輔仁大學資訊工程學系

畢業專題報告

B03 組

Rish Engine - 2D 遊戲引擎

從零開始自幹遊戲引擎

成員

406262515 鍾秉桓 me@roy4801.tw

406262084 梁博全 me@icejj.tw

406262319 黃育晧 suntalk1224@gmail.com

406262163 黃品翰 william31212@gmail.com

報告編號: CS109-PR-B03

指導教授

鄭進和

December 8, 2020

Contents

List of Figures

List of Tables

Chapter 1

摘要

1.1 背景簡介

本專題是以 C++ 開發之 2D 遊戲引擎，開發者可以使用引擎提供之編輯器 (RishEditor) 編輯遊戲場景 (Scene)，並且可以對遊戲物件 (Entity) 附加遊戲邏輯 (使用 C++ 撰寫，並和編輯器一同編譯)，並支援 Batch Rendering [1] 、2D Lighting (Point Light, Ambient Light), Particle System, Constrain-based Physics (支援圓形、多邊形等)

1.2 問題說明

TODO

1.3 實作結果

TODO 本專題製作解決問題方法、創新所在、與實作結果等概要陳述

[1] 一種 Rendering 技巧，可支援同屏幕高達 100000 個 sprites

Chapter 2

緒論

2.1 動機

隨著遊戲的發展，現代的遊戲越來越趨於複雜，從數人的小型獨立製作，到數百人的大型 3A 級遊戲，遊戲的規模與以前不可同日而語，現今一個獨立開發工作室製作的 2D 遊戲，在十多年前要達到同樣的規模可能要數十人的團隊才可能達到，而這些節省下來的時間成本，就是多虧了遊戲引擎的強大之處。現代遊戲引擎的複雜度，先進的圖學技術，複雜的物理模擬，是需要一個具有規模的團隊來開發的，我們嘗試以此為目標，試著實作了一個具有一定規模的 2D 遊戲引擎。

2.2 問題描述

2.2.1 歷史介紹

最初並沒有所謂的遊戲引擎，遊戲常常是重頭開始建構 (from scratch) 的，這個概念被眾人所知最早是由 Jhon Carmack 發揚光大，他為 Doom 以及 Quake 系列遊戲開發的 3D 遊戲引擎，深深地影響了遊戲業界，為早期 (1990 末) 的遊戲業界標準，並促成引擎授權的商業模式，使得遊戲軟體的規模上升。

2.2.2 遊戲是什麼

電腦遊戲的技術本質是實時 (real-time) 可交互 (interactive) 的程式，遊戲程式會模擬出不精確但足以表現的遊戲世界，並且根據玩家的輸入做出相對的輸出 (例如操作搖桿控制角色等)，通常遊戲會實作遊戲循環 (Game Loop)，更新遊戲邏輯、物理模擬、更新 AI 等。而通常遊戲要維持在每秒更新 60 幀才能保證流暢運行 (低於 60 fps 通常會感覺卡頓)，也就是要在 16 毫秒內做完所有的遊戲更新並渲染到螢幕上頭，更何況在 VR 上要維持 90 FPS 才不會感覺暈眩，這也是為甚麼遊戲會如此要求效能。

2.2.3 遊戲引擎是什麼

遊戲引擎 (Game Enigne) 從字面上解釋是驅動遊戲的基礎程式，因此遊戲引擎須具備了窗口管理、輸出入管理、渲染 (Rendering) 系統、物理 (Physics) 系統…等子系統，

除了基礎程式之外，要是一個遊戲引擎還必須要有讓遊戲開發者使用之工具 (可視化、非可視化)，可能是單個工具或一整個工具鏈 (Toolchain)，使得遊戲開發者可以用該工具開發遊戲 (Developing)、進行測試 (Debugging)、封裝發布 (Shipping) 等，否則就只能被稱為遊戲框架 (Game Framework)。遊戲引擎會讀入自訂的資源 (Asset) 格式 [1]，並且有工具支援設計師將素材 (貼圖、音效、模型等) 轉換成引擎的格式，或是引擎工具可以直接產生，因此遊戲引擎可以說是專門開發遊戲的開發環境。

2.2.4 遊戲引擎具備的功能

TODO

[1] 常常是為了效能才會這樣做

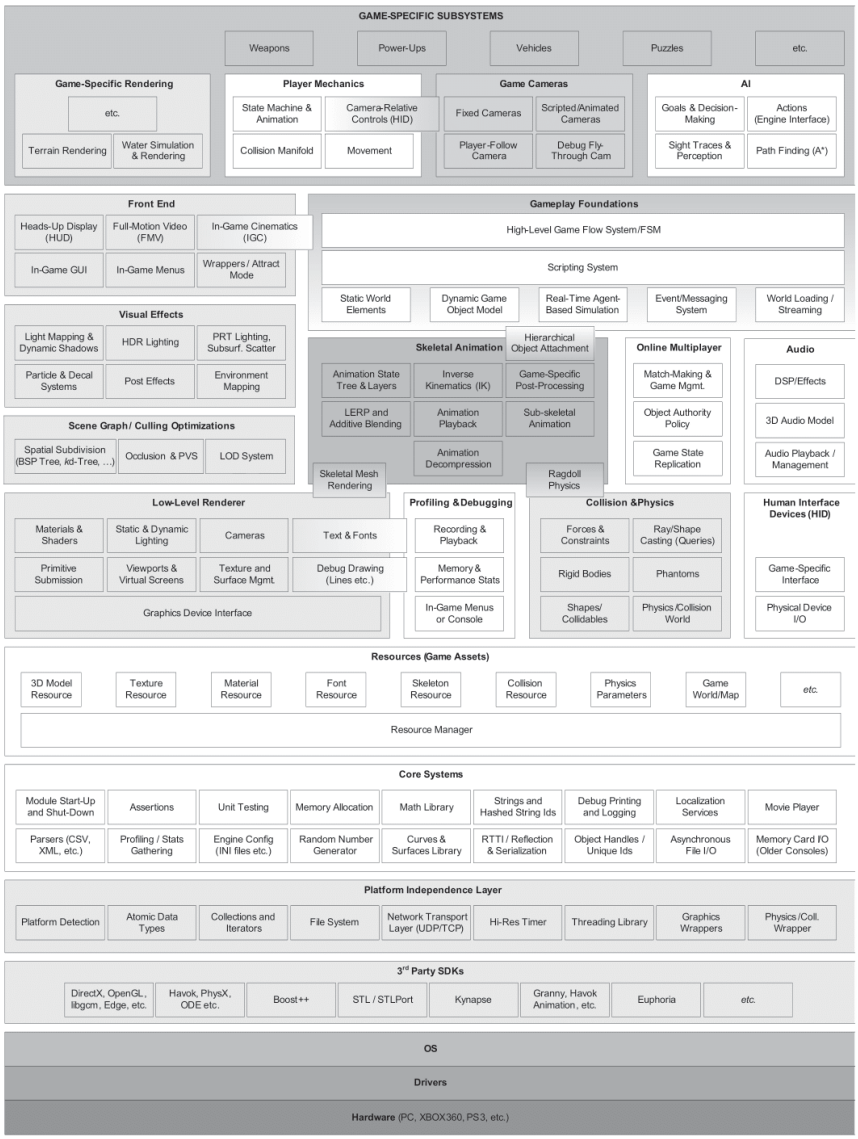


Figure 1.11. Runtime game engine architecture.

Chapter 3

系統說明

3.1 使用技術

3.1.1 使用語言

使用 C++ 11 作為主要開發語言，使用 msys2 作為套件管理器[1]，CMake 建置專案，使用 doxygen 工具將註解轉換 documentation, cppcheck C++ 的靜態程式碼分析器

- Slack

  團隊協作軟體，用於溝通紀錄

- Trello

  看板軟體，用於工作進度管理

- git, github

  版本控制

TODO 寫多一點

為何選 C++ 做為開發引擎之語言?

因為 C++ 讓開發者可以自由掌控記憶體，讓開發者可以精確的控制變數的生命週期，沒有垃圾回收 (Garbage Collection)，這對於效能注重的遊戲引擎來說相當重要；比 C 來得高階但效能卻沒損失很多；C++ 歷史悠久且有許多精良的函式庫可以使用。[4]

使用函式庫

- SFML

  一個 C++ 的跨平台用於遊戲、多媒體程式開發的函式庫，於此專案中用於 Input 及窗口操作等

[1] 在 Windows 上，沒有套件管理器會非常痛苦

- OpenGL + glad

  一個跨平台的 API ，使用 glad 載入器

- imgui

  一個輕量、快速的 Immediate Mode GUI 函式庫，常在遊戲開發、工具開發等使用，於此專案中用於編輯器的 UI 開發。

- spdlog

  一個輕量、快速的 Logging 函式庫，於此專案中用於處理除錯訊息。

- nativefiledialog

  小型的 Open File Dialog 函式庫，於此專案中用於處理開啟檔案視窗。

- IconFontCppHeaders

  字體的 Helper Headers，於此專案中用於引入自訂字體。

- fmt

  補足了 C++ 標準庫缺少的格式化輸出輸入。

- glm

  OpenGL 數學函式庫，於此專案中用於處理向量、投影等相關數學函式。

- cereal

  C++ 缺少的序列化函式庫，於此專案中用於序列化儲存資源。

- re2

  來自 Google 的 Regular Expression 函式庫，標準庫的有夠慢 (確信。

-

Chapter 4

系統實作結果

4.1 引擎介紹

4.1.1 架構

流程圖

架構圖

TODO

4.1.2 Entity Component System

TODO

4.1.3 Batch Rendering

研究背景

傳統上 OpenGL 要畫圖形到螢幕上時，會建立 VAO(Vertex Array Object) 用來儲存 VBO (Vertex Buffer Object) 和 IBO (Index Buffer Object)，其中 VBO 儲存圖形的點座標、IBO 儲存 index 座標，最後用 glDrawElements() 讓 OpenGL 將圖形經過 Rendering Pipeline 畫在 Target 上 (通常是螢幕或是 Framebuffer)。

```
InitializeRenderer();

for( /* 場景的所有物體 */ )
{
    Render();
}
```

但是遊戲引擎在畫場景中的每個物體時，如果每個物體都要重新建構 VBO 和 IBO 時，則會耗費大量時間在從 CPU 傳輸資料到 GPU 中，同時也必須減少 OpenGL 的 State 變換，因此將渲染前先將多種圖形的頂點收集起來，再一次進行繪製，減少 Draw Call 進而增加可以繪製的圖形數量。

```
InitializeRenderer();
size_t vertex_count = 0;

while( /* 場景還有物體尚未渲染 */ )
{
    CollectVertices();
    vertex_count += size;
    // 超過單次 Draw Call 的上限，先渲染
    if(vertex_count > MAX_VERTEX_COUNT_PER_DRAWCALL)
    {
        Render();
        ResetRenderer();
        vertex_count = 0;
    }
}
```

實作

以畫矩形作為例子，首先要有辦法操作頂點，因此要有頂點的 class

```
struct QuadVertex
{
    vec3 position;
    vec4 color;
    vec2 texCoord;
    float texIndex;
};
```

四個頂點構成一個矩形，所以接著宣告矩形的 class，重載小於運算子是為了要能排序，這在要開啟深度測試時很重要。[1]

```
struct QuadShape
{
    QuadVertex p[4];

    friend bool operator<(const QuadShape &lhs, const QuadShape &rhs)
    {
        return lhs.p[0].position.z < rhs.p[0].position.z;
    }
};
```

接著可以開始著手進行 Renderer 的撰寫:

```
struct QuadRenderer
{
    void init()
    {
        vao = CreateVertexArray();

        VBO *vbo = CreateVertexBuffer(MaxQuadVertexCount *
            sizeof(QuadVertex));
        vbo->SetVertexBufferLayout();
```

[1] TODO

```
        vao->SetVertexBuffer(vbo);

        IBO *ibo = CreateIndexBuffer(MaxQuadIndexCount);
        ibo->SetIndexBuffer( /* 根據 premitive type 的不同 */ );
        vao->SetIndexBuffer(ibo);

        // 載入 Shader
        shader = LoadShader();
        shader->initTextureSlots();
    }

    void submit(const vec4 position[4], const vec4 &color, const vec2
        texCoords[4], float texIndex)
    {
        QuadShape submitQuad{};
        // Add vertices of a quad to buffer
        for(int i = 0; i < 4; i++)
        {
            submitQuad.p[i].position  = position[i];
            submitQuad.p[i].color     = color;
            submitQuad.p[i].texCoord  = texCoords[i];
            submitQuad.p[i].texIndex  = texIndex;
        }
        //
        quadIndexCount += 6;
        //
        quadShapeList.push_back(submitQuad);
    }

    void draw(bool DepthTest, const mat4 &ViewProjMatrix)
    {
        if(DepthTest)
            sort(quadShapeList.begin(), quadShapeList.end());

        // 設定頂點資料
        vao->setVertexBufferData(quadShapeList);

        // 設定 Shader uniform
        shader->setUniformMat4("u_ViewProjection", ViewProjMatrix);

        // 渲染
        DrawElement(vao);
    }

    VAO *vao = nullptr;
    Shader *shader = nullptr;
    std::vector<QuadShape> quadShapeList;
    uint32_t quadIndexCount = 0;
};
```

init() 負責初始化 Renderer 的狀態以及準備 VBO, IBO 和 Shader 的初始化，Renderer 初始化結束後，便可以開始提交頂點到 Renderer 上，submit() 可以提交要畫的頂點，接著 draw() 在每個 Batch 的最後將頂點渲染，結束這一次的渲染。

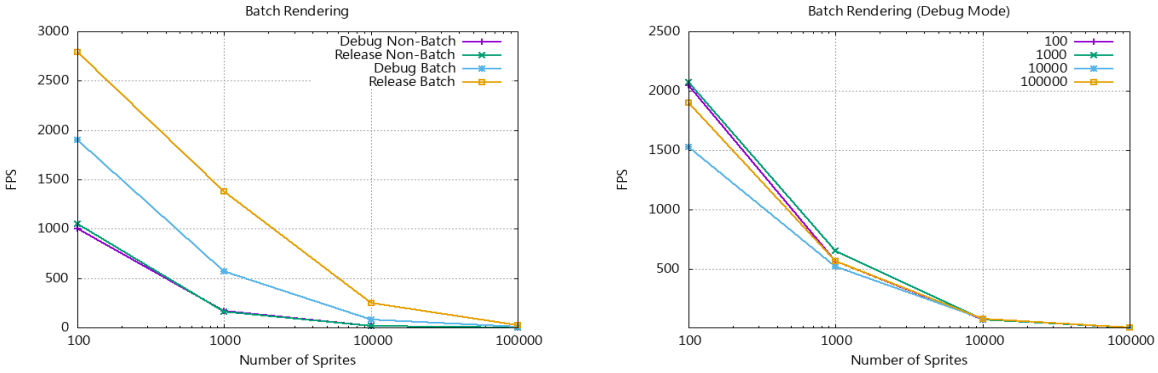
結論

加入 Batch Rendering 後，RishEngine 的 Renderer 獲得了顯著的提升:

Number of Sprites	Modes			
	Debug Non-batch	Release Non-batch	Debug Batch	Release Batch
100	1000	1055	1900	2789
1000	167	158	568	1379
10000	18	17	82	247
100000	< 1	< 1	9	28

Table 4.1: 不同 Rendering 方法下 FPS 差別

說明文字說明文字說明文字說明文字說明文字說明文字



(a) 不同 Rendering 方法　　(b) 不同 Max Index

Figure 4.1: 不同 Rendering 方法效能比較

說明文字說明文字說明文字說明文字說明文字說明文字說明文字

未來展望

- 將 Renderer 變成 Multi-thread 架構

  – 由於 OpenGL 在設計當初並沒有考慮到多線程，因此如果要在 OpenGL 使用多線程架構則要用 C++ 模擬，相較於其他現代的 API ，就沒有此限制 (Vulkan, DirectX)。

  – 將程式分成 Main Thread 與 Rendering Thread

– Main Thread 主要負責遊戲循環，如果要畫東西時，會將 Render 資訊打包成一個 Task，接著加到共用的 Rendering Queue 中 (Message Queue)。

– Rendering Thread 負責消化 Rendering Queue 中的 Task ，向 GPU 發起 Draw Call。

– 在原本單線程的 Renderer 中，主要的瓶頸在 Submit Draw Call，繪製時必須等待繪製好了 (Blocking)，改成多線程則可以解決這個問題。

4.1.4 Particle System

TODO

4.1.5 2D Lighting

TODO

4.1.6 Scriptable Entity

TODO

4.1.7 Physics Engine

TODO

4.2 編輯器介紹

對於一個引擎而言，除了內部的程式操作外，亦需要一個面對於使用者的 GUI 來進行操作。其作用為讓開發者在進行開發時，可以簡化其操作步驟並方便的進行創作，透過對引擎可視化工具的操作來建置與修改遊戲內的場景與物體。

4.2.1 版面配置與操作介紹

打開 RishEditor (RishEngine 的編輯器) 可以看到版面就跟市面上常見的編輯器雷同。大致上可以分成四個區塊：工具欄、主要編輯視窗、遊戲物件 (Entity) 編輯視窗、Log。

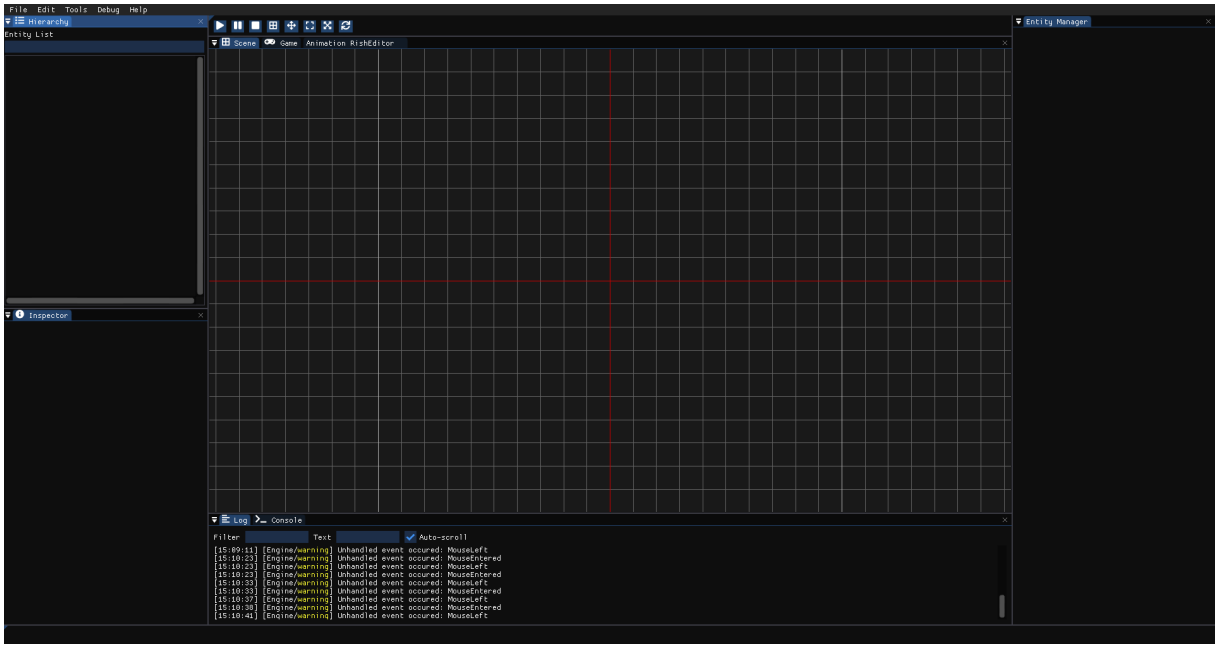
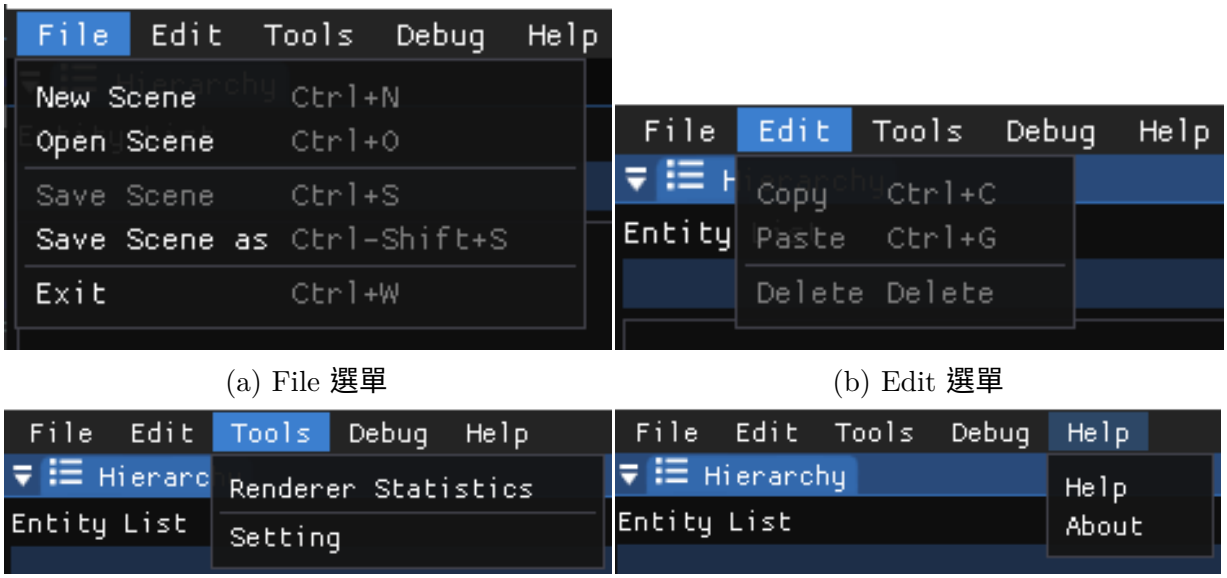


Figure 4.2: 編輯器整體介面

主選單 MenuBar

- File
  - 新增、開啟、儲存目前正在編輯的遊戲場景 (Scene)
- Edit
  - 對遊戲物件 (Entity) 之操作: 複製、貼上、刪除
- Tools
  - 對 Editor 進行設定
- Help
  - 引擎介紹與製作團隊說明



(a) File 選單 (b) Edit 選單

(c) Tools 選單 (d) Help 選單

Figure 4.3: 主選單介面

引擎實體列表 Hierarchy

補圖

- 主要為顯示場景中的 Entity 清單，並可對其進行操作
  - 滑鼠左鍵點擊選取 Entity，按住 Ctrl、Shift 可進行多選
  - 滑鼠右鍵開啟選單對 Entity 進行進一步的操作
    - 新增、複製、貼上、刪除 Entity
    - 將多個 Entity 設定為 Group 一起操作
  - 可將單一 Entity 用滑鼠拖曳進其他 Entity 中，使其成為 Group

引擎實體檢視 Inspector

補圖

- 顯示單一 Entity 所擁有的 Component 並加以操作
  - 新增、刪除、修改數值
- Component 的操作介面
  - 新增、刪除、修改數值

工具欄 ToolBar

Figure 4.4: 工具欄介面

- Start
  - 將場景切換到 Game 介面，並開始進行測試
- Pause
  - 將 Game 介面的動作暫停
- Stop
  - 結束測試返回 Scene 介面
- Grid
  - 顯示/隱藏世界坐標軸
- Move
  - 將 Gizmo 的模式切換為 MoveMode
- Zoom
  - 將 Gizmo 的模式切換為 ZoomMode
- Scale
  - 將 Gizmo 的模式切換為 ScaleMode
- Rotate
  - 將 Gizmo 的模式切換為 RotateMode

場景視窗 Scene View

補圖

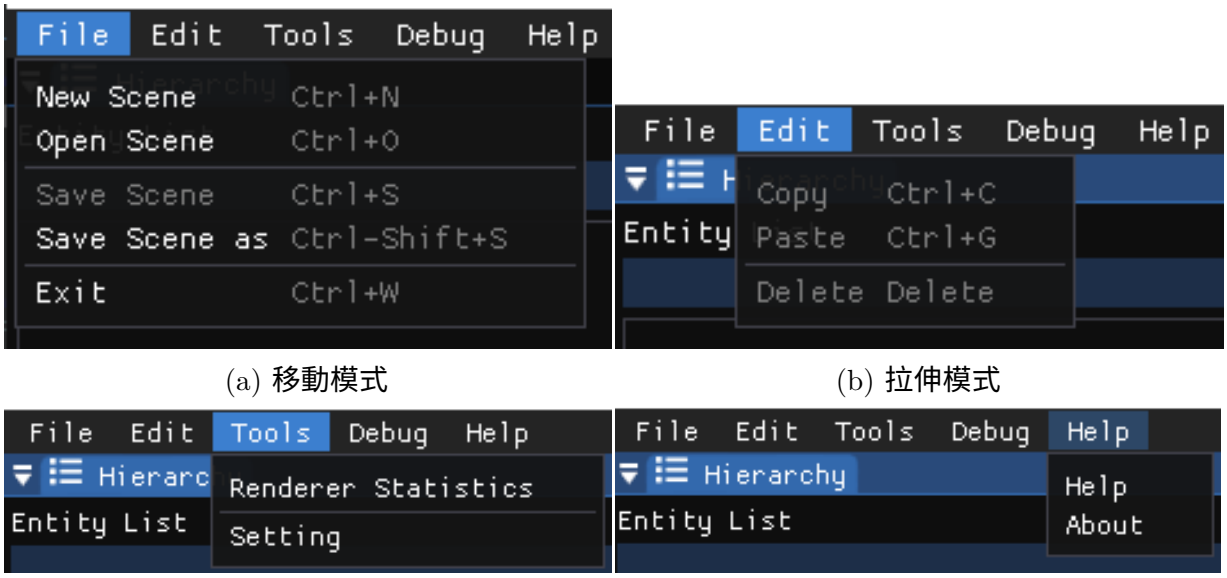
- 顯示所創建的 Entity

- 滑鼠左鍵點選或圈選 Entity，並根據 Gizmo 的模式對其進行相對應的操作
- 滑鼠右鍵移動視角
- 滑鼠滾輪進行縮放
- 使用快捷鍵對 Entity 進行操作
  - ‘Ctrl+A‘ 全選
  - ‘Ctrl+C‘ 複製
  - ‘Ctrl+V‘ 貼上
  - ‘Ctrl+G‘ 將選取的 Entity 放到一 Group 中
  - ‘Delete‘ 將選取的 Entity 刪除
  - ‘Esc‘ 取消選取 Entity

Gizmo

補說明

可讓使用者直觀的對 Entity 的大小與位置進行調整



(a) 移動模式 (b) 拉伸模式

(c) 縮放模式 (d) 旋轉模式

Figure 4.5: Gizmo 的不同模式

- 移動
  - 滑鼠按壓中間黃色區塊拖曳 Entity 移動位置
  - 按壓藍色箭頭限定水平移動
  - 按壓紅色箭頭限定垂直移動
- 拉伸

  - 在 Entity 上下左右與角落處共八個區塊
  - 按壓並拖曳各個區塊皆可改變 Entity 的大小
- 縮放
  - 對於 Entity 的長與寬從中心延伸出紅線與藍線
  - 在尾端有黃色區塊可按壓拖曳改變 Entity 的長與寬
- 旋轉
  - 可將 Entity 進行旋轉，會有一紅線表示現 Entity 的旋轉角度

遊戲視窗 Game View

補圖

在測試期間將會顯示標示為 primary 的 CameraComponent 的視角並運行各個 Component 的動作

除錯訊息視窗 Log

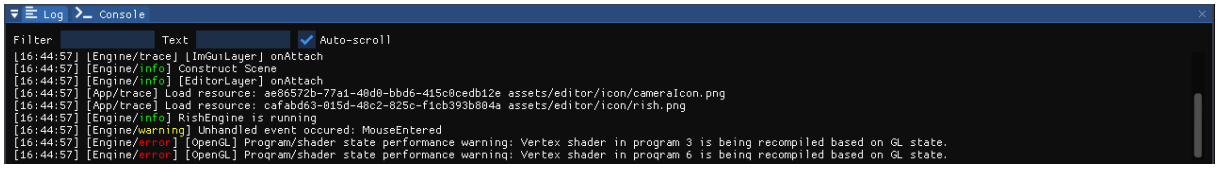


Figure 4.6: 工具欄介面

- 顯示開發人員輸出或引擎輸出之訊息，並將其分級顯示
  - 依照錯誤級別分成: TRACE, INFO, WARN, ERROR, CRITICAL
- 可對 Log 進行過濾，方便遊戲開發者在眾多訊息中定位

Editor 訊息視窗 Status

補圖

顯示目前 Editor 的狀態

4.2.2 架構

- Editor
  - 在 Editor 底下利用 EditorController 管理著 Scene, Panel, Action
  - Scene 為遊戲世界的畫面管理
  - Panel 為 Editor 的介面管理
  - Action 為 Editor 中的各式操作
- EditorController

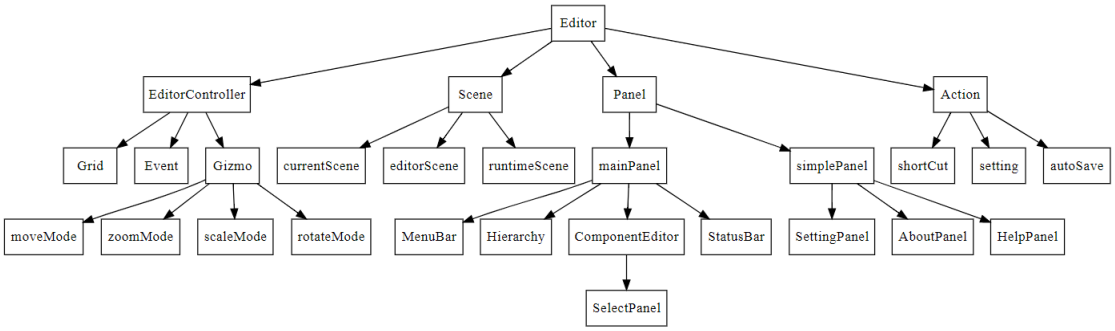


Figure 4.7: Editor 架構

  - Grid
  - Event
    - 接收滑鼠與鍵盤的操作
  - Gizmo
    - 移動模式
      - 根據滑鼠點擊的位置來決定 Entity 移動時的權重
      - 根據滑鼠拖拉的距離去乘上權重來改變 Entity 的位置
    - 拉伸模式
      - 根據滑鼠點擊的位置來決定 Entity 移動時的權重與其大小的權重
      - 根據滑鼠拖拉的距離去分別乘上各自的權重來改變其位置與大小
    - 縮放模式
      - 根據滑鼠點擊的位置來決定要改變 Entity 的長或寬
      - 根據滑鼠拖拉的向量與要改變的 Entity 方向去計算其投影向量
      - 根據該投影向量來計算需增加的長或寬
    - 旋轉模式
      - 根據滑鼠拖拉時的起始點與最終點分別與 Entity 的中心點作為向量
      - 計算二向量的夾角來改變 Entity 的 rotate
- Scene
  - currentScene
  - editorScene
    - 在 Editor 模式下所使用的 Scene
  - runtimeScene

    - 在遊戲模式下所使用的 Scene
- Panel
  - mainPanel 主要顯示的視窗
    - MenuBar
      - 管理 simplePanel 以及與 Editor 相關之 API
    - Hierarchy
      - 從 currentScene 中拿到其所有的 Entity 並顯示其 tag
      - 標記部分 Entity 為選取狀態並對其進行操作
    - ComponentEditor
      - 對於所選取之 Entity 的 Component 進行操作
      - 使用各個 Component 的 API 來進行操作
      - 選取視窗顯示所有可新增的 Component，點選後將其新增到 Entity 上
    - StatusBar
      - 接收 EditorController 發送的訊息並顯示
  - simplePanel 簡易的彈跳式視窗
    - SettingPanel
      - 讀取並修改 Editor 的設定檔
    - HelpPanel
    - AboutPanel
- Action
  - shortCut
    - 設定各個快捷鍵的操控
  - setting
    - 設定 Editor
  - autoSave
    - 每過一段時間自動將 Editor 的 Scene 儲存起來

4.2.3 未來展望

寫太少

- Undo & Redo System
  - 讓使用者可以回復其所做的上一步操作

- 支援 3D 顯示與操作
  - 在引擎的各項功能提供 3D 操作後，讓 Editor 亦可供其顯示與操作

Chapter 5

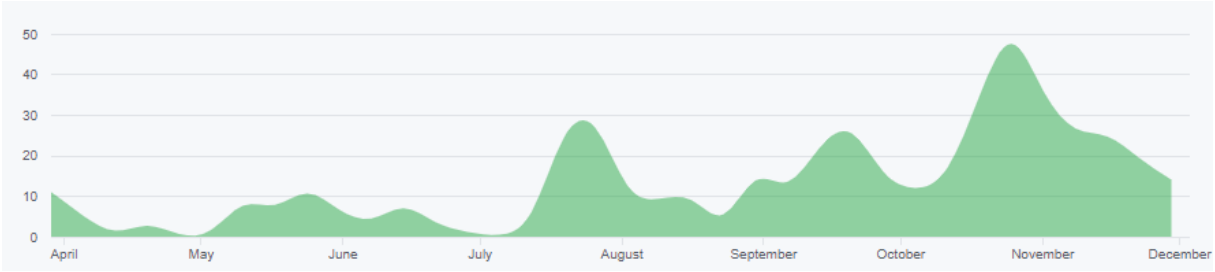
結語

5.1 心得

5.1.1 鍾秉桓 Roy

其實從高中初次接觸程式設計以來，我一直想做的事情便是寫一個自己的遊戲引擎，從高中時初次嘗試撰寫 ADV 類型的遊戲引擎 (但受限當時的程式能力，並沒有完成)，而到了大學時，我從很早（大概大二）便找好組員，並且也在系上課程的多個專案中不斷地練習和磨合我們之間的合作，我想做的事便是寫一個屬於自己的遊戲引擎。

從三年級下學期開始，經過了九個月的的開發，坐在電腦前數百小時的奮鬥，我們 RISH 終於將 RishEngine 的功能告一個段落，儘管有些功能是因為專案時程以及目前能力而有缺憾，但即便如此我們還是完成了這個專案，我們開發了一款 2D 的遊戲引擎，具有 ECS、有引擎編輯器、有 Batch Rendering、有 2D Lighting、有物理引擎、有 Particle System 等。



RishEngine Commit Graph

而在開發每項功能前，都花了一到兩個星期在做資料搜尋、自學，接著做出最小可行的 Demo，僅僅做出功能還不夠，因為我們做得是遊戲引擎，所以還得將 API 打磨，不斷得去想、擴充功能，因為引擎就是得提供許多功能給遊戲開發者，而在引擎開發階段時，每個功能寫出來之後，還得切換身分到遊戲開發者，試圖用自己做出的引擎來打造遊戲，透過這個過程來除錯和發想可以增加的新功能，一直不斷的迭代，而這個過程是相當漫長和痛苦的，常常在和組員討論時一個功能的規格 (spec) 時，往往最後都覺得很迷惘，總是覺得這個功能不夠好，但還是得在現實與理想中取捨。

在這次的專案中我也學到了很多東西，像是如何有效與人溝通和合作，表達自己的想法給對方清楚理解，當然過程中勢必有磨合的時期，因為我們是只有四個人的小組，所以作為組長的我理所當然會處理許多工作，也必須擔當起管理的責任，畢竟繁雜的工作量由一個人扛起也過於不切實際，清楚了解到除了程式之外管理和與人相處溝通之道也相當重要。

這個畢業專題算是完成了我其中的一個心願，自幹一個遊戲引擎，也是我目前處理過最多行的程式，算是我的一個小小的里程碑。

5.1.2 梁博全 ICEJJ

會開始接觸程式，是因為自己很喜歡玩遊戲，而自己也想開發遊戲，所以想當個遊戲開發者，但隨著深入學習這塊領域，發現市面上遊戲引擎已經很成熟，開發遊戲門檻降低，很多人都能用熱門引擎寫出遊戲。作為開發者，我們能用現有引擎輕鬆地拉出一款遊戲，我們從中學習到的僅僅只是引擎的使用方法。若未來需要對引擎底層進行優化，但對底層的架構、邏輯都不了解，那要如何修改如何優化。開發遊戲引擎不只能讓我們更了解遊戲架構，也能更加瞭解一款遊戲的圖形渲染、物理模擬等等是如何運作，我想這會是在眾多遊戲開發者內脫穎而出的關鍵。

在開發引擎功能的，基本上都是從無開始自學，每當被分派到一個模塊時，基本上就是花大量的時間找資料，接著花大量的時間寫 Demo，寫 Demo 的期間還會遇到各種不同的問題，而做完因為是需要將模塊打入引擎裡面，因此還得將 API 想好，整個架構也得配合著引擎，最後在移植到引擎裡面之後，新的問題又會出現。

這次的專案除了深入了解整個遊戲架構、更加熟悉 C++，也知道溝通的重要性。初期常常因為溝通不清楚而導致東西做出來不合預期，因此在被分發工作時，將內容以及目標講清楚，中途遇到問題發現功能無法做出來或是需要更改 API 也需要及時提出，避免最後浪費太多時間。

雖然引擎與一開始預想的有差，但能做出這些算是不錯了，自己也很開心。

5.1.3 黃育晧 SunTalk

在剛開始接觸程式時，最直覺的就是想寫遊戲，想將腦中所想的變成一款真實的遊戲，並為此打磨自己的能力。在學習的過程中，試著寫了幾個遊戲後，發覺自己所寫出來的與市面上所存在的遊戲都有很大的差異，才發現說現如今已經不是純粹靠著自己 coding 來寫遊戲了，大多數的遊戲開發者都是使用已經打磨好的遊戲引擎來進行開發，藉由完善的遊戲引擎來解決繁瑣的底層架構，大大的提升了遊戲開發的效率與效能。也因此讓我們從想寫個遊戲轉變成想試著寫個遊戲引擎出來。

在開發的過程中，由於每個人所負責的模塊都不同，我覺得最主要的是要清楚的理解引擎中的架構，不僅僅是整體的架構，其內每個模塊的架構都要有一定程度的理解，在這的基礎上去進行編輯器的撰寫與整理，在編輯器中除了設計出讓使用者方便使用的各種功能，亦要去正確的對照到引擎中的各個功能才能使得其正常運作。

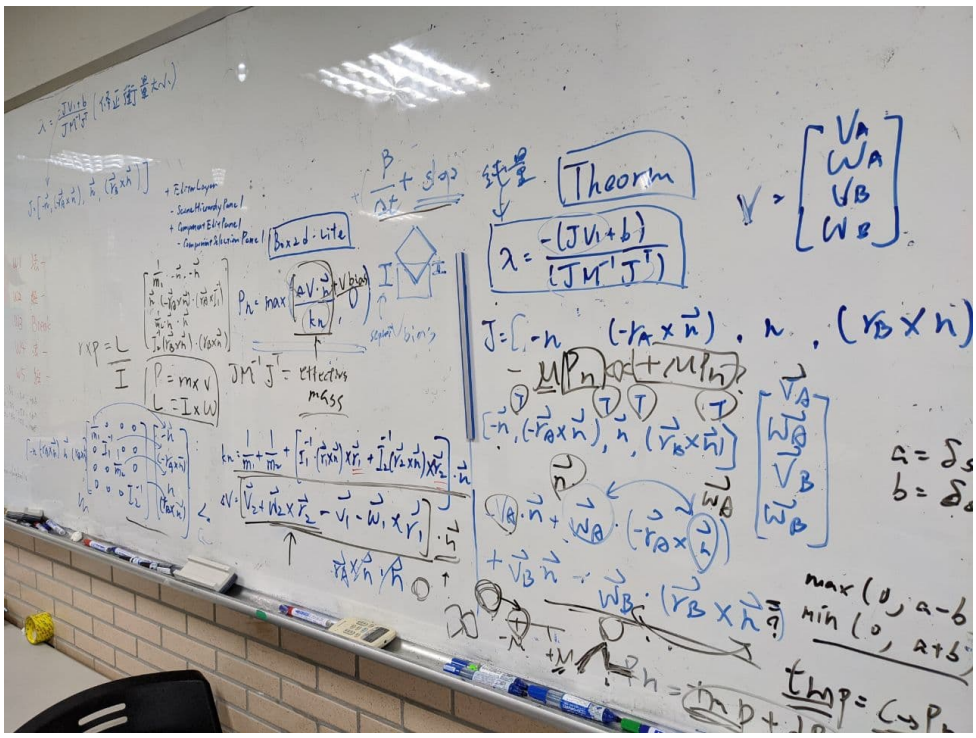
在這次的專案中，我學習到了許多的事情，除了瞭解引擎與遊戲上的架構外，最重要的就是與隊友中的溝通了。像是在理解對方所寫出來的 code 時，只是看著程式碼並不能有效的理解到該區塊的意義，以及如何去使用，在經過有效的溝通後才可以快速的去諧調出 API 與協助 debug 的進行。

能夠以遊戲引擎這一個主題來作為畢業專題，並且做出這摸一個雛形，雖然還有很多可以新增與進步的空間，但也讓我感到相當的開心。

5.1.4 黃品翰 Halloworld

在整個遊戲開發的歷程，我們從一開始試著用現有的遊戲框架 (SFML)，每個人都試著實作一個簡單的遊戲。透過寫遊戲的這段過程，來構思我們的遊戲引擎該如何設計。當初想要寫遊戲引擎，一方面我自己覺得是前人沒有試著這樣做過，另一個方面是想說透過畢業專題的機會，詳細了解遊戲引擎的架構與內部的實作。我們也在網路上找了許多資源，同時也參考現有的遊戲引擎做為參考對象，想辦法設計出一套可以拿來寫遊戲的遊戲引擎。

在物理引擎的學習上，較為細節的研究歷程我都放在報告裡面，心得這邊我就純粹只分享我自己的感想。研究遊戲物理這塊，其實真的很少人在做，中文文獻也是少得可憐，大部分人以及其他遊戲相關課程，通常也只注重在使用函式庫。在最一開始，我只拿到一份真正成功將 2D 物理引擎實作的範例，但作者寫的註解也是少得可憐，於是我花了不少個禮拜，在研究他的程式碼在寫些甚麼。研究的路程中，我後來發現在研究的路上並不是只有我一個人，感謝有來我個人網頁的來自中國大陸的網友，趁機的與他交交換聯絡資訊，跟他來回書信不斷地順順看自己的邏輯，互相腦力激盪出當時撰寫這份物理引擎的想法。另外，我參加了學生計算機年會 (SITCON)，很高興我花我暑假的期間，參加了用遊戲物理自幹一條繩子的議程，議程中的剛好可以跟我學的內容呼應，同時也很厚臉皮的，跟他交換了聯絡方式。我想最值得的，就是這一步步都在突破我自己的舒適圈，透過各種不同的方法找尋資源，想辦法把自己心中的那個為甚麼一一地解開。



被我寫滿物理證明的實驗室白板

除了與網路上無緣無故交到的筆友和議程上的講者，我也透過講者的關係下，拿到遊

戲物理界大老的系列教學影片。那短短兩三個小時幾部的影片讓我真正了解到比較深層的理論。如果以程式語言的學習歷程來比喻，在前期自己看程式以及與網路筆友的討論，像是學習高階語言一樣，大概能知道淺層的物理原理，但是再透過那系列的教學影片之後，又知道了有些東西的係數是這樣推倒而來，就如同學習到組合語言一樣，能跟精確地知道整個程式運作的來龍去脈。除此之外，我也試著自己證明遊戲物理引擎的物理參數，看看真的是不是如程式寫得一樣，並自己在試著實作一次。此外，覺得我自己還想更精進的部分，是希望以後能夠自己實作出 3D 的遊戲引擎，以及實作空氣阻力、彈簧... 等更精細的物理模擬。

實作的過程中，很常被 C++ 的語法及語言特性坑殺。舉個最經典的例子，最常遇到的應該就是循環引入的問題，編譯器卻沒告訴你哪裡出了問題，導致我花了很多時間來找 bug。我自認為我在實作遊戲物理邏輯中的部分，跟解決 C++ 錯誤所花的時間比起來，修 C++ BUG 的時間真的佔了我大部分的時間。不過也從中學習到很多技巧。這些東西可能是課堂學不到的，大部分都得靠網路或是同學之間討論，才能夠把這些複雜又惱人的 BUG 解掉。此外，在整個專案當中，隨著時間增長的程式碼，漸漸地讓編譯速度變得相當緩慢，裡面的 Warning 也越來越多，這也是我很頭痛的部分。到專案後期，常常花的時間都不是在改程式碼，而是在等編譯。包括我現在寫心得的此時此刻，都是在等待的期間撰寫出來的。

另外，與團隊的交流也很重要，過程中有相當多的磨合以及很多的取捨，不過目的其實都是為了整個專案更好。比較愧疚的部分，是這次沒有參與到遊戲引擎整個開發的部分，引擎內部裡面的細節我沒有仔細的接觸過。主要因為光花那些時間證明物理以及實作就踩了許多坑也耗費了很多時間和冤枉路，加上我自己的資質駑鈍和我的英文能力，以及，真正研究過遊戲物理的人真的很少，資源也相對地難找，也就導致我沒有參與到整個引擎最主要的開發部分。最後，我想感謝我的組員們，雖然引擎不是最完美的，但我相信從開發過程應該都學到不少的東西以及經驗，也很感謝實驗室的學長和同學，陪我們度過一次又一次的 Bug。

Bibliography

[1] Scott Pakin. *The comprehensive LaTeX symbol list*. 2020. URL: http://tug.ctan.org/info/symbols/comprehensive/symbols-a4.pdf.

[2] Nir Benty, Kai-Hwa Yao, Petrik Clarberg, Lucy Chen, Simon Kallweit, Tim Foley, Matthew Oakes, Conor Lavelle, and Chris Wyman. *The Falcor Rendering Framework*. https://github.com/NVIDIAGameWorks/Falcor. Aug. 2020. URL: https://github.com/NVIDIAGameWorks/Falcor.

[3] Matthias Wloka. *"Batch, Batch, Batch": What Does It Really Mean?* 2003. URL: https://www.nvidia.com/docs/IO/8230/BatchBatchBatch.pdf.

[4] Valmond. *Why is C++ used for game engines? How about its future in game engines?* https://gamedev.stackexchange.com/questions/38011/why-is-c-used-for-game-engines-how-about-its-future-in-game-engines. Oct. 2012 (page 7).