



DEPARTAMENTO
DE COMPUTACION

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Trabajo Práctico Final

Renderizado 3D por software

Organización del computador 2

Integrante	LU	Correo electrónico
Germán Pinzón	475/13	pinzon.german.94@gmail.com
Angel More	931/12	angel_21_fer@hotmail.com



Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

Ciudad Universitaria - (Pabellón I/Planta Baja)

Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA

Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Rep. Argentina

Tel/Fax: (54 11) 4576-3359

<http://www.fcen.uba.ar>

Resumen

El propósito de este trabajo es desarrollar un renderizador 3D sin la ayuda de las librerías gráficas (Direct3D y OpenGL) que, junto con la placa de video, facilitan la tarea de dibujar primitivas tridimensionales. De esta manera, podemos ver que tan performante puede ser realizar este tipo de cálculos pura y exclusivamente con la CPU. El desarrollo será principalmente en lenguaje C y para las partes críticas de cálculo utilizaremos Assembler junto con SIMD para poder equilibrar un poco el hecho de no apoyarnos en la placa de video. Además, debido a que necesitamos de alguna manera dibujar píxeles en la pantalla, haremos uso de una librería gráfica de bajo nivel llamada SDL que nos permite realizar este tipo de tareas usando exclusivamente la CPU.

Índice

1. Introducción	4
2. Desarrollo	4
2.1. Librería SDL	4
2.2. Features	4
3. Implementación de estructuras	6
3.1. Manejo de memoria	6
3.2. Otras estructuras	7
4. Código SDL	7
4.1. Inicialización, terminación y manejo de errores	7
4.2. Manejo de ventana	7
4.3. Ciclo principal y detección de eventos	8
4.4. Renderizado de texto	8
4.5. Timers	9
4.6. Funciones <i>putpixel</i> y <i>getpixel</i>	9
5. Conceptos matemáticos	9
5.1. Matriz del mundo (World Matrix)	10
5.1.1. Matriz de traslación (Translation Matrix)	10
5.1.2. Matriz de escala (Scale Matrix)	10
5.1.3. Matriz de rotación (Rotation Matrix)	11
5.2. Matriz de vista (View Matrix)	11
5.3. Matriz de proyección (Projection Matrix)	13
5.4. Interpolación	15
5.5. mathHelper	16
6. Carga y renderizado del modelo	16
6.1. Model Loader	16
6.1.1. Modo 1	16
6.1.2. Modo 2	17
6.1.3. Modo 3	17
6.2. Renderizado	17
6.2.1. Modo 1	17
6.2.2. Modo 2	19
6.2.3. Modo 3	21
7. Análisis de performance y experimentación	22
7.1. Optimización del código encargado de la interpolación	22

7.2. Optimizaciones en Assembler	24
7.2.1. InterpolateASM	26
7.2.2. Vec4Mat4ProductASM	26
7.2.3. initDepthBufferASM	27
8. Compilación y librerías adicionales	27
9. Conclusión	27
10. Bibliografía	27

1. Introducción

Para dibujar los gráficos 3D que vemos en muchos de los juegos o software de simulación que podemos encontrar hoy en día, se hacen uso de librerías que facilitan este trabajo. En general siempre existe una abstracción de alto nivel que nos permite dibujar en pantalla un modelo o primitiva 3D de manera directa, indicando su posición en el espacio, rotación o demás características. Sin embargo, si empezamos a bajar el nivel de abstracción, siempre vamos a converger en el uso de dos librerías de bajo nivel: Direct3D y OpenGL.

Direct3D y OpenGL son librerías gráficas que trabajan con la placa de video independientemente del fabricante, permitiendo de esta manera que el desarrollador pueda concentrarse en el código de más alto nivel y no tenga que preocuparse por los detalles de hardware. Además, brindan el soporte matemático necesario para que el programador no tenga que realizar ciertos cálculos o construir matrices desde 0, si no que con algunos datos (por ejemplo para construir una matriz de rotación basta con pasarle el ángulo de rotación) ya se encarga de realizar la tarea por completo. De esta manera, si se desea dibujar una primitiva 3D, basta con pasar sus vértices a alguna función específica que provean estas librerías.

Podemos pensar entonces a un renderizador 3D como un software que se encarga de hacer ésto último, es decir, tomar la información necesaria sobre un modelo 3D (en un formato tridimensional) y convertirla a píxeles para posteriormente dibujarlos en la pantalla. Cuando decimos “información necesaria” estamos resumiendo muchísimas cosas ya que para dibujar un modelo 3D necesitamos bastantes más datos que solo sus vértices. El objetivo de este trabajo va a ser programar una suerte de DirectX u OpenGL propio pero que interaccione solamente con el CPU.

2. Desarrollo

2.1. Librería SDL

SDL (Simple DirectMedia Layer) es una librería gráfica open source de bajo nivel, multiplataforma, que trabaja con C (aunque existen bindings para otros lenguajes) y que brinda soporte para el desarrollo de aplicaciones gráficas 2D (pero puede ser usada también con OpenGL). Esta librería nos permite realizar tareas básicas necesarias para el desarrollo de cualquier aplicación interactiva, tales como crear la ventana, imprimir texto en pantalla (con la ayuda de una librería adicional), detectar eventos de mouse y teclado y pintar píxeles en la ventana de manera sencilla.

Elegimos SDL básicamente por dos motivos, el primero porque es una librería “madura” en el sentido de que lleva varios años en desarrollo y tiene una comunidad importante detras. El segundo motivo fue que también nos permite trabajar con la CPU en el sentido de que podemos no usar la aceleración por hardware de la placa de video, pudiendo de esta manera medir de manera más exacta la performance a la hora de realizar experimentos y poder sacar conclusiones más objetivamente.

2.2. Features

La aplicación que desarrollamos permite básicamente renderizar modelos 3D con formato .obj (toma dos parámetros: el primero es el modelo y el segundo la textura) e implementa las siguientes funcionalidades:

- La renderización puede ser realizada en tres modos distintos (esqueleto, texturizado y con sombras). El modo esqueleto solo renderiza los triángulos que forman el modelo sin rellenarlos, el texturizado rellena dichos triángulos con la información que provee la textura y el de sombras utiliza una luz que lo oscurece o ilumina dependiendo de la posición en la que se encuentra el modelo.

- El modelo puede ser deformado en tiempo real de distintas maneras. Los tipos de deformaciones son básicamente tres: rotaciones (sobre cualquiera de los tres ejes y combinándolos), escalado (al igual que la rotación, sobre cualquier eje y varios al mismo tiempo) y traslación.
- La velocidad de rotación puede ser modificada.
- En el modo de renderizado con sombras se puede cambiar tanto la dirección como la intensidad de la luz.
- Se puede colorear de cierta manera el modelo, modificando ligeramente el color que provee la textura a cada vértice
- La versión C de la aplicación permite cambiar en tiempo real el tipo de interpolación que se utiliza. Existen dos funciones que implementan interpolación en C y poder alternar entre ambas nos deja observar la bajada o subida de FPS y analizar la performance.
- Muestra FPS e instrucciones por pantalla, pueden sacarse si así se quiere.

Dado que en general los modelos 3D son generados por programas de diseño como 3D Studio Max o Blender y existen numerosos formatos de archivos de modelos 3D, resulta conveniente elegir uno e implementar un lector para poder cargar la información fácilmente. Nosotros elegimos el formato *.obj e implementamos dicho lector.

Los datos serán importados desde el tipo de archivo .obj generalmente siguen el siguiente formato:

```
# Blender v2.76 (sub 0) OBJ File: ''
# www.blender.org
o Cube
v -1.000000 -1.000000 1.000000
v -1.000000 -1.000000 -1.000000
v 1.000000 -1.000000 -1.000000
v 1.000000 -1.000000 1.000000
v -1.000000 1.000000 0.999999
v -0.999999 1.000000 -1.000001
v 1.000000 1.000000 -1.000000
v 1.000000 1.000000 1.000000
vt 0.000100 0.999900
vt 0.000100 0.000100
vt 0.999900 0.000100
vt 1.000000 0.000000
vt 1.000000 1.000000
vt 0.000000 1.000000
vt 0.999900 0.999900
vt 0.000000 0.000000
vn 0.000000 -1.000000 -0.000000
vn 0.000000 1.000000 0.000000
vn -1.000000 0.000000 -0.000000
vn 0.000000 0.000000 -1.000000
vn 1.000000 -0.000000 0.000000
vn -0.000000 0.000000 1.000000
s off
f 2/1/1 3/2/1 4/3/1
f 8/1/2 7/2/2 6/3/2
f 5/4/3 6/5/3 2/6/3
f 6/7/4 7/1/4 3/2/4
f 3/1/5 7/2/5 8/3/5
```

```
f 1/4/6 4/5/6 8/6/6
f 1/7/1 2/1/1 4/3/1
f 5/7/2 8/1/2 6/3/2
f 1/8/3 5/4/3 2/6/3
f 2/3/4 6/7/4 3/2/4
f 4/7/5 3/1/5 8/3/5
f 5/8/6 1/4/6 8/6/6
```

En las primeras líneas se identifica el programa y la versión, la pagina oficial y luego el nombre del modelo (en este caso usaremos un cubo); Las líneas que comienzan con v identifican la ubicación de un vértice dentro del *Model Space*; Las que comienzan con vt identifican las coordenadas UV; Con vn se identifican las coordenadas normales a los vértices; Y aquellas líneas que comienzan con f representa a los vértices que conforman un triángulo, así también como la textura correspondiente y el vector normal a estos.

Por ejemplo en la línea f 2/1/1 3/2/1 4/3/1 los valores que aparecen antes de la primer barra significan que ese triángulo esta compuesto por los vértices 2, 3 y 4 (la numeración es de arriba a abajo según aparecen en el archivo), es decir a -1.000000 -1.000000 -1.000000, 1.000000 -1.000000 -1.000000 y 1.000000 -1.000000 1.000000; Los valores que aparecen entre las barras son los índices de la textura que asociado a cada vértice en este caso 1, 2 y 3 corresponde a 0.000100 0.999900; 0.000100 0.000100 y 0.999900 0.000100. Finalmente el ultimo valor identifica los índices de las coordenadas normales.

En algunos casos es posible que el archivo no cuente con las coordenadas UV por lo que el modelo sera pintado de un mismo color, o que no presente las coordenadas normales por lo que el modo 3 no estará disponible. Además es posible que la líneas que comienzan con f tengan mas de tres conjuntos de valores, por lo que en estos casos el modelo no estará representado por un conjunto de triángulos sino de rombos (o en algunos casos combinaciones de ambos) por lo que los rombos serán divididos en dos triángulos soportando este tipo.

3. Implementación de estructuras

3.1. Manejo de memoria

Dado que este proyecto está realizado en C y algunas partes específicas en Assembler, no contamos con estructuras dinámicas con un manejo eficiente de la memoria que podamos usar. Dichas estructuras, en nuestro caso arreglos dinámicos, las definimos nosotros en structHelper.h y sus implementaciones están en structHelper.c. Fueron construidas para el almacenamiento dinámico de coordenadas de hasta 4 dimensiones a la hora de cargar un modelo 3D desde un archivo.

Existen varias implementaciones de estas estructuras y todas son muy similares, lo que cambia son las dimensiones de los puntos que almacena y el tipo de dato utilizado. Esto se debe a que a la hora de cargar un modelo 3D se necesitan cargar muchos datos de distinta naturaleza como por ejemplo los vértices del mismo (tres coordenadas de tipo float), las coordenadas de la textura en el caso de que use alguna (dos coordenadas de tipo float), los índices de los vértices (enteros) y las caras de los triángulos (tres coordenadas enteras).

Si observamos el código en structHelper.h, vemos que cada estructura posee una declaración similar y existen exactamente tres funciones para su manejo: la inicialización, la inserción y la liberación de memoria. Estas tres funciones nos dan el soporte suficiente para la carga de datos.

Las estructuras que usamos entonces son:

- **UInt3DynamicArray:** almacena las caras de los triángulos, compuestas por tres índices
- **Vec2DynamicArray:** almacena las coordenadas de las texturas (modos 2 y 3)
- **Vec4DynamicArray:** almacena las coordenadas de los vértices (cada componente es un float)

3.2. Otras estructuras

Además de las estructuras para los arreglos dinámicos que mencionamos en la sección anterior, existen otras estructuras que definimos por una cuestión de organización de los datos. Es decir, sin tener estas estructuras la cantidad de parámetros de las funciones en `modelLoader` y las funciones encargadas de la rasterización aumentarían al doble o más. A continuación listamos los nombres de dichas estructuras y una breve descripción de su uso:

- **Vertex:** almacena toda la información de un vértice. Esto es: sus coordenadas en los distintos espacios, su normal y las coordenadas de la textura que le corresponden.
- **ScanLineData:** agrupa los datos necesarios para que `ProcessScanLine` realice la interpolación
- **Model:** se utiliza a la hora de cargar el modelo y luego pasárselo a los posibles modos de renderizado. Agrupa toda la información necesaria, desde lo que se carga del archivo hasta las matrices que lo transforman, distancias máximas para reescalado y color.

4. Código SDL

Como dijimos anteriormente, para realizar este proyecto nos apoyamos en la librería SDL y por lo tanto una parte importante del código hace uso de la misma. En esta sección vamos a detallar y explicar cuándo y para qué llamamos a la SDL.

4.1. Inicialización, terminación y manejo de errores

Antes de empezar a utilizar SDL hay que hacer una llamada a `SDL_Init` y pasarle como parámetro `SDL_INIT_VIDEO` para indicarle que queremos hacer uso del subsistema de video. Esto se debe a que existen otros subsistemas de SDL como por ejemplo el que brinda soporte para el sonido. Así como debemos inicializar la librería, también debemos llamar a `SDL_Quit` una vez que terminamos de hacer uso de la misma (en nuestro caso antes de que el programa termine).

Existen numerosas funciones de SDL, algunas devuelven punteros a instancias de estructuras propias de la librería (como veremos en las siguientes secciones) y otras simplemente algún número. Es importante saber que estas funciones pueden fallar, en general las que devuelven un número, si este número es negativo significa que falló. En los casos que devuelven un puntero, fallan cuando el puntero es nulo. Para poder detectar correctamente e informar cuando una de estas funciones falla, tenemos la función `SDL_GetError` que nos devuelve un mensaje informándonos sobre la falla.

4.2. Manejo de ventana

La función `SDL_CreateWindow` nos permite crear la ventana donde se van a dibujar las primitivas. Dicha función devuelve un puntero a la estructura `SDL_Window` y nos permite definir las dimensiones y el título que queramos. Antes de terminar, el programa debe llamar a `SDL_DestroyWindow` y pasarle como parámetro el puntero obtenido por `SDL_CreateWindow`.

En SDL para poder dibujar sobre la ventana, es necesario trabajar sobre superficies, definidas con la estructura `SDL_Surface`. Así como cuando uno carga una imagen trabaja con la superficie asociada a la imagen, cuando queremos dibujar sobre la ventana debemos obtener la superficie asociada a la ventana utilizando la función `SDL_GetWindowSurface`. Esta función toma como parámetro un puntero a una instancia de `SDL_Window` (el que obtenemos al crear la ventana) y nos devuelve el puntero a la instancia de `SDL_Surface` que necesitamos.

4.3. Ciclo principal y detección de eventos

Dado que esta es una aplicación interactiva, en el sentido de que no se trata de un software al cual ejecutamos, devuelve una entrada y termina, es necesario que todo el tiempo se esté ejecutando cierto código y ciertas llamadas a funciones. Para esto definimos un ciclo principal que termine únicamente cuando el usuario cierra la ventana.

El ciclo principal es básicamente el núcleo de la aplicación y su condición de corte es que el usuario quiera cerrar la ventana (más adelante veremos como detectar esto). Ahí es donde se ejecuta desde la detección de eventos hasta las llamadas a las funciones encargadas de renderizar los modelos 3D, el cálculo de los FPS y otras cosas más. Cuando dibujamos un modelo 3D y decidimos rotarlo, estirarlo o cambiar el modo del renderizado debemos volver a dibujarlo todo desde cero. Para lograr esto sin que se pise con el dibujo que estaba antes lo que hay que hacer es limpiar la ventana, es decir borrar todo lo que habíamos hecho antes. De esto se encarga la función *SDL_FillRect*, a la cual le pasamos como parámetros el puntero a la superficie asociada a la ventana y el color que queremos que tengan todos los píxeles (para esto usamos *SDL_MapRGB*). Luego de dibujar sobre la superficie asociada a la ventana debemos actualizarla, esto lo hacemos con *SDL_UpdateWindowSurface* pasándole como parámetro dicha superficie (el puntero).

Para el manejo de eventos primero necesitamos crear una instancia *e* de tipo *SDL_Event*. Luego, para detectar eventos del usuario con SDL hay que definir un subciclo del ciclo principal, cuya condición de corte es *SDL_PollEvent(&e) == NULL*. Si entramos al ciclo significa que detectamos un evento, para identificar que tipo de evento es usamos el campo *type* de *SDL_Event* (el valor puede ser *SDL_QUIT* si el usuario quiere cerrar la ventana, *SDL_KEYUP* si el usuario soltó una tecla, *SDL_KEYDOWN* si el usuario está apretando una tecla, entre otros). Es cuestión de anidar distintos switches para poder identificar los eventos que nos importan y actuar en consecuencia. Dado que la detección de eventos es una parte importante del código, está toda dentro de la función *EventDetection*, la cual se ejecuta una vez por cada iteración del ciclo principal.

4.4. Renderizado de texto

Tanto para mostrar los FPS como las indicaciones de uso, nuestro programa muestra un texto a la izquierda. Para hacer esto utilizamos una librería llamada *SDL_TTF* ya que SDL no brinda soporte de manera directa para renderizado de texto.

Esta librería es muy simple de usar y si bien es externa a SDL, está hecha para interactuar con ésta última. De manera similar a SDL, para utilizarla debemos inicializarla llamando a la función *TTF_Init* y antes de terminar el programa hay que hacer una llamada a *TTF_Quit*.

Para empezar a hacer uso de la librería y dibujar texto en la ventana primero hay que cargar una fuente, esto lo hacemos utilizando la función *TTF_OpenFont* a la cual le pasamos como parámetros la ruta de la fuente que queremos utilizar y el tamaño de letra y nos devuelve un puntero a una instancia de tipo *TTF_Font*. Una vez hecho esto ya estamos en condición de dibujar texto en la ventana, para lo cual hacemos uso de las funciones *TTF_RenderText_Solid*, *SDL_BlitSurface* y *SDL_FreeSurface*. La primera de las tres es la que nos devuelve la superficie asociada al texto que queremos dibujar, toma la fuente que cargamos anteriormente, la cadena de caracteres correspondiente al texto y el color. La segunda función es la que efectivamente, haciendo uso de los conceptos de superficies de SDL, dibuja el texto que se encuentra en la superficie que obtuvimos con la función anterior dentro de la superficie correspondiente a la ventana. Con lo cual sus parámetros son la superficie del texto, la de la ventana y la posición (con el formato de la estructura *SDL_Rect*). Finalmente debemos llamar a *SDL_FreeSurface* pasándole como parámetro la superficie asociada al texto para liberar la misma, ya que no la vamos a necesitar.

Como todo el proceso descrito en el párrafo anterior sobre como se dibuja texto con estas librerías puede ser un poco tedioso si lo que queremos hacer es escribir varias líneas, lo que decidimos hacer fue definir dos funciones que nos abstraigan de todos estos detalles. Estas funciones se llaman *RenderText*

y *RenderTextR* y se encuentran definidas en *sdlHelper.c*. La diferencia entre ambas es que la primera no pide la posición del texto a renderizar (siempre lo dibuja arriba a la izquierda, es útil cuando solo se quiere renderizar pocos datos como por ejemplo los FPS) y la segunda sí. Ambas piden el color, la superficie asociada a la ventana, el texto y la fuente a utilizar.

4.5. Timers

Para medir la performance de la aplicación una de las técnicas que usamos fue el uso de timers. Si bien SDL provee soporte para esto, decidimos utilizar los clásicos Clocks de C pero hicimos uso de la función *SDL_GetTicks* que nos devuelve la cantidad de milisegundos que pasaron desde que se inicializó la librería.

4.6. Funciones *putpixel* y *getpixel*

Si bien esta función no se encuentra dentro de la SDL, tiene una relación muy cercana a la misma ya que trabaja a un nivel bastante bajo con sus estructuras y formatos (efectuando operaciones como shifteo y and's) y es por eso que se encuentra en *sdlHelper.c*. Toma como parámetros la superficie (*SDL_Surface**) de la ventana, coordenadas enteras x, y, z, un píxel en formato entero de 32 bits, tamaños enteros ancho y alto de la ventana y un puntero al *depthBuffer* (*float**). Lo que hace es manipular la superficie de la ventana de manera tal de modificar el píxel que se encuentra en la posición (x, y) para que ahora tenga el valor del píxel que toma como parámetro.

Sin embargo, vemos que también hay otros parámetros como una coordenada z y un *depthBuffer*. Esto es porque, debido a que estamos renderizando en una ventana 2D que representa a un mundo 3D, cada píxel tiene una “profundidad” (que guardamos en el *depthBuffer*) y que utilizamos para testear si el píxel original que se encuentra en dichas coordenadas está delante o detrás (en términos de la coordenada z) del que toma esta función por parámetro. En el caso de que el nuevo píxel esté delante del viejo, entonces efectivamente lo modificamos, caso contrario dejamos todo como está.

La función *getpixel* en cambio, solo toma tres parámetros (la superficie, coordenada x y coordenada y) ya que no se va a efectuar ningún cambio sobre la superficie en sí, si no que la idea es obtener el valor de un píxel específico. El tipo de dato que devuelve es un entero de 32 bits sin signo que es el tipo que usa SDL para los píxeles. Esta función es llamada únicamente por la función *Map*, que se encarga de extraer la información necesaria del archivo de textura para poder pintar los triángulos (es decir solo se usa en los modos 2 y 3).

5. Conceptos matemáticos

En esta sección vamos a exponer un poco los conceptos matemáticos subyacentes de la aplicación. Las librerías gráficas que brindan soporte 3D de alto nivel como también las de bajo nivel como Direct3D y OpenGL, tratan de abstraer un poco al programador de estos conceptos. Esto significa que muchas veces el programador no necesita saber que formato tiene una matriz específica si no que simplemente llama a la función encargada de construir dicha matriz que la librería provee y listo. En este trabajo, dado que no hacemos uso de ninguna librería que brinde el soporte matemático para el manejo 3D, tuvimos que ponernos un poco más en contacto con varios de los conceptos básicos necesarios para tratar con modelos 3D y vamos a introducirlos un poco en esta sección.

Cuando un modelo 3D es creado, éste vive en un espacio de coordenadas por defecto (proporcionado generalmente por el programa que se utilizó para diseñarlo), conocido como espacio del modelo o *ModelSpace*. Luego, para poder ser renderizado pasa por múltiples transformaciones que lo llevan a otros espacios de coordenadas hasta que finalmente es visible en la pantalla.

La idea se basa en utilizar tres matrices fundamentales conocidas como World, View y Projection y combinarlas utilizando el producto de matrices en una sola: $PVW = Projection * View * World$ De esta

manera multiplicando cada coordenada del objeto (en *ModelSpace*) por la PVW, el objeto se mueve a través de varios espacios para finalmente proyectarse en pantalla.

5.1. Matriz del mundo (World Matrix)

La primera matriz que describiremos sera la World Matrix o Matriz del mundo. Como mencionamos anteriormente, cada modelo vive inicialmente en un espacio local, por lo que transformaremos sus vértices a un sistema de coordenadas común conocido como espacio de mundo o World Space. Esta matriz nos va a permitir determinar una posición, orientación e incluso escalar el modelo en el nuevo espacio 3D.

La World Matrix la conseguiremos por medio del producto de otras 3 matrices, cada una de tamaño 4x4 y asumiendo una notación donde las filas representan cada uno de los ejes. Es decir la primera, segunda y tercer fila corresponden a los ejes x, y, z respectivamente y la cuarta fila se utilizará por cuestiones más matemáticas y para diferenciar entre vectores (direcciones) y puntos. Dado que adoptamos esta convención, al efectuar el producto entre un vector y una matriz, el vector deberá ubicarse a la izquierda de la matriz.

La *WorldMatrix* se compone a su vez por distintos tipos de matrices combinadas, expresando esta combinación como el producto de estas matrices al igual que hicimos con la matriz PVW. A continuación vemos los distintos tipos de matrices que pueden utilizarse para conformar la *WorldMatrix*.

5.1.1. Matriz de traslación (Translation Matrix)

Nos permite trasladar las coordenadas del modelo en el espacio

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \text{Traslacion.x} & \text{Traslacion.y} & \text{traslacion.z} & 1 \end{bmatrix}$$

Si bien para representar coordenadas en un espacio 3D son necesarios tres valores (ubicación en el eje x, y y z) utilizaremos un cuarto, w, con valor 1, necesario para la aritmética matricial. En este caso Traslación indica en cuanto queremos mover cada una de las coordenadas. Traslacion.x indicara cuanto moveremos el valor x; Traslacion.y el valor de la coordenada en y y finalmente Traslacion.z a z.

Si quisieramos trasladar las coordenadas (5,5,5,1) 12 unidades en dirección del eje x, al multiplicar dicho vector por la matriz de traslación obtendremos como resultado (5 + 12, 5 5, 1) efectivamente obteniendo el resultado deseado.

5.1.2. Matriz de escala (Scale Matrix)

Esta matriz nos permite estirar al modelo en distintas direcciones. Su formato es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & sy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

sx, sy y sz representan el tamaño a escalar en la dirección correspondiente a la fila de la matriz. Si tomamos por ejemplo la primera fila, que representa al eje x, se puede observar que el eje conserva la dirección pero es escalado por un valor sx.

5.1.3. Matriz de rotación (Rotation Matrix)

Aquí nos encontramos con distintas variantes

Matriz de rotación alrededor del eje x:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(ang) & \sin(ang) & 0 \\ 0 & -\sin(ang) & \cos(ang) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de rotación alrededor del eje y:

$$\begin{bmatrix} \cos(ang) & 0 & -\sin(ang) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(ang) & 0 & \cos(ang) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de rotación alrededor del eje z:

$$\begin{bmatrix} \cos(ang) & -\sin(ang) & 0 & 0 \\ \sin(ang) & \cos(ang) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices representan la rotación de ang grados del plano. Notemos el valor de la coordenada en el eje sobre el cual queremos rotar nunca cambia. Esto es lo que se espera cuando nosotros queremos rotar alrededor del eje en cuestión, ya que la rotación es exclusivamente alrededor del eje y por lo tanto las coordenadas se mantienen constantes.

Ya vimos como es posible trasladar, estirar y rotar el modelo y como dijimos antes, es posible combinar cada una de estas transformaciones en una sola matriz (*WorldMatrix*):

$\text{World Matrix} = \text{Rotation Matrix} * \text{Tanslation Matrix} * \text{Scale Matrix}$

Dado que el producto de matrices no es conmutativo entonces el orden el que se realice puede dar como resultado distintas transformaciones y posicionamiento del modelo final. Nosotros, por convención, adoptaremos el orden anterior. Por ultimo la transformación de cada una de las coordenadas estará dada por:

$\text{coordenadas_transformadas} = \text{coordenadas_originales} * \text{WorldMatrix}$

5.2. Matriz de vista (View Matrix)

Como explicamos en la sección anterior, el primer paso para renderizar un objeto 3D es poner a todos los modelos en el mismo espacio, *WorldSpace*. Para continuar con la proyección en pantalla de nuestro modelo necesitamos efectuar un nuevo cambio de coordenadas hacia otro espacio llamado *ViewSpace*.

¿Por que es necesario un nuevo espacio? Básicamente porque podríamos estar mirándolo desde cualquier dirección. La transformación consiste en cambiar el sistema de coordenadas de toda la escena a uno nuevo que represente la cámara que está visualizando el modelo (por eso también se lo llama *CameraSpace*. Así, la matriz asociada a esta transformación (*ViewMatrix*) definirá la posición y orientación de la cámara, modificando sus valores alteramos el centro y el plano de proyección respecto al espacio del mundo.

Para la creación de la matriz haremos uso de tres vectores *eye*, *target* y *up*. El vector *eye* determina la posición de la cámara con respecto al *WorldSpace*. *target* determina la dirección hacia donde está enfocando la cámara. *up* que define la dirección “hacia arriba” desde el punto de vista de la cámara. Una

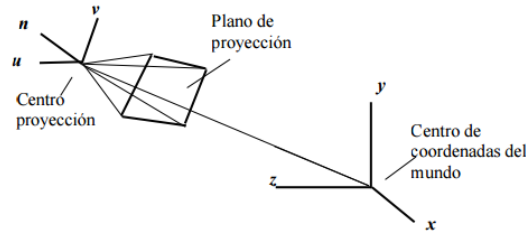


Figura 1: Los vectores n , u , v definen los ejes principales del nuevo sistema de referencia en el *View Space*.

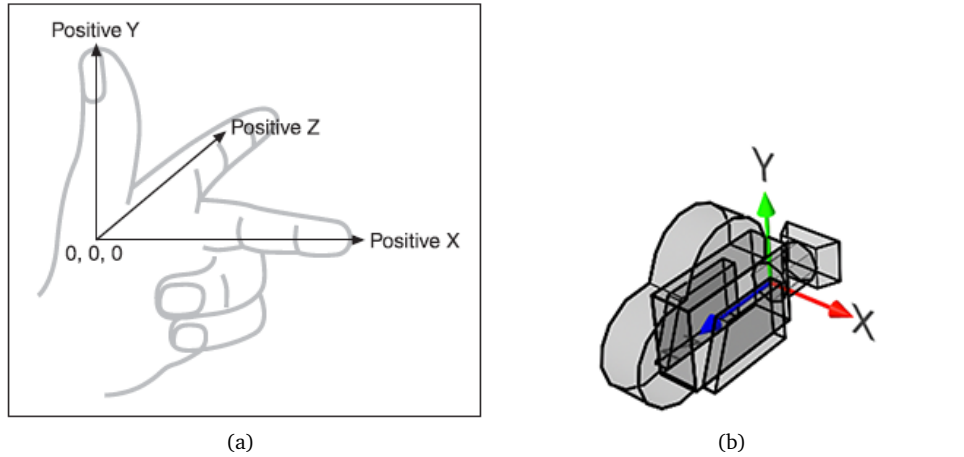


Figura 2: A la izquierda se muestra la ubicación de los ejes utilizando la regla de la mano izquierda y a la derecha como estaría posicionada nuestra cámara según dicha regla.

implementación típica, la cual adoptamos, es asumir que que la cámara esta colocada sobre el eje $-z$ (left-handed coordinate system o regla de la mano izquierda por convención).

Para construir esta matriz debemos primero calcular tres nuevos vectores: x' , y' y z' . Para calcularlos vamos a empezar por z' e ir utilizando los datos que ya sabemos (como *target*, *eye* y *up*). *cross* es la función que computa el producto cruzado (así aseguramos perpendicularidad) y *normal* la función de normalización de vectores. Así, los cálculos se efectúan de la siguiente manera:

```
z' = normal(eye - target);
x' = normal(cross(up, z' ));
y' = cross(z', x');
```

Con estos datos podemos construir una nueva matriz que represente a estos nuevos ejes:

$$orientation = \begin{bmatrix} x'.x & y'.x & z'.x & 0 \\ x'.y & y'.y & z'.y & 0 \\ x'.z & y'.z & z'.z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como la cámara todavía no está en la posición deseada (*eye*), para llegar allí se crea la siguiente matriz de traslación:

$$translation = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -eye.x & -eye.y & -eye.z & 1 \end{bmatrix}$$

Combinando la matriz de orientación con la de traslación obtendremos la matriz deseada (*View Matrix*):

$View\ Matrix = orientation * translation;$

Equivalentemente se puede expresar directamente como

$$\begin{bmatrix} x'.x & y'.x & z'.x & 0 \\ x'.y & y'.y & z'.y & 0 \\ x'.z & y'.z & z'.z & 0 \\ -dot(x',eye) & -dot(y',eye) & -dot(z',eye) & 1 \end{bmatrix}$$

Donde dot es la función que calcula el producto escalar. Este método es mas optimizado ya que no requiere realizar un producto matricial.

5.3. Matriz de proyección (Projection Matrix)

Todos los vértices transformados dentro del *View Space* siguen teniendo tres dimensiones cuando en realidad para poder dibujarlos en pantalla se necesitan exactamente dos dimensiones. Además, aún no tenemos perspectiva, es decir, que tan lejos o cerca estamos del objeto. Dado que adoptamos la idea de posicionar la cámara sobre el eje -z, esto determinará la cercanía o lejanía con el modelo, modificando así el tamaño del mismo. La matriz de proyección será la encargada de solucionar estas cuestiones.

Existen distintos tipos de proyecciones, por ejemplo en una proyección en perspectiva los objetos que están más lejos de la cámara se hacen más pequeños, mientras que en una proyección ortográfica la distancia a la cámara no tiene un efecto alguno sobre el tamaño del objeto. En nuestro caso utilizaremos proyección en perspectiva.

La proyección en perspectiva se basa en la idea que la parte visible se encuentra dentro de una determinada figura (llamada *View Frustum*). El volumen de esta figura está definido por seis planos: un plano cerca de la cámara (*near plane*), un plano más lejos (*far plane*) y cuatro planos laterales que definen los bordes. El *near plane* define a partir de donde se puede visualizar y el *far plane* define hasta que punto podemos ver. De este modo, solo los objetos que se encuentren entre estos planos serán representados en pantalla.

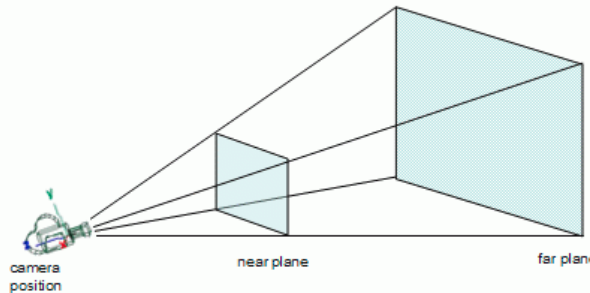


Figura 3: Visualización basada en *View Frustum*

La matriz calculará las coordenadas dentro del intervalo $[-1,1]$, de esta forma un punto no será visible si luego de multiplicar la *projectionmatrix* es menor que -1 o mayor que 1. Se adopta utilizar las coordenadas dentro de ese intervalo para que sea independiente de las dimensiones de la pantalla. Una vez que tengamos las coordenadas de la matriz solo deberemos multiplicarlas por el ancho y alto de la pantalla en la que se este trabajando para dimensionarlos.

Dado que adoptamos la ubicación de los ejes con la regla *left-handed* estaremos posicionados sobre el eje -z. Por lo que debemos convertir cada punto de la coordenada z en -z, esto se puede lograr multiplicando las coordenadas por:

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta forma si tenemos el vector de coordenadas $v = (x, y, z, 1)$ quedaría como:

$v' = (x, y, -z, 1)$; Luego de efectuar $v * M1$

El segundo paso requiere dividir las coordenadas x e y por $-z$. De esta manera cuando el objeto esté mas lejos de la cámara el valor de z sera mayor por lo que los cocientes serán más chicos (en módulo) y estaremos dándole perspectiva a nuestro objeto.

Recordemos que estamos trabajando con vectores de coordenadas de 4 dimensiones (conocidas como coordenadas homogéneas) donde el ultimo valor (conocido como w) es igual a 1. Si multiplicamos cualquiera de estas coordenadas por la World y/o Translation matrix observaremos que el ultimo valor se sigue manteniendo en un 1 (que es lo que queremos). Sin embargo, no es el caso cuando multiplicamos por esta matriz. Esto significa que para volver a las coordenadas homogéneas, luego de haber multiplicado el vector de coordenadas por la matriz PVW, tendremos que dividirlo por el valor w que posea ya que de esta forma estaremos efectuando $\frac{w}{w}$ obteniendo de nuevo el valor 1. Entonces, si w fuese igual a $-z$, conseguiríamos lo que estamos buscando: dividir x e y por $-z$.

Consideremos cambiar la cuarta columna de la matriz $M1$ por el siguiente vector $(0, 0, -1, 0)$ tenemos una $M2$ tal que:

$$M2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De esta forma un vector $v = (x, y, z, w)$ quedaría como $(x, y, z, -z)$ luego de efectuar $v * M2$ ya que:

$$w' = x * 0 + y * 0 + z * (-1) + 1 * 0 = -z$$

Esto tiene por efecto establecer w como $-z$ pero, si $-z$ es diferente a 1, entonces tendrá que ser normalizado es decir, vamos asignar z al rango $[0, 1]$. Para ello, vamos a utilizar los valores *near plane* y *far plane*.

Estableceremos los coeficientes de la matriz utilizada $M2$ cambiando los valores de la tercera columna por $(0, 0, \frac{-f}{f-n}, \frac{-f*n}{f-n})$, siendo f el valor de *far plane* y n el valor de *near plane*, y veamos que sirve:

Ahora tendremos la matriz:

$$M3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-f}{f-n} & -1 \\ 0 & 0 & \frac{-f*n}{f-n} & 0 \end{bmatrix}$$

Sea $v = (x, y, z, w)$ luego de efectuar $v * M3$ tendremos un nuevo vector v' con la tercer coordenada igual a:

$$z' = x * 0 + y * 0 + \frac{-f}{f-n} * z + \frac{-f*n}{f-n} * 1$$

Se deberían cumplir dos condiciones: cuando v este mas cerca del *near plane* z' debería ser 0 y mientras mas cerca de *far plane* debería tender al valor 1.

Veamos cuando z es igual a $-f$

$$z' = \frac{-f}{f-n} * (-f) + \frac{-f*n}{f-n} * 1 = \frac{f*f + -f*n}{f-n} = \frac{f*(f-n)}{f-n} = f$$

Y cuando z es igual a $-n$

$$z' = \frac{-f}{f-n} * (-n) + \frac{-f*n}{f-n} * 1 = \frac{f*n - f*n}{f-n} = 0$$

Recordemos que aun es necesario dividir por w' que es $-z$ por lo que en el primer caso $-z = f$ entonces, tendríamos como resultado final 1; en el segundo caso 0. Efectivamente obtuvimos los valores deseados.

Por último, hay que tener en cuenta el ángulo de visión (AOV) o campo de visión (FOV) de la cámara. Este parámetro controla qué parte de la escena es visible a la cámara. Generalmente se utiliza es suponer que la ventana de proyección es un cuadrado de $[-1: 1]$ en cada dimensión. y que la distancia entre la misma y la cámara es igual a 1.

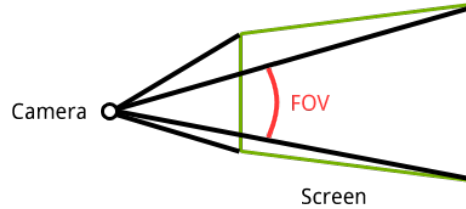


Figura 4: Con verde la porción de la pantalla que queda delimitada al utilizar FOV.

Dado que la parte observable de nuestro mundo 3D puede variar de acuerdo al valor de FOV, debemos incluirlo de alguna manera en nuestro cambio de coordenadas. Sin entrar en detalle en la trigonometría que hay detrás de esto, se utiliza el valor $P = 1 / \tan(FOV * 0,5)$. Esto nos va a permitir escalar las coordenadas para poder definir la visibilidad de los vértices de acuerdo a este ángulo y no solo al posicionamiento de los mismos. La matriz de proyección entonces queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-f}{f-n} & -1 \\ 0 & 0 & \frac{-f*n}{f-n} & 0 \end{bmatrix}$$

Ya tenemos todas las matrices necesarias, con lo cual si multiplicamos cada coordenada dentro del *Model Space* por la matriz PVW estaremos casi en condiciones de tener representado nuestro modelo en la pantalla. Lo único que falta es dividir estas coordenadas por w' y mapear estos valores a las dimensiones de nuestra pantalla.

Llamemos x'' e y'' a las coordenadas finales que permitirán graficar en nuestra pantalla al modelo 3D y (x', y', z', w') al valor obtenido luego de multiplicar una coordenada por PVW tendremos que:

$$x'' = \frac{x'}{w'} * width + width * 0,5$$

$$y'' = \frac{y'}{w'} * height + height * 0,5$$

Donde *width* y *height* representa el ancho y alto de nuestra pantalla. Notar que luego sumamos *width* * 0,5 a x'' y *height* * 0,5 a y'' para tener las coordenadas finales centradas en la pantalla.

5.4. Interpolación

Además de las matrices, un concepto matemático que usaremos en muchas ocasiones será el principio de interpolación lineal. La interpolación nos permite obtener un tercer punto interpolado (x_c, y_c) , ajustándose a los valores de otros dos (x_a, y_a) y (x_b, y_b) . Básicamente consiste en trazar una recta que pasa por (x_a, y_a) y (x_b, y_b) , y calcular los valores intermedios sobre esta recta. La formula para obtenerlos es la siguiente:

$$y_c = y_a + (x_c - x_a) * \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (1)$$

Observemos que en la formula (1) $\frac{y_b - y_a}{x_b - x_c}$ es el valor de la pendiente entre estos dos puntos es decir, la recta sobre la cual se ubicara el punto a interpolar.

Dado que la formula (1) nos permite obtener el valor y del punto a polarizar a partir del x, en caso de ser conocido el valor y, y desconocido el de x si despejamos de (1) obtenemos la siguiente formula:

$$x_c = x_a + (x_b - x_a) * gradient$$

$$\text{con } gradient = \frac{y_c - y_a}{y_b - y_a}$$

5.5. mathHelper

En el archivo mathHelper.h declaramos numerosas funciones matemáticas que luego definimos en mathHelper.c. Estas funciones van desde cálculos básicos como el producto cruzado, el producto escalar, normalizaciones y productos de matrices hasta la construcción de matrices específicas como las que fueron explicadas en esta sección.

Existen cálculos que se repiten mucho a lo largo del código y que, en algunos casos, es necesario realizarlos por cada ejecución del ciclo principal por ejemplo. En estos casos decidimos implementar también una versión de los mismos en Assembler con el objetivo de optimizar la performance y poder realizar mediciones y comparaciones con las versiones de estas funciones en C. Las funciones matemáticas que decidimos implementar en Assembler son las siguientes: producto escalar (ScalarProdASM), interpolación (InterpolateASM, hablaremos del uso de esta función más adelante) y producto de vector por matriz (Vec4Mat4ProductASM). También existen otras funciones que decidimos implementar en Assembler, que no realizan cálculos matemáticos pero que se ve reflejado en la experimentación que haberlas programado en Assembler mejoró notablemente la performance, hablaremos de ellas más adelante.

6. Carga y renderizado del modelo

6.1. Model Loader

Cada modelo se encuentra conformado por un conjunto de polígonos, en especial triángulos. Dado que elaboraremos tres modos, de manera de aplicar distintos efectos sobre los modelos, para poder graficar cada uno de los triángulos no solo sera necesario tener las coordenadas de sus vértices, sino que dependiendo del modo requerirán datos adicionales.

6.1.1. Modo 1

Este método sera el mas básico, se encargara de dibujar cada uno de los triángulos (vértices y aristas) que conforman al modelo.

Comenzaremos con una función a la que llamaremos *RenderFilledModel_m1*. Inicialmente se encargara de calcular ,para cada triangulo, la transformación final (descrita en la sección 5.3) de las coordenadas dentro del *Model Space* a vectores bidimensionales que van a representar los píxeles en nuestra pantalla 2D.

Sean v1,v2,v3 los tres vértices que forman un triangulo, renombraremos dichos vértices como P1, P2, P3 de manera que P1 sea el que se encuentre en una posición menor o igual que P2 respecto del eje y; P2 a su vez sera aquel que se encuentre en una posición menor o igual que P3 respecto del mismo eje. Para calcular y graficar las aristas entre cada vértice utilizaremos la función *DrawTriangle_m1* descrito en la posterior sección 6.2.1

6.1.2. Modo 2

En el segundo modo procederemos a rellenar los triángulos. Esto es posible ya sea tomando píxeles de una imagen de forma tal que el modelo final obtenga la textura de la imagen o bien definiendo un conjunto de píxeles con el mismo color para todos. Para el primer caso Blender nos permite asignarles texturas a los distintos modelos, una de las formas es tomando como input una imagen y utilizando el Mapeo UV (*UV mapping*). Esta técnica permite asignar una textura en 2D a una superficie 3D.

A cada vértice, de los polígonos que componen el modelo, le será asignado un par de coordenadas 2D llamadas UV. Este nuevo par de coordenadas definen que área de la imagen es mapeada a cada triángulo es decir, permitirá pintar cada triángulo con el color de una imagen.

Por lo que modificaremos la función *RenderFilledModel_m1* a *RenderFilledModel_m2* y *DrawTriangle_m1* a *DrawTriangle_m2* de manera de no solo exportar los vértices sino que también las coordenadas UV de cada uno.

Como requeriremos acceder a cada píxel de la imagen usaremos la función *SDL_LoadBMP* (provista por SDL) la cual permite cargar una superficie desde un archivo del tipo .BMP y nos devuelve un puntero a la misma, al cual llamaremos *tex*.

6.1.3. Modo 3

Redefiniremos *RenderFilledModel_m2*, agregándole nuevas funcionalidades, a *RenderFilledModel_m3*. Este nuevo modo se basa en simular efectos de luz sobre la superficie del objeto. Para esto será necesario contar con un punto que será desde donde iluminaremos nuestro modelo, lo llamaremos *lightPos*. Para calcular la luminosidad nos basaremos en la técnica Gouraud Shading, la misma utiliza 3 vectores normales por cada triángulo que compone a nuestro modelo. Estos vectores serán normales pero, a los vértices de cada uno. Otros métodos utilizan solo un vector normal a la superficie de los triángulos pero de esta forma toda la superficie obtiene la misma intensidad de color en cambio la técnica que emplearemos nos permite tener variaciones de intensidad sobre una misma superficie.

Como podemos iluminar a nuestro modelo desde cualquier punto del espacio donde vive nuestro modelo y no específicamente desde nuestro punto de vista, será necesario entonces definir *lightPos* teniendo en cuenta que se utiliza las coordenadas del World Space así también como los vectores normales (que serán exportados por Blender) y los vértices asociados. Como mencionamos, originalmente los vértices y, en este caso, las normales viven dentro del *Model Space* para convertirlas a *World Space* solo necesitaremos multiplicar por la *World Matrix*. Luego de tener las coordenadas en los respectivos espacios llamaremos a la nueva función *DrawTriangle_m3*.

6.2. Renderizado

6.2.1. Modo 1

Para continuar con la renderización de nuestros modelos construiremos una nueva función llamada *DrawTriangle_m1*

DrawTriangle_m1 y ProcessScanLine_m1:

Sean P_1 , P_2 , P_3 tres vértices de un triángulo ubicado en un valor menor del eje y respecto del siguiente vértice, definiremos $P_1.y$ como el valor en la coordenada y de P_1 , $P_1.x$ como el valor en el eje x, de manera análoga para P_2 , P_3 y posteriormente para SX y EX .

La idea para crear las aristas es definir para cada valor Y entre $P_1.y$ y $P_3.y$ dos puntos SX y EX como se observa en la figura 5 de esta manera la sucesión de puntos creará la idea de aristas.

La principal incógnita que se nos plantea es encontrar el valor $SX.x$ y $EX.x$ (ya que $SX.y$ y $EX.y$ es igual al valor Y de la iteración) de manera que se ubique dentro de la recta que los uniría. Para esto

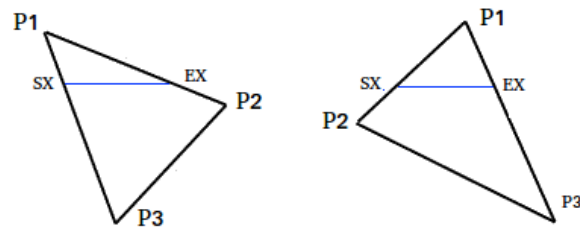


Figura 5: Alguno de los posibles triángulos que se pueden formar con los valores del eje y aumentando hacia abajo y los del eje x hacia la derecha.

utilizaremos la formula de interpolación a partir de conocer el valor del eje y; mientras que los puntos que requiere la función serán los que conformen la recta sobre la cual se encuentren SX y EX.

La función encargada de usar la interpolación de los puntos y proceder con la creación de las líneas la denominaremos *ProcessScanLine_m1* quien sera llamada por *DrawTriangle_m1* en los diferentes escenarios que se nos planteen.

Sean pa, pb los puntos que me permiten interpolar SX y pc y pd los que interpolan a EX podemos definir:

```
ProcessScanLine_m1(pa, pb, pc, pd, Y):
    gradient1 = if (pa.y != pb.y)
        (Y - pa.y) / (pb.y - pa.y)
    else 1
    gradient2 = if (pc.y != pd.y)
        (Y - pc.y) / (pd.y - pc.y)
    else 1;

    SX.x = Interpolate(pa.x, pb.x, gradient1)
    EX.x = Interpolate(pc.x, pd.x, gradient2)

    putpixel(SX.x, Y);
    putpixel(EX.x, Y);
```

Interpolate se basa en el principio de interpolación mencionado en la sección ??, en el mismo definimos el concepto de *gradient* en este caso es necesario definir dos *gradient1* y *gradient2*. pa, pb, pc y pd serán distintos vértices según sea la forma del triángulo (lo que se analizara a continuación) pero, siempre se debería cumplir que $pa.y \leq Y$, $pc.y \leq Y$, $pa.y \leq pb.y$ y $pc.y \leq pd.y$. De esta forma cada uno de los gradientes debería ser positivo aun mas, el denominador siempre debería ser mayor que el numerador por lo que se debería cumplir que $0 \leq gradient1 \leq 1$ y $0 \leq gradient2 \leq 1$. Dado que estamos trabajando con aritmética finita podría haber errores de redondeo tal que no se cumplan estas desigualdades. Para evitar continuar propagando errores y obtener un punto muy distorsionado del que se debería *Interpolate* hará uso de otra función llamada *Clamp* la cual retornara el valor *gradient* final a utilizar es decir, si el pasado por parámetro a *Interpolate* si es que esta entre cero o uno y sino por default el valor 1.

Como mencionamos *DrawTriangle_m1* hará uso de *ProcessScanLine_m1* variando los pa, pb, pc y pd en los distintos casos que se nos presenten, ya que si observamos la figura 5 vemos que no siempre SX o EX se encuentran sobre la misma arista, en un caso SX esta en la arista correspondiente a P1 y P3 mientras que en el otro triángulo esta sobre la conformada por P2 y P1 esto nos lleva a plantearnos y analizar todos los casos antes de comenzar el proceso de crear las líneas. Primero estableceremos una manera de distinguir cuando P1 se encuentra a la derecha de P2 o viceversa: $dP1P2 = (P2.x - P1.x) / (P2.y - P1.y)$ $dP1P3 = (P3.x - P1.x) / (P3.y - P1.y)$ Que representan las pendientes inversas de los puntos que se utilicen. Dado que el valor del eje y se incrementa hacia abajo $dP1P2$ sera positivo cuando P2 este a la derecha de P1 mientras que $dP1P3$ sera negativo, cumpliéndose que $dP1P2 > dP1P3$; y para el caso de P2 a la izquierda de P1 tenemos que $dP1P2 < dP1P3$.

Dado que $P2.y$ podría ser igual a $P1.y$ o $P3.y$ igual a $P1.y$ entonces asignaremos el valor cero a $dP1P2$ y $dP1P3$ correspondientemente. Continuando con los posibles escenarios, decidimos dividir los casos que se presentan cuando $P2.y$ es distinto de $P1.y$ y cuando es igual.

Cuando $P2.y$ es distinto a $P1.y$ se nos presentan los primeros dos casos:

- Primer caso: $P1$ se encuentra a la derecha de $P2$ ($dP1P2 > dP1P3$). Se puede observar en el triángulo izquierdo de la figura 5. $SX.x$ se obtiene a partir de los puntos $P1$ y $P3$, en cambio EX hasta el valor $P2.y$ puede ser calculado con $P1$ y $P2$ pero luego se utilizara a $P2$ y $P3$.
- Segundo caso: $P1$ se encuentra a la izquierda de $P2$ ($dP1P2 < dP1P3$). Correspondiéndose al lado derecho de la figura, vemos que $EX.x$ se obtiene a partir de $P1$ y $P3$, mientras que $SX.x$ con $P1$ y $P2$ hasta que se llegue al valor $Y = P2.y$ y luego con $P2$ y $P3$. Cuando $P2.y$ es igual a $P1.y$ tenemos que evaluar lo siguiente:
- Tercer caso: $SX.x$ se obtiene por los puntos $P1$ y $P3$, mientras que $EX.x$ por $P2$ y $P3$ si $P1.x$ es menor a $P2.x$ en caso contrario $SX.x$ es consecuencia de $P2$ y $P3$ mientras que $EX.x$ de $P1$ y $P3$

Una vez planteadas las distintas situaciones podemos proceder con la rasterización de los triángulos.

El código fuente que describe el proceso anterior es el siguiente:

```
DrawTriangle_m1(v1,v2, v3): (CREO QUE SE PODRÍA DEJAR LA EXPLICACIÓN DE LOS CASOS ANTERIORES  
O ESTE PSEUDOCÓDIGO SOLAMENTE NO SE.....)
```

```
    Designar  $P1$ ,  $P2$  y  $P3$ 
```

```
    Calcular  $dP1P2$  y  $dP1P3$ 
```

```
    if (Primer Caso)
        for ( $Y = P1.y$  to  $P3.y$ )
            if( $Y < P2.y$ )
                ProcessScanLine_m1( $P1$ ,  $P3$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $Y$ )
            else
                ProcessScanline_m1( $P1$ ,  $P3$ ,  $P2$ ,  $P3$ ,  $Y$ )
    if(Segundo Caso)
        for ( $Y = P1.y$  to  $P3.y$ )
            if( $Y < P2.y$ )
                ProcessScanLine_m1( $P1$ ,  $P2$ ,  $P1$ ,  $P3$ ,  $Y$ )
            else
                ProcessScanline_m1( $P2$ ,  $P3$ ,  $P1$ ,  $P3$ ,  $Y$ )
    if (Tercer Caso)
        for ( $Y = P1.y$  to  $P3.y$ )
            if( $P1.x < P2.x$ )
                ProcessScanLine_m1( $P1$ ,  $P3$ ,  $P2$ ,  $P3$ ,  $Y$ )
            else
                ProcessScanline_m1( $P2$ ,  $P3$ ,  $P1$ ,  $P3$ ,  $Y$ )
```

6.2.2. Modo 2

En el segundo modo procederemos a rellenar los triángulos adoptando la idea del algoritmo Scan Line. El mismo se basa en rellenar cada triángulo de izquierda a derecha por medio de un conjunto de pixels (que representaría la línea azul en la figura 5) y, continuando con la notación del modo anterior, descendiendo desde $P1.y$ hasta $P3.y$.

Comenzaremos sobre el punto SX ubicado sobre las aristas del lado izquierdo de los triángulos y procederemos a crear una sucesión de puntos, incrementando el valor de SX.x, hasta llegar al extremo derecho es decir, al punto EX.x. Esta idea la aplicaremos empezando a iterar desde un valor Y igual a P1.y y cada vez que se completa una línea procederemos a aumentar el valor Y para crear una nueva, hasta que llegar a P3.y. La técnica para rellenar los triángulos será la definida anteriormente ahora tenemos que definir los valores que tendrán esos pixels es decir, su color y mas aun su textura (en el caso de tener la información necesaria).

Finalmente definiremos *ProcessScanLine_m2* que será una variante de *ProcessScanLine_m1* a la cual se le exportaran las coordenadas UV de los vértices utilizados y el puntero a la textura.

ProcessScanLine_m2:

Ahora esta función tendrá las coordenadas UV para cada vértice. En cada una de las líneas que vamos construyendo definimos dos puntos SX y EX y luego procedemos a calcular sus valores intermedios, ahora también será necesario calcular las coordenadas UV asociadas a estos. La forma de calcularlos será por medio de la interpolación. Si los puntos pa y pb nos permitían obtener SX y, pc y pd a EX de manera similar si utilizamos las coordenadas U asociadas a estos vértices podemos calcular un valor *su* y *eu* que indiquen el rango de valores que utilizaremos de la coordenada U; mientras que con las coordenadas del eje V podemos calcular *sv* y *ev* delimitando el rango de valores usados de V.

Una vez calculados *su*, *eu* podremos interpolar los valores intermedios para calcular las coordenadas U de los puntos entre SX.x y EX.x e interpolando con *sv* y *ev* obtendremos los valores del eje V.

Dado que las coordenadas en los ejes UV están entre los valores cero y uno, una vez calculadas las coordenadas UV de cada punto será necesario escalarlas para acceder correctamente en *tex*. Solucionaremos esto definiendo la función *map* que realiza el producto del ancho de la imagen con el valor de la coordenada U y el producto del alto de la imagen con la coordenada V e indexara en *tex*. Por ultimo dibujar cada punto con el color asociado estará a cargo de *Draw_point*. En caso de no tener una textura cargada simplemente asignaremos un numero de color arbitrario. A partir de este modo implementaremos el uso del *depthBuffer* mencionado en 4.6 por lo que será necesario además interpolar el valor z asociado a cada punto para luego poder comparar y así dibujar o no un píxel.

finalmente podemos expresar la función por medio de siguiente pseudocódigo:

```
ProcessScanLine_m2(pa, pb, pc, pd, Y, tex):
    gradient1 = if (pa.y != pb.y)
        (Y - pa.y) / (pb.y - pa.y)
    else 1
    gradient2 = if (pc[1] != pd[1])
        (Y - pc.y) / (pd.y - pc.y)
    else 1;

    SX.x = Interpolate(pa.c, pb.c, gradient1) //.c coordenadas luego del producto por WVP
    EX.x = Interpolate(pc.c, pd.c, gradient2)
    su = Interpolate(pa.U, pb.U, gradient1) //.U denota al valor en la coordenadas U
    eu = Interpolate(pc.U, pd.U, gradient2)
    sv = Interpolate(pa.V, pb.V, gradient1).V denota al valor en la coordenadas V
    ev = Interpolate(pc.V, pd.V, gradient2)
    z1 = Interpolate(pa.z, pb.z, gradient1)
    z2 = Interpolate(pc.z, pd.z, gradient2)

    for (x = SX.x to EX.x)
        gradient = (x - sx) / (float)(ex - sx)
        z = Interpolate(z1, z2, gradient)
        u = Interpolate(su, eu, gradient)
        v = Interpolate(sv, ev, gradient)
        if (tex != NULL)
```

```
textureColor = Map(tex, u, v)
else
    textureColor = 0xffffffff;

putpixel(x, Y, z, textureColor)
```

6.2.3. Modo 3

DrawTriangle_m3:

Extenderemos la versión anterior, *Drawtriangle_m2*, de manera que ahora calcule la luz que recibe cada vértice.

La idea de los vectores normales es que cuanto menor sea el ángulo entre estos y la dirección de la luz (figura 6) entonces la luz incidirá más sobre el vértice asociado y de esta manera la intensidad del color se mantendrá, en caso contrario tendera a un color mas oscuro para simular sombras.

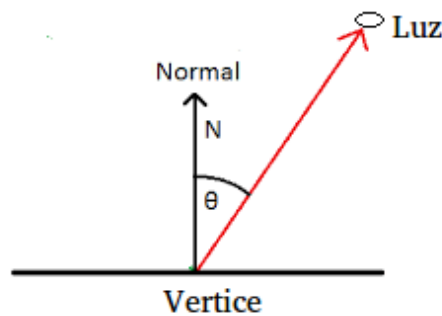


Figura 6

Dado que no tenemos el vector dirección de la luz pero si la posición y la coordenada sobre la cual incide (*centerPoint*) procederemos a calcular la dirección como: $lightDirection = lightPos - centerPoint$. Una de las formas que podemos calcular la intensidad de luz que llega a cada vértice es con el coseno del ángulo formado por *lightDirection* y cada vector normal. Cuando el ángulo es cero entonces el coseno es igual a uno, lo de que denotara la idea de luminosidad máxima; si bien la función coseno tiene como imagen valores entre $[-1; 1]$ fijaremos como valor mínimo cero que representara luminosidad nula. De esta forma podemos observar que si multiplicamos el color por 1, valor de luz máxima, se sigue manteniendo igual el color mientras que si el valor decrece el color sera mas oscuro hasta llegar a 0 por lo que obtendremos el color negro.

El coseno de un ángulo θ formado por dos vectores A y B se puede calcular como: $\cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|}$ con $\|A\|$ y $\|B\|$ la distancia Euclidiana de A y B respectivamente.

Si normalizamos el vector A y B el denominador sera igual a 1 y de este manera solo calculando el producto vectorial podemos obtener el coseno del ángulo. Calcularemos *lightDirection* junto con el coseno del ángulo asociado en una función auxiliar *ComputeNdotL* que sera llamada en *DrawTriangle* para cada vértice, y utilizaremos estos valores para extender la función *ProcessScanLine_m2* en una nueva versión llamada *ProcessScanLine_m3*.

ProcessScanLine_m3: Tenemos el porcentaje de luz para las coordenadas que representan a los vértices, solo nos falta para el resto de las que componen cada triangulo, por lo que cada vez que interpoemos las coordenadas para rellenar el triangulo, también interpolaremos la luz que recibiría basándonos en la que tienen los vértices. Por ultimo solo debemos multiplicar este valor por el color del punto interpolado.

7. Análisis de performance y experimentación

En esta sección vamos a presentar varios resultados de distintos tipos de mediciones que realizamos. Observando estos datos vamos a poder explicar el porqué de la definición de algunas funciones en Assembler y otras en C que sustituyen a otras funciones originales de la aplicación que realizan un mayor consumo de cómputo.

Dado que se trata de una aplicación interactiva en el sentido de que no es el tipo de software que se ejecuta, devuelve un output y termina, realizar mediciones puede ser un poco más complicado. Lo que nosotros decidimos hacer fue poner una cota superior a la cantidad de iteraciones que realiza el ciclo principal de la aplicación (mencionado en la sección 2) ya que es el encargado de ejecutar toda la funcionalidad que se provee. Una vez que se alcanza esa cota, la aplicación termina.

Además, dado que existen varios modos de renderizado y transformaciones que le podemos hacer a nuestro modelo mientras la aplicación está corriendo, es necesario elegir alguna configuración posible para poder realizar las mediciones. En nuestro caso el modo de renderizado 1 (esqueleto) no lo vamos a utilizar ya que necesita muy poco poder de cómputo para poder ejecutarse, en cambio los modos 2 (con textura) y 3 (con textura y sombra) sí los vamos a usar. Además, vamos a hacer que el modelo rote en las tres direcciones (hacemos esto para aumentar la cantidad de operaciones matriciales que realiza la aplicación), con la velocidad de rotación que viene por default. No se va a realizar escalado una vez que el modelo ya esté dibujado, es decir, el modelo va a conservar el tamaño original o el que configuremos al cargarlo si es necesario aplicar un reescalado para que entre en la pantalla. El modelo que vamos a utilizar para realizar las mediciones va a ser `alfred.obj`, con su correspondiente textura `alfred.bmp`.

La herramienta `gprof` nos provee un informe detallado del consumo de cada una de las funciones de la aplicación. De esta manera, luego de correr `gprof` obtenemos, entre otras cosas, una tabla con el porcentaje de tiempo consumido por cada función. Nosotros nos vamos a concentrar en las funciones que más tiempo consumieron, ignorando así otras donde el consumo es mínimo y no nos proveen información relevante.

7.1. Optimización del código encargado de la interpolación

Comencemos haciendo una corrida de `gprof` a nuestra aplicación con el código hecho exclusivamente en C y veamos si podemos mejorar algo a partir de eso.

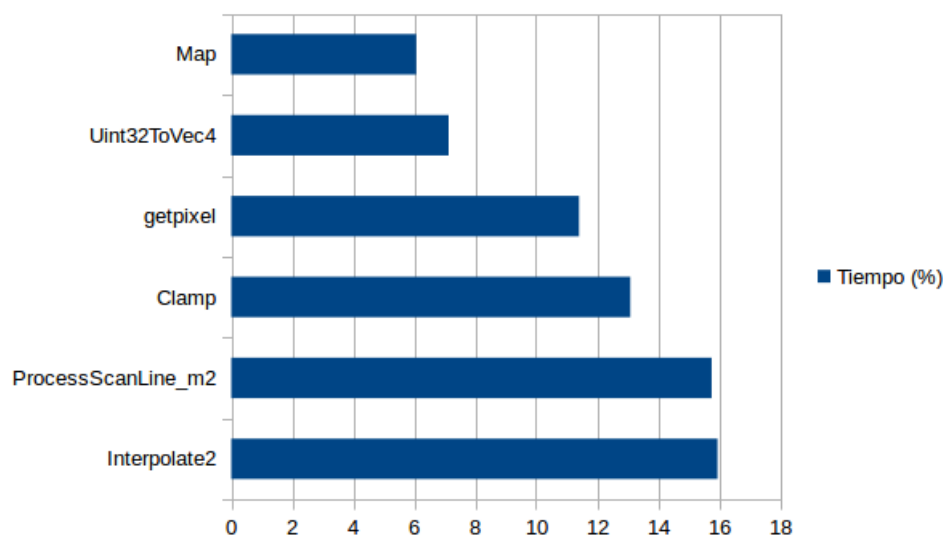


Figura 7: Código puramente en C, rotación en los tres ejes, renderizado en modo 2 y 1000 iteraciones del ciclo principal.

Podemos ver que la función `Interpolate2` es la que más consumo de tiempo realiza y le siguen

ProcessScanLine_m2 y *Clamp*. Recordemos que tanto *Interpolate2* como *Clamp*, son funciones matemáticas que son llamadas durante el proceso de rasterización. Más aún, *Interpolate2* realiza una llamada a *Clamp* en su definición y a su vez *ProcessScanLine_m2* llama sucesivas veces (11 para ser exactos) a *Interpolate2*. Claramente estas tres funciones están muy vinculadas entre sí y debido a las numerosas llamadas a *Interpolate2*, la idea va ser optimizar ésta función.

Dado que *Interpolate2* nos da como resultado un float (4 bytes) y la idea de utilizar Assembler es para emplear las instrucciones SIMD que nos permitan cargar en un registro 16 bytes, aprovecharemos la cantidad de veces que se utiliza esta función dentro de *ProcessScanLine_2*.

En cuanto a las otras funciones, Map y getpixel están muy relacionadas con SDL ya que Map lo que hace es simplemente realizar un cálculo con el ancho y el alto de una textura y ciertas coordenadas para obtener otras coordenadas (en píxeles), llamar a getpixel y devolver el valor del píxel precisado. En principio es difícil pensar una manera de optimizar esto porque además Map es llamada una sola vez (en *ProcessScanLine_m2*) y getpixel también (en Map). Finalmente Uint32ToVec4 hace algo bastante simple que es convertir un color en formato uint32 (con el que trabaja SDL) a vector de float que es el tipo de dato que utilizamos nosotros en nuestras funciones. Lo hace mediante ANDs, shifteos y divisiones con lo cual también se trata de una función bastante minimal en cuanto a operaciones que realiza.

También buscaremos mejorar *Interpolate2* pero manteniendonos en el lenguaje C, lo que vamos a hacer es que no llame a Clamp. Es decir, la función Clamp también tiene un consumo considerable y el hecho de que *Interpolate2* se llama tantas veces y ésta a su vez llama a Clamp puede evitarse haciendo Clamp dentro de interpolate. Para esto, vamos a definir entonces *Interpolate1* y veamos que resultados nos arroja gprof ahora:

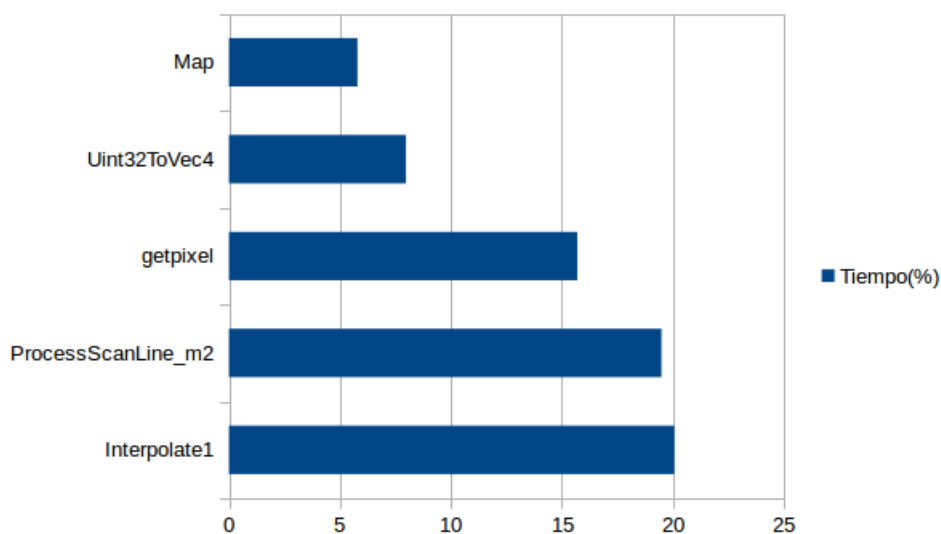


Figura 8: Misma configuración de parámetros iniciales, ahora Clamp está dentro de *Interpolate1*.

Se puede ver que el porcentaje de tiempo consumido es un poco mayor en *Interpolate1* que antes en *Interpolate2* y lo mismo sucede con *ProcessScanLine_m2*. En principio, pareciera que lo que hicimos empeoró las cosas, sin embargo sucedió todo lo contrario. El porcentaje de aumento que se registró en estas funciones se debe a que gracias a que ahora no existe Clamp, el tiempo total que tarda el programa en realizar las 1000 iteraciones es menor. Dado que la cota de iteraciones no cambió, la cantidad de veces que se ejecuta cada función sigue siendo la misma y en consecuencia el porcentaje del tiempo de consumo de las funciones que quedaron aumentó.

Para corroborar este hecho observamos además que los FPS aumentaron aproximadamente el doble con *Interpolate1* y el tiempo que tardó la aplicación en llegar a las 1000 iteraciones fue considerablemente menor también.

Ahora veamos que datos obtenemos renderizando en modo 3 con la misma configuración de parámetros y hagamos la comparación entre estas dos versiones de Interpolate.

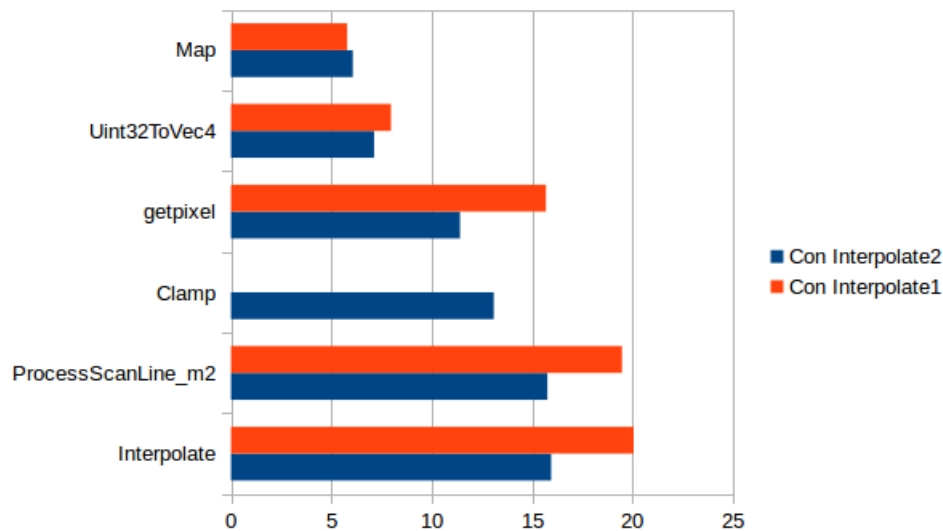


Figura 9: Misma configuración de parámetros iniciales salvo que ahora renderizamos en modo 3.

Vemos que la comparación en este modo es muy similar a la del modo anterior. En cuanto a tiempos y FPS pasa algo similar (el tiempo disminuye y los FPS aumentan considerablemente al utilizar *Interpolate1*) solo que en este caso los tiempos son un poco mayores debido a que es el modo más costoso por los cálculos con las normales.

7.2. Optimizaciones en Assembler

Como explicamos en la sección anterior, las mediciones realizadas hasta ahora fueron hechas sobre el código en C. Decidimos implementar varias funciones en Assembler, sobre todo las que hacen procesamiento matricial pero también otras como la encargada de la interpolación y la de limpiar el depth buffer y ver si esto efectivamente representa una mejora en la performance. A continuación mostramos los resultados que arroja gprof con las funciones que venimos analizando hasta ahora.

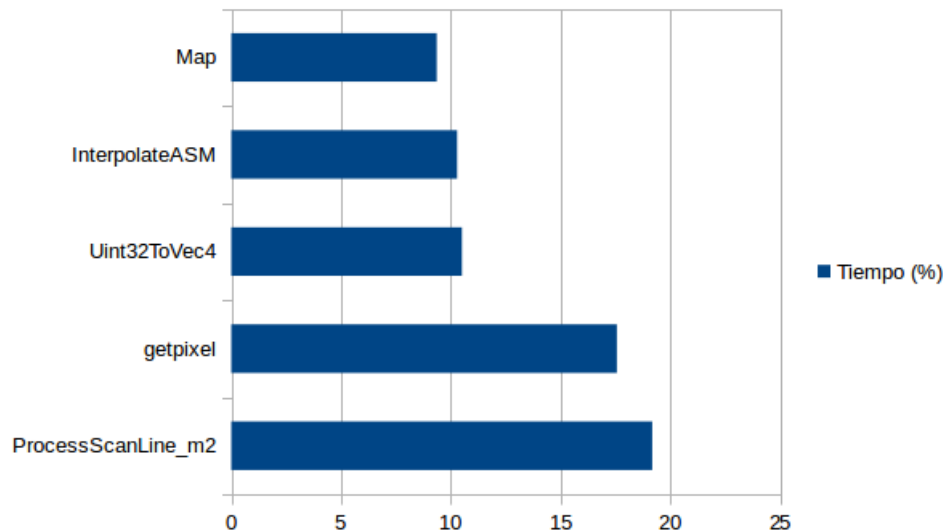


Figura 10: Misma configuración de parámetros iniciales, modo 2.

El consumo que realiza *InterpolateASM* ahora es significativamente menor comparado con el que realizaba *Interpolate1* e *Interpolate2*. Esta nueva implementación en Assembler efectivamente reduce los recursos que necesita esta función para ejecutarse.

Como dijimos antes existen otras funciones que decidimos implementar en Assembler, no podemos mostrar sus porcentajes de consumo aca porque el gprof no arroja esos resultados. Esto puede ser porque son muy pequeños (ya eran relativamente pequeños en sus versiones de C) y no los tiene en cuenta. Sin embargo, el tiempo total que tarda en ejecutar las 1000 iteraciones esta versión en Assembler es considerablemente menor, sobre todo cuando estamos en modo 3. El siguiente gráfico muestra los tiempos en segundos de cada una de las versiones con los distintos modos:

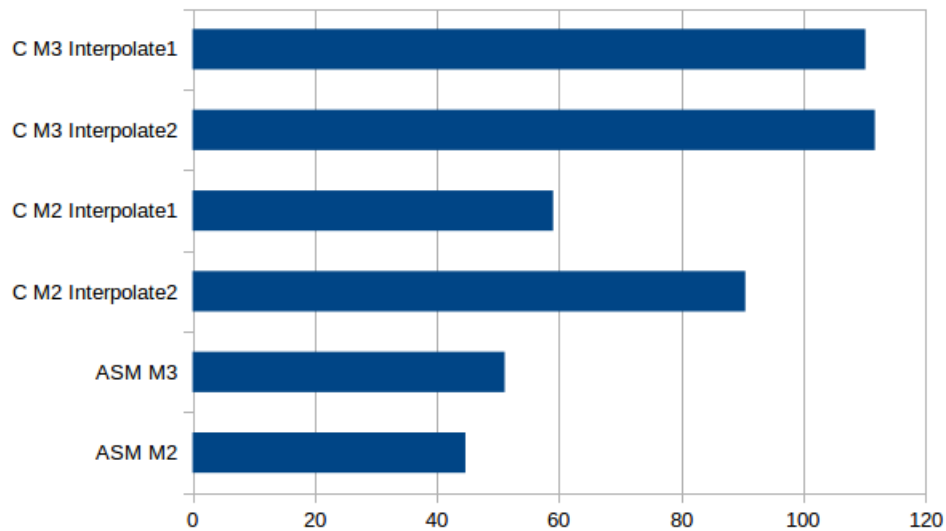


Figura 11: Tiempos totales en finalizar las 1000 iteraciones con las distintas versiones. Fueron medidos en un procesador i5 con 8gb de RAM.

Finalmente, presentamos un último gráfico con los FPS promedio de cada versión:

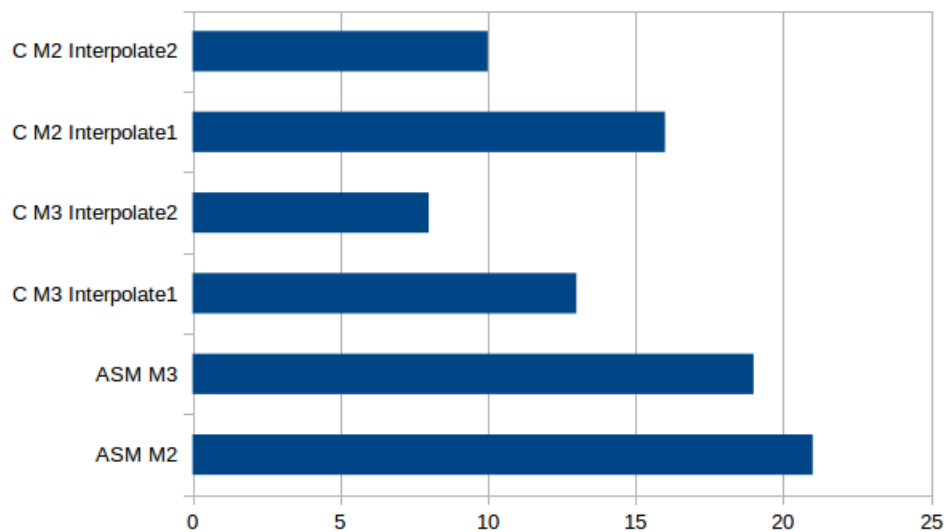


Figura 12: FPS promedio medidos en un procesador i5 con 8gb de RAM.

Se puede ver como en ambos gráficos quedan en evidencia las mejoras presentadas por las versiones en Assembler, tanto en el modo 2 como en el modo 3. Se ve reflejado que el hecho de usar Interpolate1 mejora un poco las cosas, pero no alcanza a la performance de las versiones en Assembler, lo cual significa que haber optimizado con SIMD la interpolación, los cálculos matriciales y la inicialización del depth buffer efectivamente valió la pena.

7.2.1. InterpolateASM

Explicaremos un poco esta versión de interpolación hecha en Assembler debido a su importancia en la rasterización. Por cada llamada a esta función calcularemos, cuando sea posible, cuatro valores de los que se deben interpolar. Entonces la función recibirá los valores necesarios para interpolar dentro de distintos vectores, donde cada posición representa los valores necesarios para calcular los distintos puntos a interpolar. Básicamente podemos representar esta función con el siguiente pseudocódigo:

Si en `xmm0` tenemos cargado los distintos *gradient*, en `xmm1` cada 4 bytes se encuentra uno de los puntos que necesario para la interpolación (a los que llamaremos *min*), en `xmm2` el segundo valor que se necesita (llamados *max*) y en `xmm3` cuatros valores 1 representado cada uno con 4 bytes luego:

```
xorps xmm4, xmm4; 0 | 0 | 0 | 0
movdqu xmm5, xmm0; gradient1 | gradient2 | gradient3 | gradient4 |
movdqu xmm6, xmm0; gradient1 | gradient2 | gradient3 | gradient4 |
subps xmm2, xmm1 ; max1 - min1 | max2 - min2 | max3 - min3 | max4 - min4
;A continuación se procede a implementar lo realizado por la función clamp
pcmpgtd xmm0, xmm4 ; gradient1 > 0 | gradient2 > 0 | gradient3 > 0 | gradient4 > 0
pcmpeqd xmm5, xmm3; gradient1==1 | gradient2==1 | gradient3==1 | gradient4==1
pcmpgtd xmm3, xmm6 ; 1 > gradient1 | 1 > gradient2 | 1 > gradient3 | 1 > gradient4
orps xmm3, xmm5 ; FFFF para los gradient >= 1 en caso contrario 0000
andps xmm3, xmm0 ; FFFF cuando 1 >= gradient > en caso contrario 0000
andps xmm3, xmm6 ; clamp1 | clamp2 | clamp3 | clamp1
;finalmente se realiza el producto entre el gradiente correspondiente
mulps xmm2, xmm3 ; (max - min)*clamp
addps xmm1, xmm2 ; min + (max - min)*clamp
;procedemos a mover el resultado
movdqu [r8], xmm1
```

En este caso `r8` contiene la dirección inicial de un vector que usaremos para almacenar los distintos puntos interpolados por lo que luego de llamar a *interpolateASM* habremos calculados 4 puntos. Si bien para esta versión son necesarios vectores adicionales, creemos que aun así obtendríamos una mejor performance respecto al tiempo necesario ya que estamos reduciendo la cantidad de llamadas a funciones que se encarguen de la interpolación.

7.2.2. Vec4Mat4ProductASM

Si bien la función *Vec4Mat4Product* no se encuentra entre las que demandan un gran tiempo, decidimos realizar una versión en Assembler para aprovechar el procesamiento vectorial de SIMD. En esta sección explicamos un poco cómo está hecha esta versión de la función. Esta función realiza el producto entre un vector de floats de tamaño 4 y una matriz de 4x4 también de floats.

En un registros `xmm` podemos almacenar los valores del vector y en otros cuatros a cada una de las filas. Si en `rdi` tenemos el puntero al float que representa el vector `v` y en `rsi` a la matriz `m`:

```
movdqu xmm0, [rdi] ; v_1 | v_2 | v_3 | v_4
movdqu xmm1, [rsi] ; m_11 | m_12 | m_13 | m_14
mulps xmm1, xmm0 ; m_11*v1 | m_12*v2 | m_13*v3 | m_14*v4
haddps xmm1, xmm1
haddps xmm1, xmm1; m_11*v1 + m_12*v2 + m_13*v3 + m_14*v4 cada 4 bytes
```

repetiendo estas ultimas tres instrucciones pero para `xmm2`, `xmmm3` y `xmmm4` y sumando a `rsi` 16 por cada registro (lo cual representa avanzar una fila completa) tendremos en

4 registros los valores que conforman el vector resultado solo queda dejarlo en un solo registro obteniendo el producto que se requería.

7.2.3. `initDepthBufferASM`

Una función que no aparece en los gráficos (porque tiene un consumo de tiempo del 4% aproximadamente) pero es bastante importante ya que nos permite realizar el Depth Test y así decidir cuando pintar un píxel y cuando no, es `initDepthBuffer`. Se trata de una función relativamente sencilla ya que es la encargada de resetear los valores del `DepthBuffer` lo cual originalmente se realiza iterando las $ANCHO * ALTO$ posiciones. Decidimos hacer una versión en asm (`initDepthBufferASM`) que también constará de un ciclo con la diferencia que ahora podemos cargar cuatro valores por iteración y entonces ahora la cantidad de iteraciones totales será de $\frac{ANCHO * ALTO}{4}$. Esta versión reduce el consumo a menos de un 1%.

8. Compilación y librerías adicionales

Para poder trabajar con las distintas funciones provistas por la librería SDL fue necesario la instalación de los siguientes paquetes:

`build-essential xorg-dev libudev-dev libgl1-mesa-dev libglu1-mesa-dev libasound2-dev libpulse-dev libopenal-dev libogg-dev libvorbis-dev libaudiofile-dev libpng12-dev libfreetype6-dev libusb-dev libdbus-1-dev zlib1g-dev libdirectfb-dev libsdl2-ttf-dev`

Una vez instaladas las anteriores dependencias, es posible la compilación exitosa de los distintos archivos y por ende la creación del ejecutable que va a representar a nuestro renderizador.

Dado que existen dos versiones de código, uno realizado puramente en C y el otro optimizado con funciones en ASM, cada uno poseerá su correspondiente Make File de esta forma ejecutando la instrucción `make` por consola se obtendrá el ejecutable `renderizar`.

Finalmente para poder hacer uso de nuestro programa solo es necesario pasar por parámetro a `renderizar` el nombre del archivo `*.obj` y el nombre de la imagen en formato `*.bmp` es decir:

```
.\renderizar archivo.obj imagen.bmp
```

En caso de que el archivo no cuente con las coordenadas UV solo se pasara el nombre del archivo como parámetro.

9. Conclusión

Desarrollar una aplicación de este tipo nos obligó de cierta manera a aprender muchos conceptos matemáticos que son necesarios para implementar las funciones más importantes. Si bien estos conceptos no son difíciles, son muy variados y un error de cuentas mínimo afecta de manera directa en la renderización.

También fue necesario interiorizarse en un formato específico de archivos que almacenan modelos 3D para poder implementar correctamente su lector, esto nos trajo varios problemas al principio porque, si bien se trata de un solo formato (`.obj`), existen muchísimas variantes dentro del mismo. Muchas veces descargábamos un modelo de internet y nuestra aplicación tiraba error porque no toleraba esa variante que ni siquiera conocíamos y debíamos investigar de que se trataba e implementarla.

El hecho de programar todo en C y Assembler hizo que tengamos que ocuparnos de construir estructuras dinámicas para la carga de los modelos, lo cual si bien no fue difícil porque se trata de estructuras

bastante básicas, adhiere cierta complejidad al código. Sin embargo, un software de este tipo en un lenguaje de alto nivel con manejo de memoria automático significaría probablemente una pérdida de performance bastante alta.

10. Bibliografía