPU

Para el sombreado Toon (o Toon Shading), en la GPU, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices, ajusta las normales, calcula el vector desde el vértice hacia la cámara y la posición del vértice en la escena. En el Fragment Shader, se calcula la iluminación difusa y especular, y se aplica una cuantización para lograr el efecto de sombreado toon. La textura se aplica y se ajusta la iluminación para crear el efecto de sombreado característico.

Especificación del modelo

El sombreado Toon es un estilo que se utiliza comúnmente para imitar el estilo de los cómics o dibujos animados. Se caracteriza por una reducción del posible conjunto de valores que puedan tomar los colores a lo que se le llama como “niveles de color”. El único cambio necesario para lograr este efecto con respecto a Blinn-Phong es establecer estos “niveles de color” con una división de la luz especular y la difusa entre el numero de niveles deseado. Esto consigue que, en vez de un cambio gradual de la luz a lo largo de la superficie, solo están X numero de umbrales posibles que serán el número de niveles.

La implementación del Sombreado Toon en código quedaría de la siguiente manera:

```
// Vertex Shader de Toon Shading
const char* vertex_prog4 = GLSL(
    layout(location = 0) in vec3 pos; // Posición del vértice
layout(location = 1) in vec3 normal; // Normal del vértice
layout(location = 2) in vec2 uv; // Coordenadas UV del vértice
layout(location = 3) in float texIndex; // Índice de la textura
out vec3 n; // Normal transformada
out vec2 UV; // Coordenadas UV a pasar al fragment shader
out vec3 pos_scene; // Posición del vértice en el espacio de la escena
out vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara
flat out int TexIndex; // Índice de la textura a pasar al fragment
shader
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara
uniform mat4 M; // Matriz de modelo
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección y vista

void main() {
    vec4 worldPosition = M * vec4(pos, 1.0);
    gl_Position = PV * worldPosition; // Transformación del vértice

    mat3 M_adj = mat3(transpose(inverse(M))); // Matriz adjunta de la
matriz de modelo
    n = M_adj * normal; // Transformación de la normal

    pos_scene = worldPosition.xyz; // Posición del vértice en el
espacio de la escena
    v = normalize(campos - pos_scene); // Vector desde el vértice a la
cámara
    UV = uv; // Pasar coordenadas UV
    TexIndex = int(texIndex); // Convertir índice de textura de float
a int
}
);
```

```
// Toon Shading - Fragment Shader
const char* fragment_prog4 = GLSL(
    in vec3 n; // Normal interpolada
in vec3 v; // Vector desde el vértice a la cámara interpolado
in vec2 UV; // Coordenadas UV interpoladas
in vec3 pos_scene; // Posición del vértice en el espacio de la escena
interpolada
flat in int TexIndex; // Índice de la textura
float ilu; // Factor de iluminación
uniform vec3 luz = vec3(1, 1, 0) / sqrt(2.0f); // Dirección de la luz
uniform sampler2D textures[16]; // Array de texturas

void main() {
    vec3 nn = normalize(n); // Normalizar la normal
    vec3 luz_final = normalize(luz - pos_scene); // Normalizar la luz
final
    vec3 v_final = normalize(v); // Normalizar la vista final
    vec3 r = reflect(-luz, nn); // Calcular el vector reflejado

    float spec_intensity = max(dot(r, v_final), 0.0); // Intensidad
especular
    float spec = pow(spec_intensity, 16.0); // Componente especular
    spec = floor(spec * 3.0) / 3.0; // Ajuste de la especular

    float difusa_aux = max(dot(luz, nn), 0.0); // Componente difusa
auxiliar
    difusa_aux = floor(difusa_aux * 5.0) / 5.0; // Ajuste de la difusa
auxiliar
    vec3 baseColor = texture(textures[TexIndex], UV).rgb; // Color
base
    vec3 ambiente = 0.1 * baseColor; // Color ambiente
    vec3 difusa = difusa_aux * baseColor; // Color difuso
    vec3 specular = baseColor * spec; // Color especular
    gl_FragColor = vec4(ambiente + difusa + specular, 1.0); // Color
final
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:

Stippling

Procesado en CPU y GPU

Para este programa del proceso de Stippling, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices, ajusta las normales y calcula el vector desde el vértice hacia la cámara. En el Fragment Shader, se calcula la iluminación difusa y especular, y se convierte la iluminación resultante a escala de grises, habiendo implementado un modelo de iluminación Blinn-Phong sobre el shader. Luego, se aplica un patrón de punteado basado en la detección de bordes y la variación local de la textura, creando así el efecto de punteado.

Especificación del modelo

El Stippling es una técnica que utiliza pequeños círculos o puntos del mismo color para crear una imagen reconocible. El propósito del Stippling es crear la impresión de luces y sombras en una obra de arte, ya que se puede representar un rango completo de valores con la disposición de los puntos.

Para lograrlo, primero se establece un patrón de punteado en una matriz 4x4. Después de calcular todos los tipos de iluminaciones convertimos el color base de la escena a escala de grises.

Se usa el operador de Sobel para detectar bordes en la textura. Esto implica tomar muestras de la textura en varias direcciones alrededor del fragmento actual y aplicar una matriz de Sobel para calcular un valor de detección de bordes. El resultado de la detección de bordes se invierte para que los bordes fuertes tengan valores cercanos a 1.0 y las áreas planas tengan valores cercanos a 0.0.

Se calcula la variación local en la textura tomando muestras en un área pequeña alrededor del fragmento actual (en los pixeles colindantes al actual) y comparando esos valores con la luminancia del fragmento actual. Este valor de variación se usa para ajustar el umbral del punteado.

A continuación, calculamos un umbral ajustado basado en la variación local.

Por último, para determinar el color del fragmento comprobamos si el valor de detección es menor que el del punteado multiplicado por el umbral para pintarlo de negro o, en caso contrario, de blanco.

La implementación del Stippling en código quedaría de la siguiente manera:

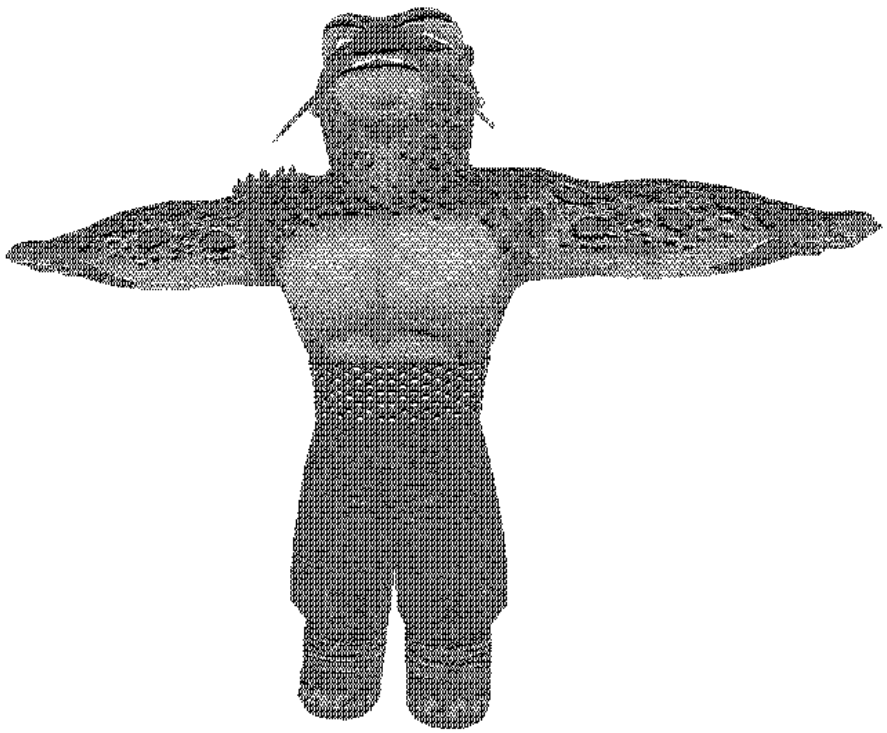
```
/* Vertex Shader de Stippling */
const char* vertex_prog5 = GLSL(
    layout(location = 0) in vec3 pos;               // Posición del
vértice
layout(location = 1) in vec3 normal;            // Normal del vértice
layout(location = 2) in vec2 uv;                // Coordenadas de
textura
layout(location = 3) in float texIndex;         // Índice de textura
out vec3 n;                                     // Normal del vértice
para el fragmento
out vec2 UV;                                    // Coordenadas de
textura para el fragmento
out vec3 v;                                     // Vector de vértice a
cámara para el fragmento
flat out int TexIndex;                          // Índice de textura
para el fragmento (sin interpolación)
uniform vec3 campos;                            // Posición de la
cámara en coordenadas del mundo
uniform mat4 M;                                 // Matriz de modelo
uniform mat4 PV;                                // Matriz de
proyección y vista

void main() {
    vec4 worldPosition = M * vec4(pos, 1.0);        // Calcula la
posición del vértice en el espacio del mundo
    gl_Position = PV * worldPosition;               // Transforma la
posición del vértice a coordenadas de clip

    mat3 M_adj = mat3(transpose(inverse(M)));       // Calcula la
matriz de la inversa y transpuesta de la matriz de modelo
    n = normalize(M_adj * normal);                  // Calcula la
normal del vértice en el espacio del mundo

    vec3 pos_scene = vec3(worldPosition);           // Calcula la
posición del vértice en el espacio de la escena
    v = normalize(campos - pos_scene);              // Calcula el
vector del vértice a la cámara
    UV = uv;                                        // Pasa las
coordenadas de textura al fragmento
    TexIndex = int(texIndex);                       // Pasa el índice
de textura al fragmento
}
);

// Stippling - Fragment Shader
const char* fragment_prog5 = GLSL(
```

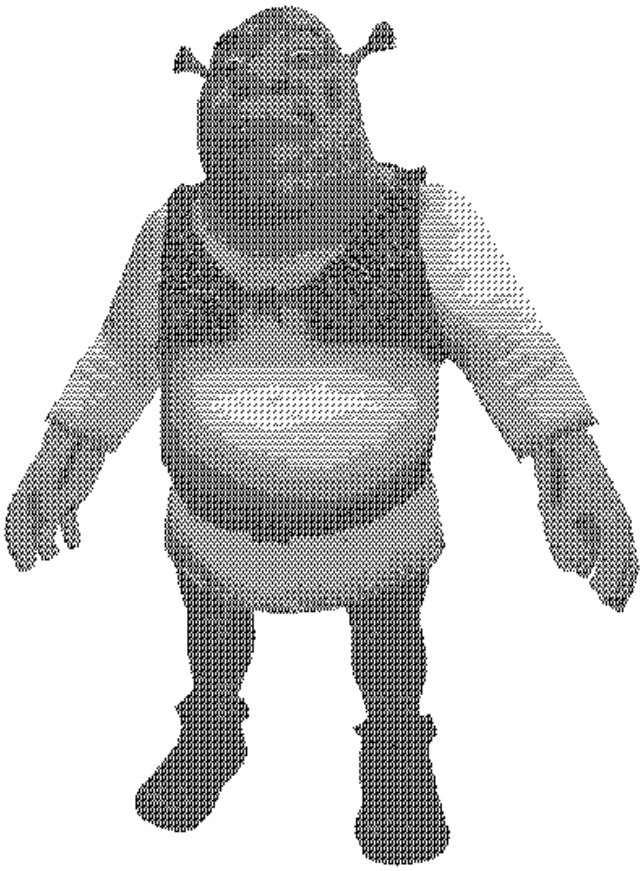
```
    uniform sampler2D textures[16];  // Arreglo de muestreadores de
texturas
    uniform vec3 luz;  // Dirección de la luz
    uniform vec3 lightPos;  // Posición de la luz
    uniform float umbral = 1.45; // Umbral para el punteado

    in vec3 n;  // Vector normal
    in vec3 v;  // Vector de vista
    in vec2 UV;  // Coordenadas UV
    flat in int TexIndex;  // Índice para el arreglo de texturas
    out vec4 col;  // Color de salida

    // Matriz de umbrales para el patrón de punteado
    const float stipplePattern[16] = float[16](
        0.0, 0.6, 0.3, 0.8,
        1.0, 0.4, 0.9, 0.5,
        0.7, 1.0, 0.2, 0.6,
        0.3, 0.8, 0.4, 0.9
    );

    void main() {
        vec3 nn = normalize(n);  // Normalizar el vector normal
        vec3 lightDir = normalize(luz - v);  // Calcular la dirección
de la luz

        float diff = max(dot(nn, lightDir), 0.0);  // Componente
difusa
        vec3 diffuse = diff * texture(textures[TexIndex], UV).rgb;  //
Aplicar textura a la luz difusa

        vec3 viewDir = normalize(-v);  // Dirección de vista
        vec3 reflectDir = reflect(-lightDir, nn);  // Dirección de
reflexión
        float spec = pow(max(dot(viewDir, reflectDir), 0.0), 16.0);
// Componente especular
        vec3 specular = spec * texture(textures[TexIndex], UV).rgb;
// Aplicar textura a la luz especular

        vec3 baseColor = texture(textures[TexIndex], UV).rgb;  //
Color base de la textura
        vec3 result = (0.1 * baseColor) + diffuse + specular;  //
Combinar color base, difuso y especular

        // Convertir a escala de grises
        float luminance = dot(result, vec3(0.299, 0.587, 0.114));

        // Detección de bordes usando el filtro Sobel
        vec2 texelSize = vec2(1.0) / textureSize(textures[TexIndex],
0);
        float edgeDetection = 0.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).r * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, -1)).r * -2.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).r * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).r * 1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, 1)).r * 2.0;
```

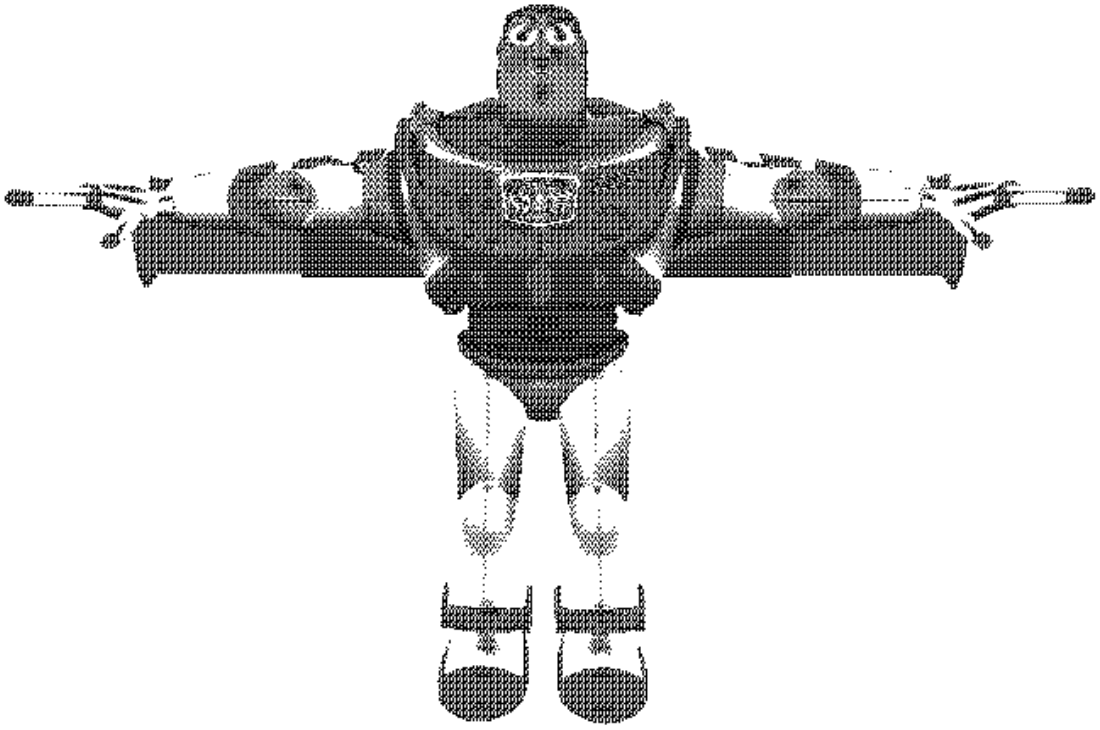
```
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).r * 1.0;

        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).b * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, -1)).b * -2.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).b * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).b * 1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, 1)).b * 2.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).b * 1.0;

        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).g * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, -1)).g * -2.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).g * -1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).g * 1.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(0, 1)).g * 2.0;
        edgeDetection += texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).g * 1.0;

        edgeDetection = 1.0 - edgeDetection / 4;

        // Calcular la variación local de la textura
        float variation = 0.0;
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).r - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).r - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).r - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).r - luminance);

        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).g - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).g - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).g - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).g - luminance);

        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, -1)).b - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, -1)).b - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(-1, 1)).b - luminance);
        variation += abs(texture(textures[TexIndex], UV + texelSize *
vec2(1, 1)).b - luminance);
        variation /= (4.0 * 3); // Promedio de la variación
```

```
        // Ajustar el umbral del patrón de punteado basado en la
variación
        float adjustedThreshold = mix(umbral, 0.5, variation);

        // Aplicar el patrón de punteado basado en la detección de
bordes y la variación local
        int x = int(mod(gl_FragCoord.x, 4.0));
        int y = int(mod(gl_FragCoord.y, 4.0));
        int index = x + y * 4;
        float threshold = stipplePattern[index];

        if (edgeDetection < threshold * adjustedThreshold) {
            col = vec4(0.0, 0.0, 0.0, 1.0); // Negro
        }
        else {
            col = vec4(1.0, 1.0, 1.0, 1.0); // Blanco
        }
    }
);
```

Y nos daría resultados como estos:







Painterly Rendering

Procesado en CPU y GPU

Para este programa, en la GPU, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices y transmite las coordenadas de textura y el índice de textura al Fragment Shader. En este último shader, se promedian los colores de la textura dentro del área del pincel y se calcula la variación de color en cada cuadrante. El cuadrante con la menor variación se selecciona y el color promedio de ese cuadrante se establece como el color del fragmento, logrando así un efecto artístico.

Especificación del modelo

El Painterly Rendering es una técnica de renderizado no fotorrealista que busca imitar el estilo de las pinturas hechas a mano. Este enfoque se basa en la idea de que una pintura se construye a partir de una serie de pinceladas. En lugar de tratar cada píxel de una textura de forma individual, Painterly Rendering trata de representar la imagen como una serie de pinceladas. Estas pinceladas se consiguen a través de las siguientes operaciones realizadas en el fragmentador:

- Sobre el píxel actual que procesa el fragmentador se toman 4 matrices de pixeles del tamaño de “brocha” escogido más 1, es decir, (brocha+1)X(brocha+1). Las matrices son (respecto al píxel actual): superior izquierda y derecha e inferior izquierda y derecha.
- Para cada matriz, se suma el valor de todos sus pixeles, además, se suma también en otra variable el cuadrado de dichos valores de cada matriz.

- Por último, se evalúa el cuadrante cuya varianza es menor para dar una apariencia de suavizado (como cuando se pinta). Para lograrlo, se calcula el promedio de los valores de los pixeles de cada matriz y con el promedio se obtiene la varianza, en caso de ser menor que el valor mínimo de varianza encontrado actualmente se establece como color definitivo para el píxel actual el promedio de los pixeles de la matriz con menor varianza.

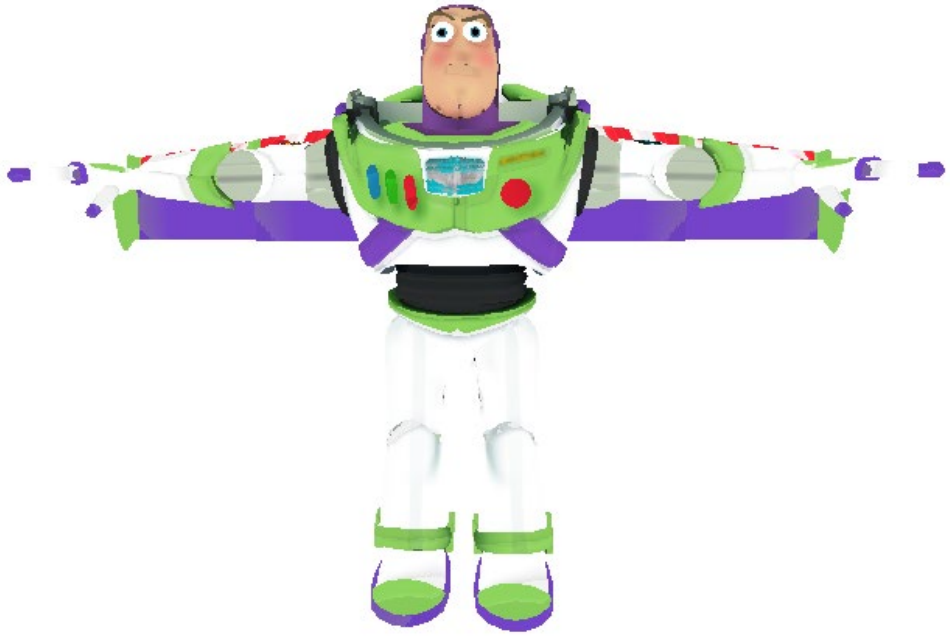
La implementación del Painterly Rendering en código quedaría de la siguiente manera:

```
/* Vertex Shader de Painterly y Pixel Rendering */
const char* vertex_prog6 = GLSL(
    // Entrada del vértice: posición
    layout(location = 0) in vec3 pos;
// Entrada del vértice: normal
layout(location = 1) in vec3 normal;
// Entrada del vértice: coordenadas de textura
layout(location = 2) in vec2 uv;
// Entrada del vértice: índice de la textura
layout(location = 3) in float texIndex;

// Salida plana del índice de textura hacia el fragment shader
flat out int TexIndex;
// Salida de las coordenadas de textura hacia el fragment shader
out vec2 UV;

// Uniformes: posición de la cámara y matrices de transformación
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara en coordenadas del mundo
uniform mat4 M; // Matriz de modelo
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección-vista

void main()
{
    // Convertir el índice de textura a entero y pasarlo al fragment
shader
    TexIndex = int(texIndex);
    // Pasar las coordenadas de textura al fragment shader
    UV = uv;
    // Calcular la posición del vértice en el espacio del mundo
    vec4 worldPosition = M * vec4(pos, 1.0);
    // Calcular la posición final del vértice en el espacio de
pantalla
    gl_Position = PV * worldPosition;
}
);


// Painterly Rendering - Fragment Shader
const char* fragment_prog6 = GLSL(
    // Entrada plana del índice de textura desde el vertex shader
    flat in int TexIndex; // Índice de la textura actual.
// Entrada de las coordenadas de textura desde el vertex shader
in vec2 UV; // Coordenadas de textura.

// Uniforme: array de texturas
uniform sampler2D textures[16];
// Uniforme: tamaño del pincel
uniform int brushSize; // Tamaño del pincel.

// Arrays para acumular los colores y los cuadrados de los colores
```

```
vec3 coloresCuadrante[4]; // Array para acumular los colores
promediados.
vec3 cuadradoCuadrantes[4]; // Array para acumular los cuadrados de
los colores.

// Función para acumular colores en los cuadrantes
void cuadrante_pintar(in vec2 UV, in vec2 texSize, int brushSize) {
    // Iterar sobre un área cuadrada alrededor del pixel actual
    for (int i = -brushSize; i <= brushSize; i++) {
        for (int j = -brushSize; j <= brushSize; j++) {
            // Obtener el color de la textura en la posición
desplazada
            vec3 texColor = texture2D(textures[TexIndex], UV + vec2(i,
j) / texSize).rgb;
            // Determinar el cuadrante correspondiente
            int quadrant = (i <= 0 ? 0 : 2) + (j <= 0 ? 0 : 1);
            // Acumular el color y el cuadrado del color en el
cuadrante correspondiente
            coloresCuadrante[quadrant] += texColor;
            cuadradoCuadrantes[quadrant] += texColor * texColor;
        }
    }
}

void main()
{
    // Obtener el tamaño de la textura en píxeles
    vec2 texSize = textureSize(textures[TexIndex], 0);

    // Calcular el área del pincel al cuadrado
    float brushSizeSquare = float((brushSize + 1) * (brushSize + 1));

    // Inicializar los arrays a cero
    for (int k = 0; k < 4; k++) {
        coloresCuadrante[k] = vec3(0.0);
        cuadradoCuadrantes[k] = vec3(0.0);
    }

    // Acumular colores y cuadrados de colores en los cuadrantes
    cuadrante_pintar(UV, texSize, brushSize);

    // Variable para almacenar el valor mínimo de la suma de los
cuadrados de los colores
    float minColor = 1.0;

    // Calcular el color promedio y la variación en cada cuadrante
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        // Promediar los colores acumulados en el cuadrante
        coloresCuadrante[i] /= brushSizeSquare;
        // Calcular la variación de color en el cuadrante
        cuadradoCuadrantes[i] = abs(cuadradoCuadrantes[i] /
brushSizeSquare - coloresCuadrante[i] * coloresCuadrante[i]);

        // Sumar las variaciones de color en los tres canales (r, g,
b)
        float sumColorSquare = cuadradoCuadrantes[i].r +
cuadradoCuadrantes[i].g + cuadradoCuadrantes[i].b;

        // Determinar el cuadrante con la menor variación de color
        if (sumColorSquare < minColor) {
            minColor = sumColorSquare;
```

```
            // Asignar el color del cuadrante con la menor variación
al color del fragmento
            gl_FragColor = vec4(coloresCuadrante[i], 1.0);
        }
    }
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:



Pixel rendering

Procesado en CPU y GPU

En el Pixel Rendering, el Vertex Shader transforma las posiciones de los vértices y transmite las coordenadas de textura y el índice de textura al Fragment Shader. En este shader, se ajustan las coordenadas de textura para crear un efecto de pixelación al agrupar los fragmentos en bloques y asignarles el mismo color de textura. Esto resulta en un efecto visual de pixelación, donde cada bloque de píxeles tiene un color uniforme basado en la textura original.

Especificación del modelo

La técnica de pixel rendering implica renderizar la textura en base a un numero de pixeles horizontales y verticales especificados los cuales tienen que ser menores que el numero de pixeles que se tenia originalmente en dicha textura. De esta forma se consigue "pixelizar" la textura haciéndola menos detallada y más "pixel art". Para lograrlo, establecemos 2 variables que nos permitirán indicar a partir de que "pixel" miramos el siguiente pixel de la textura original, es decir, a partir del número de pixeles empezamos a colorear el pixel actual con el siguiente pixel de la textura original. Esto hará que hagamos X grupos de pixeles colindantes con el mismo valor que en la textura original tenían distintos valores.

La implementación del Pixel Rendering en código quedaría de la siguiente manera:

```
/* Vertex Shader de Painterly y Pixel Rendering */
const char* vertex_prog6 = GLSL(
    // Entrada del vértice: posición
    layout(location = 0) in vec3 pos;
// Entrada del vértice: normal
layout(location = 1) in vec3 normal;
// Entrada del vértice: coordenadas de textura
layout(location = 2) in vec2 uv;
// Entrada del vértice: índice de la textura
layout(location = 3) in float texIndex;

// Salida plana del índice de textura hacia el fragment shader
flat out int TexIndex;
// Salida de las coordenadas de textura hacia el fragment shader
out vec2 UV;

// Uniformes: posición de la cámara y matrices de transformación
uniform vec3 campos; // Posición de la cámara en coordenadas del mundo
uniform mat4 M; // Matriz de modelo
uniform mat4 PV; // Matriz de proyección-vista

void main()
{
    // Convertir el índice de textura a entero y pasarlo al fragment
shader
    TexIndex = int(texIndex);
    // Pasar las coordenadas de textura al fragment shader
    UV = uv;
    // Calcular la posición del vértice en el espacio del mundo
    vec4 worldPosition = M * vec4(pos, 1.0);
    // Calcular la posición final del vértice en el espacio de
pantalla
    gl_Position = PV * worldPosition;
}
);


// Pixel Rendering - Fragment Shader
const char* fragment_prog7 = GLSL(
    // Entrada plana del índice de textura desde el vertex shader
    flat in int TexIndex;
// Entrada de las coordenadas de textura desde el vertex shader
in vec2 UV;
```

```
// Uniforme: array de texturas (hasta 16 texturas)
uniform sampler2D textures[16];

// Uniforme: multiplicador para ajustar el número de píxeles
uniform float multiplier = 0.2f;

// Desplazamiento en x e y para el efecto pixelado
float Despx = 1 / 100.f;
float Despy = 1 / 100.f;

// Nuevas coordenadas de textura después del efecto pixelado
vec2 newUV;

void main()
{
    // Obtener el tamaño de la textura actual en píxeles
    vec2 texSize = textureSize(textures[TexIndex], 0);

    // Calcular el desplazamiento en x e y basado en el tamaño de la
textura y el multiplicador
    Despx = 1.0 / (texSize[0] * multiplier);
    Despy = 1.0 / (texSize[1] * multiplier);

    // Ajustar las coordenadas de textura para crear el efecto
pixelado
    newUV.x = floor(UV.x / Despx) * Despx;
    newUV.y = floor(UV.y / Despy) * Despy;

    // Asignar el color del fragmento basado en las nuevas coordenadas
de textura pixeladas
    gl_FragColor = texture2D(textures[TexIndex], newUV);
}
);
```

Y nos daría resultados como estos:

Ejecución del código

El código está desarrollado en el entorno de la asignatura por lo que utilizando el CMakeList para compilar y ejecutando como el resto de las entregas funcionara.

Una vez se ejecute el programa aparecerá la ventana con el modelo de iluminación de Phong. Pulsando las teclas numéricas se cambiará de modelo de la siguiente forma:

- 1->Phong
- 2->Blinn-Phong
- 3->Resaltado de siluetas
- 4->Toon Shading
- 5->Stippling
- 6->Painterly Rendering
- 7->Píxel Rendering

Además, también se ha implementado una forma para mover la cámara y la iluminación del modelo. Para mover la cámara se utilizará las teclas WASD como se utiliza típicamente en videojuegos, es decir, W arriba, A izquierda, S abajo y D derecha. Este movimiento se hará alrededor de la figura en el eje horizontal, pero de arriba abajo sin tener en cuenta la posición de la figura para el eje vertical. Para la iluminación se utilizarán las teclas de las “flechas” del teclado. Además, con la tecla R se reiniciará la posición de la cámara a la original.

Por último, para los modelos de Stippling, Painterly Rendering y Pixel Rendering se ha implementado que pulsando determinadas teclas se pueda cambiar el umbral de puntos,

cambiar tamaño del pincel y cambiar el tamaño de los pixeles respectivamente. Para este cambio en Stippling se usarán las teclas O para aumentar y L para disminuir, en Painterly Rendering I para aumentar y K para disminuir y en Pixel Rendering U para aumentar y J para disminuir.

Notas y Aclaraciones

Carga de modelos .obj

Debido a la escasa oferta de archivos .bix en internet, ha sido necesario implementar una función que haga posible la carga de objetos .obj junto a su textura a nuestro programa. Estos objetos están compuestos por el archivo que da "volumen" a la figura que sería el .obj, las texturas en formato .png y un archivo adicional que es el encargado de asociar los vértices del objeto a su coordenada dentro de las texturas, típicamente un .mtl.

Requisitos técnicos

Para poder compilar y utilizar el código de la entrega, si se está utilizando un sistema operativo Linux (o similar), será preciso asegurarse de que se tiene la dependencia 'libassimp-dev', la cual se puede instalar con el siguiente comando:

```
sudo apt install libassimp-dev
```

Colaboración

Cabe destacar que esta implementación ha sido llevada a cabo con la ayuda del grupo compuesto por Aníbal Antonio Rivero Ríos, Andrés García Solórzano y Luis Escaño Márquez basándonos en el siguiente repositorio de Github:

```
https://github.com/JoeyDeVries/LearnOpenGL
```