Final Project: Flappy Bird Game

106033233 周聖諺, 107091021 曾燕茹

2022-06-11

Contents

Final Project: Flappy Bird Game

106033233 資工大四 周聖諺 107091021 電資大三 曾燕茹

Proposal

本期末專題將設計與實現 flappy bird 遊戲，玩家在進行本遊戲時，需要控制畫面中的 bird，使其不要碰到障礙物 (圖中綠色水管)，方可累積分數；若碰到障礙物則遊戲結束。

本期末專題利用 FPGA 板實現遊戲，並用 VGA 連接螢幕，呈現出 bird 以及障礙物的畫面；遊戲一開始時，VGA 螢幕畫面會呈現開始畫面，等偵測到玩家按下鍵盤後即開始遊戲，進入遊戲畫面。

當遊戲開始時，bird 會自動下降其飛行高度，此時玩家需要透過控制鍵盤讓畫面中的 bird (按一下按鍵往上飛一些，若沒有持續按鍵盤，則 bird 飛行高度會再次下降) 躲避障礙物 (圖中綠色水管) 方可進行遊戲。

Overview

以下是架構圖，`top` 為本專案的頂層模組，`global` 為全域變數。

- `global`
- `top`
    - `clock_divisor`
    - `onepulse`
        * `debounce`
    - `KeyboardDecoder`
        * `KeyboardCtrl_0`
        * `OnePulseKB`
    - `game`
        * `bg_ctrl`
            · `bg_mem_addr_gen`
            · `blk_mem_gen_bg_big`
        * `pipe_ctrl`
            · `pipe_mem_addr_gen`
            · `blk_mem_gen_pipe`
        * `bird_ctrl`

            - bird_mem_addr_gen
            - bird_pos_ctrl
            - blk_mem_gen_bird
        * ctrl
        * scence_ctrl
            - score2font
              - dec2font
            - text_ctrl
              - font_ctrl
                - font_mem_addr_gen
                - blk_mem_gen_font
    - song_switch
    - audio_ctrl
        * fre_div
        * song_ctrl
            - up_counter
            - song_setting
            - fruit_pudding_mem
            - angry_bird_mem
            - flap_mem
            - bump_mem
        * note_gen
        * speaker_control
    - vga_controller
    - dec_disp
        * segment7
        * display_7seg
            - segment7_frequency_divider

其 中 `blk_mem_gen_bg_big`、`blk_mem_gen_pipe`、`blk_mem_gen_bird`和`blk_mem_gen_font`三者為 Vivado 內建的 RAM IP，因此在報告中不多加贅述。

Design Specification

Ports of Modules

Module: global

Global variables

Module: top

Inout: PS2_DATA, PS2_CLK

Input: clk, rst, btn_u, btn_m, btn_d, btn_r, btn_l

Output: [3:0] vgaRed, [3:0] vgaGreen, [3:0] vgaBlue, [15:0] leds,[0:3] d_sel, [7:0] d_out, hsync, vsync, mclk, lrck, sck, sdin

Module: clock_divisor

Input: clk

Output: clk1, clk21, clk22

Module: onepulse

Input: clk, rst, push

Output: push_onepulse, push_onepulse_long, push_debounced, push_debounced_long, push_sig, push_sig_long

Module: debounce

Input: rst, clk, push

Outpout: push_debounced

Module: KeyboardDecoder

Inout: PS2_DATA, PS2_CLK

Input: rst, clk

Output: [511:0] key_down, [8:0] last_change, key_valid

Module: KeyboardCtrl_0

此為 lab 8 助教提供的 IP。

Module: OnePulseKB

Input: signal, clock

Output: signal_single_pulse

Module: game

Input: clk, clk_bg_scroll, clk_pipe_scroll, clk_flap, clk_move, rst, push_debounced_u, push_onepulse_d, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt,

Output: [11:0] pixel, [13:0] score, is_start, is_game_over, is_dead, is_bump, is_overlap

Module: bg_ctrl

Input: clk, clk_scroll, rst, is_visible, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt

Output: [11:0] dout, px_valid

Module: bg_mem_addr_gen

Input: clk, rst, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt

Output: [16:0] pixel_addr, valid

Module: pipe_ctrl

Input: clk, clk_scroll, rst, is_visible, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt

Output: [9:0] pos, [11:0] dout, px_valid

Module: pipe_mem_addr_gen

Input: clk, clk_scroll, rst, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt,

Output: [9:0] pos, [16:0] pixel_addr, valid

Module: bird_ctrl

Input: clk, clk_flap, clk_move, rst, is_visible, is_dead, btn_fly, enable_move, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt

Output: [9:0] pos_h_cnt, [9:0] pos_v_cnt, [11:0] dout, px_valid

Module: bird_mem_addr_gen

Input: clk, rst, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt, [9:0] pos_h_cnt, [9:0] pos_v_cnt

Output: [16:0] pixel_addr, valid

Module: bird_pos_ctrl

Input: clk, clk_move, rst, is_dead, btn_fly

Output: [9:0] pos_h_cnt, [9:0] pos_v_cnt

Module: ctrl

Input: clk, clk_pipe_scroll, rst, push_debounced_u, push_onepulse_d, [9:0] pos, [9:0]bird_pos_h_cnt, [9:0]bird_pos_v_cnt, bg_px_valid, pipe_px_valid, bird_px_valid, text_px_valid,[11:0] bg_pixel, [11:0]pipe_pixel, [11:0]bird_pixel, [11:0]text_pixel

Output: [11:0] pixel, [13:0] score, is_game_over, is_dead, is_start, is_bump, clkis_overlap

Module: scence_ctrl

Input: clk, rst, is_visible, is_start, is_dead, is_game_over, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt, [13:0] score

Output: [11:0] dout

Module: score2font

Input: [13:0] score

Output: [7:0] d0_font, [7:0]d1_font, [7:0]d2_font, [7:0] d3_font

Module: dec2font

Input: [3:0] dec

Output: [7:0] font

Module: text_ctrl

Input: clk, rst, is_visible, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt,[9:0] pos_h_cnt, [9:0] pos_v_cnt, [0:87] alphabets_1d

Output: [11:0] dout

Module: font_ctrl

Input: clk, rst, is_visible, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt, [9:0] pos_h_cnt,[9:0] pos_v_cnt, [7:0] alphabet,

Output: [11:0] dout, px_valid

Module: font_mem_addr_gen

Input: clk, rst, [9:0] h_cnt, [9:0] v_cnt, [9:0] pos_h_cnt, [9:0] pos_v_cnt, [7:0] alphabet

Output: [16:0] pixel_addr, valid

Module: song_switch

Input: clk, is_start, is_game_over, is_overlap

Output: [3:0] song_id

Module: audio_ctrl

Input: clk, rst_n, enable, is_repeat, [3:0] song_id

Output: mclk, lrck, sck, sdin

Module: freq_div

Input: clk, rst_n

Output: clk_ctl

Module: song_ctrl

Input: clk, clk_song, rst_n, [3:0] song_id, enable, is_repeat

Output: [21:0] data

Module: up_counter

Input: clk, rst_n, is_repeat, [9:0] cnt_limit

Output: [9:0] cnt

Module: song_setting

Input: clk, enable, [3:0] song_id, [21:0] fruit_pudding_data, [21:0] angry_bird_data, [21:0] flap_data, [21:0] bump_data

Output: [9:0] cnt_limit, [21:0] data

Module: fruit_pudding_mem

Input: rst_n, [9:0] addr

Output: [21:0] data

Module: angry_bird_mem

Input: clk, rst_n, [9:0] addr

Output: [21:0]data

Module: flap_mem

Input: clk, rst_n, [9:0] addr,

Output: [21:0] data

Module: bump_mem

Input: clk, rst_n, [9:0] addr

Output: [21:0] data

Module: note_gen

Input: clk, rst_n, [21:0] note_div

Output: [15:0] left, [15:0] right

Module: speaker_control

Input: clk, rst_n, [15:0] audio_in_left, [15:0] audio_in_right

Output: audio_mclk, audio_lrck, audio_sck, audio_sdin

Module: vga_controller

Input: pclk, reset

Output: hsync, vsync, valid, [9:0]h_cnt, [9:0]v_cnt

Module: dec_disp

Input: clk, rst, [13:0] num

Output: [0:3]d_sel, [7:0]d_out

Module: segment7

Input: [3:0] i

Output: [7:0] D

Module: display_7seg

Input: clk, rst, [7:0] d0, [7:0] d1, [7:0] d2, [7:0] d3

Output: [0:3] d_sel, [7:0] d_out

Module: segment7_frequency_divider

Input: clk, rst

Output: clk_out

I/O of The Project

clk	rst	btn_u	btn_m	btn_d	btn_r	btn_l
W5	V17	T18	U18	U17	T17	W19

vgaRed[0]	vgaRed[1]	vgaRed[2]	vgaRed[3]	vgaGreen[0]	vgaGreen[1]
G19	H19	J19	N19	J17	H17

vgaGreen[2]	vgaGreen[3]	vgaBlue[0]	vgaBlue[1]	vgaBlue[2]	vgaBlue[3]
G17	D17	N18	L18	K18	J18

leds[0]	leds[1]	leds[2]	leds[3]	leds[4]	leds[5]	leds[6]	leds[7]
U16	E19	U19	V19	W18	U15	U14	U14

leds[8]	leds[9]	leds[10]	leds[11]	leds[12]	leds[13]	leds[14]	leds[15]
V13	V3	W3	U3	P3	N3	P1	L1

dsel[0]	dsel[1]	dsel[2]	dsel[3]	d_out[0]	d_out[1]	d_out[2]	d_out[3]	d_out[4]	d_out[5]	d_out[6]	d_out[7]
W4	V4	U4	U2	V7	U7	V5	U5	V8	U8	W6	W7

hsync	vsync	mclk	lrck	sck	sdin
P19	R19	A14	A16	B15	B16

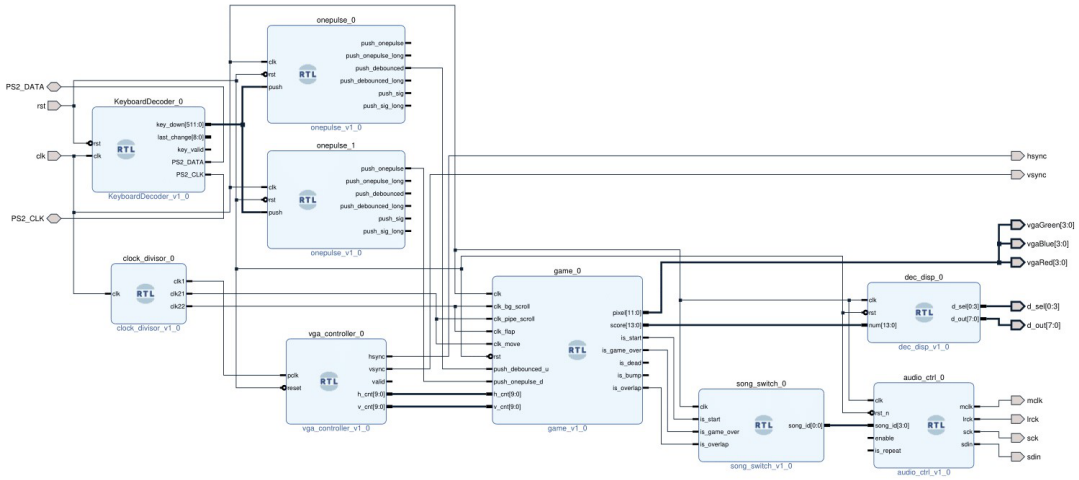
Design Implementation

Module: global

The global variables are used across the whole project.

Module: top

此為本遊戲的頂層模組，此模組調用 `clock_divisor` 為背景滾動、水管滾動、小鳥移動和拍動翅膀提供 clock 作為 trigger。並將這些 clock 傳進模組`game`，並依據 VGA 座標(`h_cnt`, `v_cnt`)回傳 pixel 的資料，再傳進模組`vga_controller`，並用模組`dec_disp`使分數同步顯示於七段顯示器上。



Module: clock_divisor

為背景滾動、水管滾動、小鳥移動和拍動翅膀提供 clock 作為 trigger。

Module: onepulse

用一個計數器來計算按鈕按下的 clock cycles，若按鈕按下的時間較長，會觸發`push_onepulse_long`，反之，若按鈕按下的時間較短，則會觸發`push_onepulse`。

Module: debounce 在每次按按鈕的時候，此模組會延遲 4 個 clock cycle 並產生一個”debounce pulse”。同時，在模組中，使用 4 個 registers 來達成延遲 4 的 clock cycle，並在此 4 個 registers 中的值皆為 1 的時候，輸出一個 pulse。

Module: KeyboardDecoder

此為 lab 8 助教提供的 keyboard 模組之一。

Module: KeyboardCtrl_0 此為 lab 8 助教提供的 IP。

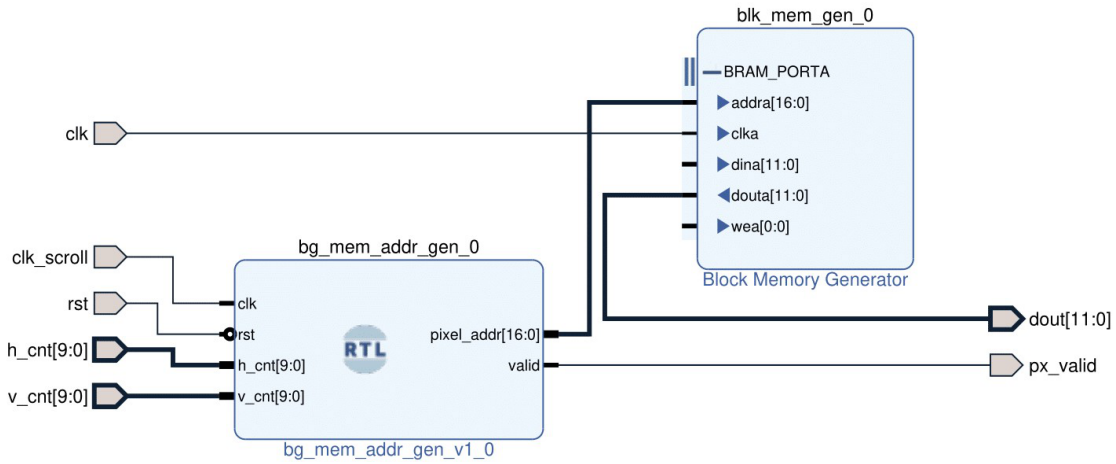
Module: OnePulseKB 此為 lab 8 助教提供的 keyboard 模組之一。

Module: game

此為控制遊戲邏輯的主要模組，主要由五個模組構成，分別是：`bg_ctrl`、`pipe_ctrl`、`bird_ctrl`、`ctrl`、`scence_ctrl`。接下來將於本節詳細描述。

Module: bg_ctrl

此模組的作用在於控制背景滾動，我們用 `bg_mem_addr_gen` 和 `blk_mem_gen_bg_big` 來實現此功能。其中 `bg_mem_addr_gen` 產生對應該 VGA 座標所需的 pixel 的 address，並放入 `blk_mem_gen_bg_big` 將對應 address 的背景圖資料讀出。



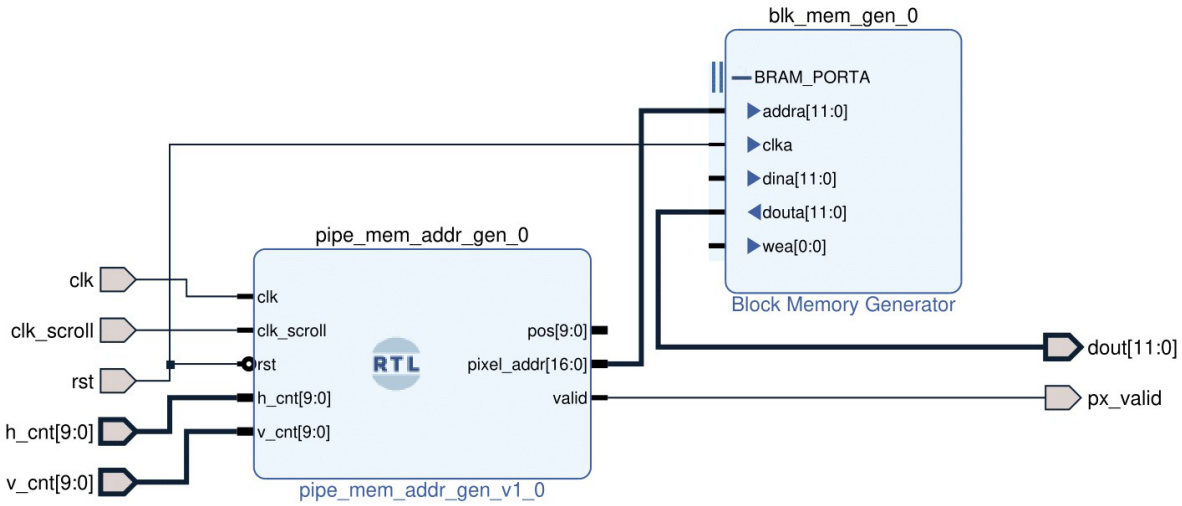
Module: bg_mem_addr_gen `bg_mem_addr_gen` 依據滾動速率在每單位時間都將背景圖片向左 shift 一個單位，並依據輸入的 VGA 座標輸出相對應的 pixel 的 address。

Module: blk_mem_gen_bg_big 此為 Vivado 內建的 RAM IP 模組，我們將背景圖片如下放進 RAM 中儲存並讀取。

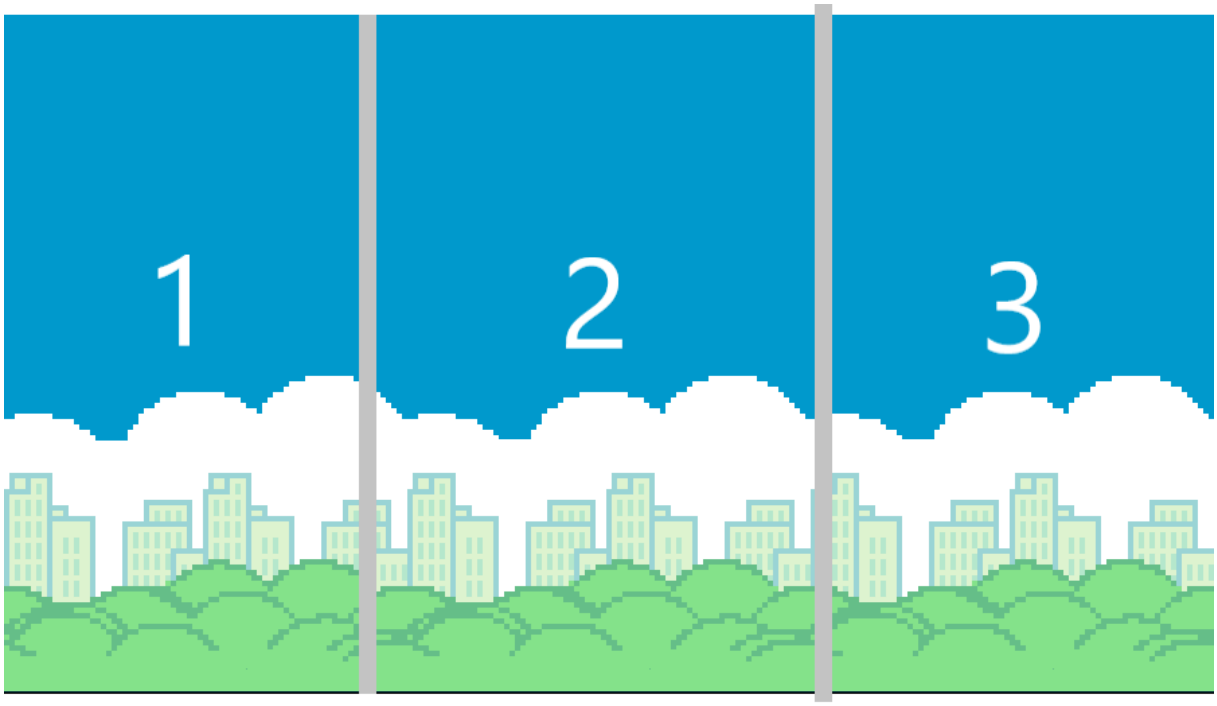
Module: pipe_ctrl

此模組控制畫面中的綠色水管的長度與水管間的間隔，以及在螢幕畫面中移動的方式。其中，`pipe_mem_addr_gen` 控制了水管的移動方式、長度及間隔，並依據 VGA 輸入所需要的座標輸出相對應所需的 pixel 資料。而 `blk_mem_gen_pipe` 則是依據輸入的記憶體地址輸出相對應的 pixel 資料。兩者組合在一起就可以做出水管移動並且有不同高度與間隔的效果。

另外，`dout`輸出對應 VGA 座標的 pixel 資料，`px_valid` 則輸出在此 VGA 座標是否需要顯示出此 pixel，會如此設計是因為水管圖片周圍其實會有一層非透明的框，因此我們就直接針對方框的顏色予以剃除，同時必須在不用畫出水管的區域讓水管這一個圖層保持透明，以方便疊圖。



Module: pipe_mem_addr_gen 此模組的功能在於控制水管的長度、間隔與移動方式，並對應輸入的 VGA 座標輸出 address。由於在畫面中只會出現三根水管，因此水管每移動 1/3 個螢幕就必須讓下一根水管出現，然而，每根水管必須從右到左將整個螢幕掃過一次才會消失，因此其實我們必須設計一個 shift register 如下，其中 `pipe_gaps` 儲存水管間的間隔，而 `pipe_lens` 儲存水管的高度，每當水管走過 1/3 個螢幕時，就將下一個水管 shift 進來。




```
1  reg [CNT_BITS_N-1:0] pipe_gaps [`PIPE_NUM-1:0];
```

```
reg [CNT_BITS_N-1:0] pipe_lens [`PIPE_NUM-1:0];

pipe_gaps[14] <= pipe_gaps[0];
pipe_gaps[0] <= pipe_gaps[1];
.
.
.
pipe_gaps[13] <= pipe_gaps[14];

pipe_lens[14] <= pipe_lens[0];
pipe_lens[0] <= pipe_lens[1];
.
.
.
pipe_lens[13] <= pipe_lens[14];
```

而水管的移動速度是依據 input `clk_scroll`的跳動速率決定，每一個 clock period pipe 皆會向左移動一個單位。同時，因為水管每走 1/3 個螢幕就必須 shift 一個新的水管進來，所以我們將螢幕從左到右切分成三等份，第 1 等分顯示第 0 個水管，也就是`pipe_gaps[0]`及`pipe_lens[0]`，第二等分顯示第 1 個水管，第三等份顯示第 2 個水管。每個水管在超出該等分所顯示的範圍之後 (其實就是水管每走完 1/3 個螢幕時)，就會 shift 到左邊下一個等分繼續顯示，並且 shift register 會 shift 進一個新的水管到第三等份的螢幕中。以下為當水管的位置 `pos` 到達第一等分`h_h_cnt < pos + PIPE_WIDTH_CNT`的位置時，若 VGA 的座標分別為`h_h_cnt`與`h_v_cnt`的話，需要水管圖片的`(addr_h_cnt, addr_v_cnt)`座標的 pixel。

```
end else if(h_h_cnt > pos && h_h_cnt < pos + PIPE_WIDTH_CNT) begin
    if(h_v_cnt < pipe_lens[1]) begin
        addr_h_cnt <= h_h_cnt - pos;
        addr_v_cnt <= pipe_lens[1] - h_v_cnt;
        valid <= 1'b1;
    end else if(h_v_cnt > pipe_lens[1] + pipe_gaps[1]) begin
        addr_h_cnt <= h_h_cnt - pos;
        addr_v_cnt <= h_v_cnt - pipe_lens[1] - pipe_gaps[1];
        valid <= 1'b1;
    end else begin
        addr_h_cnt <= 0;
        addr_v_cnt <= 0;
        valid <= 1'b0;
    end
```

值得注意的是，其實做到這樣只能確保水管在進場和滑動的時候沒有問題，但是這個做法卻沒有考慮到水管除如何出場，因此，我們而外在多加了一個第 0 等分，目的在於我們希望當水管在走完第一等分的螢幕畫面必須出場時，會接續由第零等分顯示並出場。

```
if(is_pass_first_pipe && h_h_cnt > 0 && PIPE_WIDTH_CNT > (`PHASE1_CNT -
    pos) && h_h_cnt < PIPE_WIDTH_CNT - (`PHASE1_CNT - pos)) begin
    if(h_v_cnt < pipe_lens[0]) begin
        addr_h_cnt <= h_h_cnt + (`PHASE1_CNT - pos);
        addr_v_cnt <= pipe_lens[0] - h_v_cnt;
```

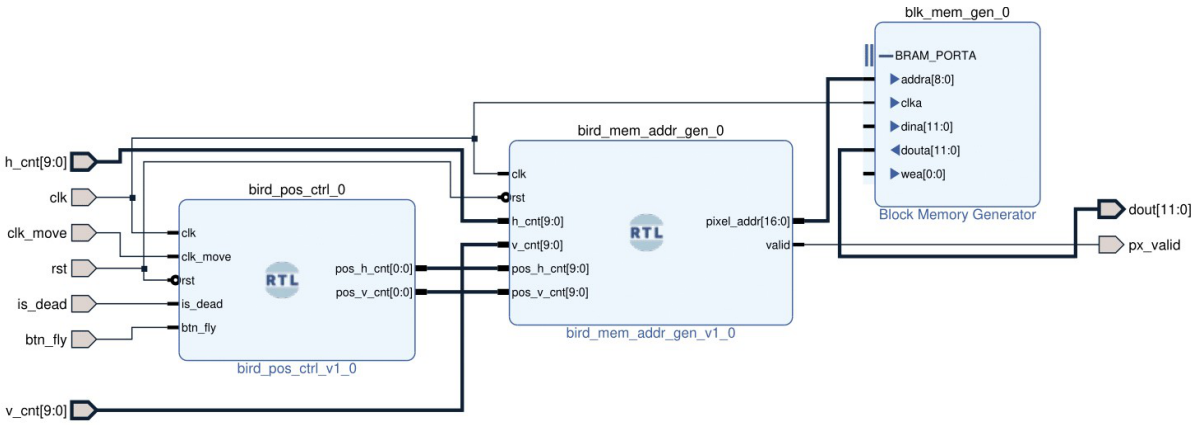
```
5           valid <= 1'b1;
6       end else if(h_v_cnt > pipe_lens[0] + pipe_gaps[0]) begin
7           addr_h_cnt <= h_h_cnt + (`PHASE1_CNT - pos);
8           addr_v_cnt <= h_v_cnt - pipe_lens[0] - pipe_gaps[0];
9           valid <= 1'b1;
10      end else begin
11          addr_h_cnt <= 0;
12          addr_v_cnt <= 0;
13          valid <= 1'b0;
14      end
```

而畫面中的上下兩根水管其實就將水管的 pixel 的垂直座標上下顛倒就行。

Module: blk_mem_gen_pipe 此為 Vivado 內建的 RAM IP 模組，我們將水管圖片如下放進 RAM 中儲存並讀取。

Module: bird_ctrl

此模組依據玩家的輸入，控制小鳥的飛行位置，並同時實現小鳥拍打翅膀的動畫與模仿地心引力的下墜。dout輸出對應 VGA 座標的 pixel 資料，px_valid 則輸出在此 VGA 座標是否需要顯示出此 pixel，若px_valid=0則此圖層為透明無色，同時，與繪製水管的考量相仿，因為小鳥的圖片周圍也有一層非透明的方框，因此必須檢測該方框顏色並予以剔除。



Module: bird_mem_addr_gen 此模組會依據目前小鳥的位置(pos_h_cnt, pos_v_cnt)產生對應 pixel 的 address，同時會依據clk的頻率更新小鳥拍動翅膀的圖片。具體的作法為，由於小鳥拍動翅膀的動畫是由三個 frame 組成，我們會依據clk更新小鳥處在不同的 frame 始知看起來像在拍動翅膀。另外，我們依據(pos_h_cnt, pos_v_cnt)來判斷小鳥在畫面上所處的位置，若 VGA 的座標位置落在顯示小鳥的區域上的話，則輸出對應的 pixel。而具體做法就是檢查 VGA 座標是否落在以 (pos_h_cnt, pos_v_cnt) 作為顯示小鳥區域的左上 anchor ，往右及往下小鳥的高度及寬度所框起來的區域，即為h_h_cnt >= pos_h_cnt && h_h_cnt < pos_h_cnt + BIRD_WIDTH_CNT && h_v_cnt >= pos_v_cnt && h_v_cnt < pos_v_cnt + BIRD_HEIGHT_CNT。

```
always@(posedge clk) begin
    if(rst) begin
        phase <= 0;
    end else begin
        if(phase == 0) begin
            phase <= 10;
        end else if(phase == 10) begin
            phase <= 20;
        end else if(phase == 20) begin
            phase <= 0;
        end
    end
end

always@(*) begin
```

```
16      pixel_addr <= addr_h_cnt % BIRD_WIDTH_CNT + phase + BIRD_WIDTH_CNT
            * 3 * (addr_v_cnt % BIRD_HEIGHT_CNT);
17  end
18
19  always@(*) begin
20      if(h_h_cnt >= pos_h_cnt && h_h_cnt < pos_h_cnt + BIRD_WIDTH_CNT &&
21          h_v_cnt >= pos_v_cnt && h_v_cnt < pos_v_cnt + BIRD_HEIGHT_CNT)
                begin
22          addr_h_cnt <= h_h_cnt - pos_h_cnt;
23          addr_v_cnt <= h_v_cnt - pos_v_cnt;
24          valid <= 1'b1;
25      end else begin
26          addr_h_cnt <= 0;
27          addr_v_cnt <= 0;
28          valid <= 1'b0;
29      end
30  end
```

Module: bird_pos_ctrl 此模組依據使用者的輸入，控制小鳥的位置。使用者只需要按住空白鍵，小鳥就會一直往上飛直至碰到螢幕的頂部，放開空白鍵的話小鳥就會以自由落體的速度下墜，也就是說會以時間平方成正比的速度下墜。

我們的做法是，若 input `btn_fly` 為 1，也就是空白鍵被按下時，則每過一個 `clk_move` 小鳥的垂直座標`pos_v_cnt`會減一；若否，則小鳥的垂直座標`pos_v_cnt`會以放開空白鍵的 clock 數量的平方增加。code 邏輯如下。

```
1   if(btn_fly && ~is_dead && pos_v_cnt > 0) begin
2       if(pos_v_cnt - 2 <= 1) begin
3           pos_v_cnt_next <= 0;
4       end else begin
5           pos_v_cnt_next <= pos_v_cnt - 2;
6       end
7       drop_count_next <= 0;
8       is_clicked_next <= 1;
9   end else if((is_dead && pos_v_cnt_next < HEIGHT_CNT) || (~btn_fly &&
        is_clicked && pos_v_cnt < HEIGHT_CNT)) begin
10      pos_v_cnt_next <= pos_v_cnt + drop_count * drop_count / 32;
11      drop_count_next <= drop_count + 1;
12  end
```

Module: blk_mem_gen_bird 此為 Vivado 內建的 RAM IP 模組，我們將小鳥的圖片如下放進 RAM 中儲存並讀取。

Module: ctrl

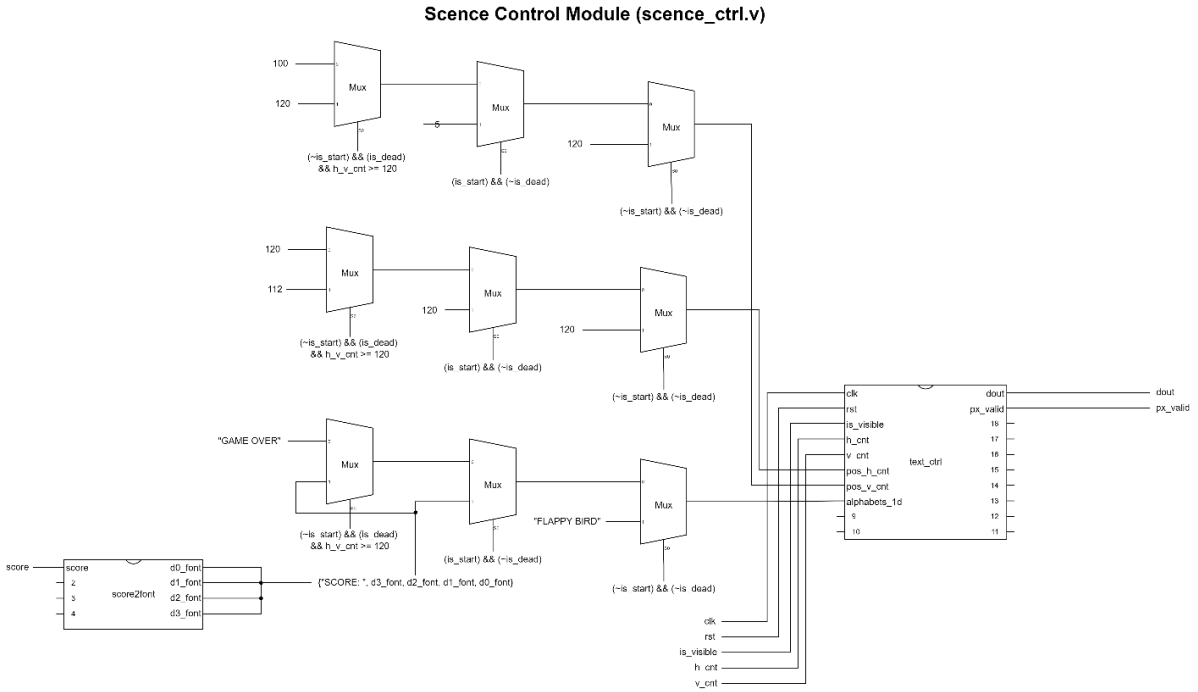
此模組有四大功能

1. 判斷小鳥是否有撞上水管：讀取當前小鳥的位置和在畫面中第一等分水管的位置，並檢查小鳥的 pixel 是否和水管的 pixel 是否同時 `px_valid=1`，若有，則判斷小鳥已經撞上水管，並將變數 `is_bump=1`；若否，則將變數 `is_bump=0`。
2. 融合圖層：本遊戲有四個圖層，顯示的優先順序從高到低分別為文字 -> 小鳥 -> 水管 -> 背景，若叫高優先的圖層的 `px_valid=1`則會以該圖層蓋掉較低優先順率的圖層。
3. 控制畫面場景：使用 `push_onepulse_d` 及 `is_bump` 來控制狀態機，狀態機有三個狀態，分別是 a. 開始狀態 b. 遊戲狀態 c. 結束狀態
    a. 開始狀態：`is_start=0`、`is_dead=0`、`is_game_over=0`，若遇到`push_onepulse_d=1`，也就是 Enter 鍵被按下，則跳到遊戲狀態
    b. 遊戲狀態：`is_start=1`、`is_dead=0`、`is_game_over=0`，若遇到小鳥撞上水管`is_bump=1`，則跳到結束狀態。
    c. 結束狀態：`is_start=0`、`is_dead=1`、`is_game_over=1`，若遇到`push_onepulse_d=1`，也就是 Enter 鍵被按下，則跳到開始狀態
4. 計算分數：若水管的位置 `pos <= 0`(代表水管的左側已經碰到螢幕的左側) 且小鳥沒有死`is_dead=0`，則分數加一，若`(~is_start)&& (~is_dead)` 為真，也就是在開始狀態，分數則歸零。

Module: scence_ctrl

此模組依據 input `is_start`、`is_dead` 判斷狀態機所處的狀態，並顯示相對應的文字，

a. 開始狀態：當`is_start=0`、`is_dead=0`，在畫面正中央顯示：**FLAPPY BIRD**
b. 遊戲狀態：當`is_start=1`、`is_dead=0`，在畫面頂部顯示玩家分數：**SCORE: 0001**
c. 結束狀態：`is_start=0`、`is_dead=1`，在畫面正中央顯示兩行：第一行為固定文字：**GAME OVER**，第二行為玩家分數：**SCORE: 0001**



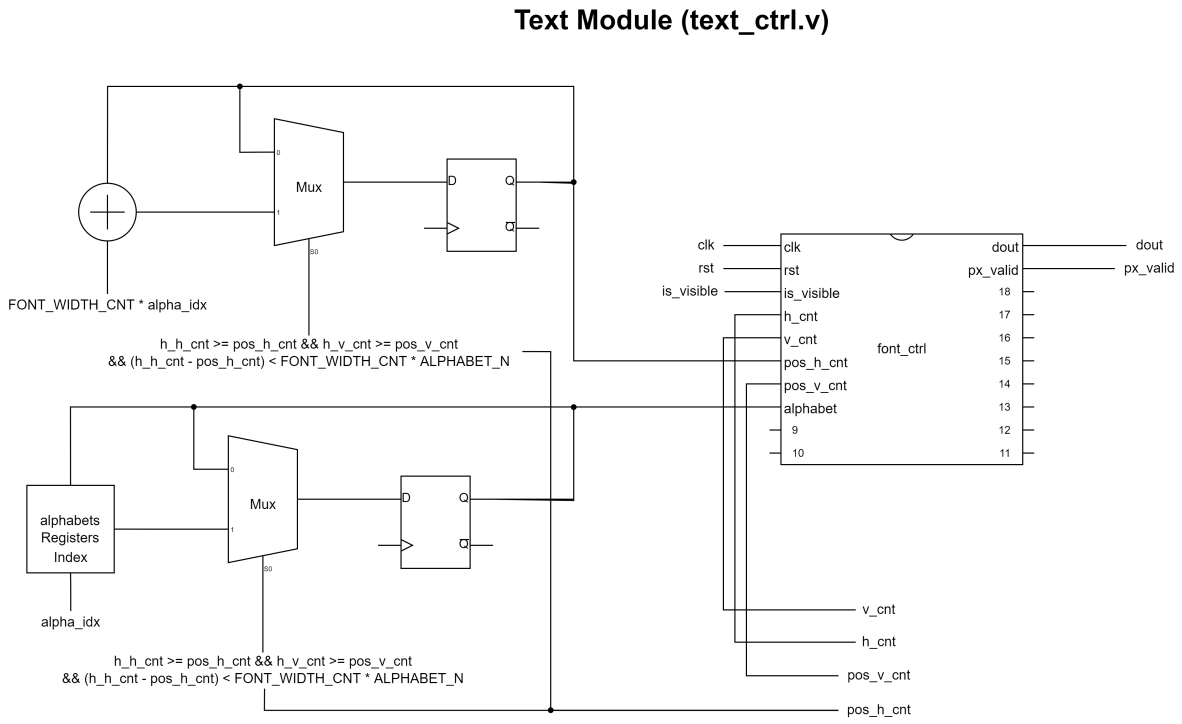
Module: score2font 此模組能將 4 位數的十進位數字`score`轉成`font_ctrl`的文字代碼`d0_font`、`d1_font`、`d2_font`和`d3_font`，分別是千位、百位、十位以及個位數。具體作法其實就只是用除法和 mod 就可以達成。

Module: dec2font 此模組能將二進位數字`dec`轉成`font_ctrl`模組的文字代碼`font`。

Module: text_ctrl

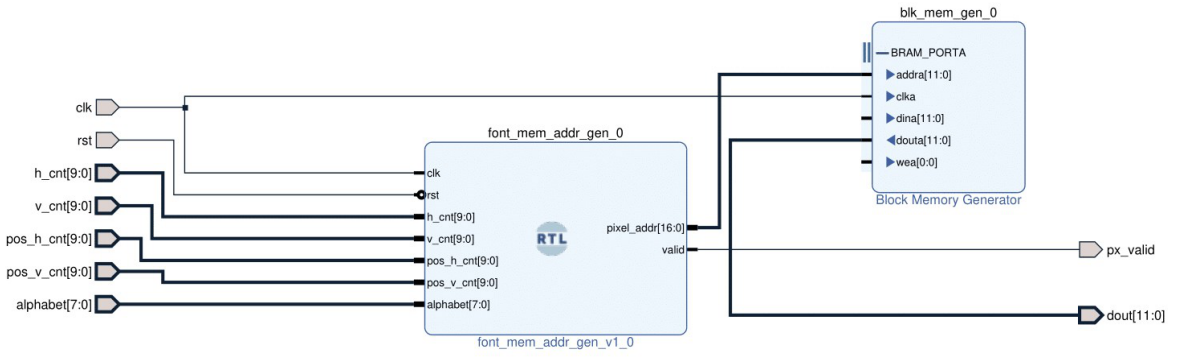
此模組擴展 `font_ctrl` 的功能，給定一個座標(`pos_h_cnt`, `pos_v_cnt`)將多個文字`alphabets_1d`於指定座標水平顯示。也就是說，此模組提供類似於文字方塊的功能，將文字內容水平顯示。具體的作法是檢查 VGA 座標 (`h_cnt`, `v_cnt`) 看看座標是落在水平文字的第幾個文字上，若是落在第二個文字上，就將 `font_ctrl` 的 input 換成第二個文字的座標(`text_h_cnt`, `text_v_cnt`)和文字編碼`alphabet`。代碼如下

```
always@(posedge clk) begin
    if(h_h_cnt >= pos_h_cnt && h_v_cnt >= pos_v_cnt) begin
        if((h_h_cnt - pos_h_cnt) < FONT_WIDTH_CNT * ALPHABET_N) begin
            text_h_cnt <= pos_h_cnt + FONT_WIDTH_CNT * alpha_idx;
            text_v_cnt <= pos_v_cnt;
            alphabet <= alphabets[alpha_idx];
        end
    end
end
```



Module: font_ctrl

此模組可以依據指定位置(`pos_h_cnt`, `pos_v_cnt`)將單個文字`alphabet`在指定位置畫出，其中`dout`輸出對應該 VGA 座標(`h_cnt`, `v_cnt`)的 pixel 資料，而`px_valid`輸出該 VGA 座標是否會有文字 pixel，也就是文字圖層在該 VGA 座標是否為透明。



Module: font_mem_addr_gen 此模組依據輸入的文字座標位置(`pos_h_cnt`, `pos_v_cnt`)並將此座標當作文字框的左上錨點輸出 input `alphabet`對應文字圖片的 address `pixel_addr`。具體作法是先將文字

圖片切成 7 * 8 個方格，其中每個方格為 8 * 8 pixels，並從左上到右下依序從小到大編號，當 VGA 座標若位於 ([pos_h_cnt, pos_h_cnt+8), [pos_v_cnt, pos_v_cnt+8)) 區域內，則將 input alphabet 對應的文字的 address 輸出。

```
always@(*) begin
    blk_h_cnt <= alphabet % FONT_NUM_COL;
    blk_v_cnt <= (alphabet / FONT_NUM_COL) % FONT_NUM_ROW;
end

always@(*) begin
    pixel_addr <= (addr_h_cnt + FONT_WIDTH_CNT * blk_h_cnt) + (
        FONT_WIDTH_CNT * FONT_NUM_COL * (addr_v_cnt + FONT_HEIGHT_CNT *
        blk_v_cnt));
    // pixel_addr <= addr_h_cnt + (FONT_WIDTH_CNT * FONT_NUM_COL *
        addr_v_cnt);
end

always@(*) begin
    if(h_h_cnt >= pos_h_cnt && h_h_cnt < pos_h_cnt + FONT_WIDTH_CNT &&
       h_v_cnt >= pos_v_cnt && h_v_cnt < pos_v_cnt + FONT_HEIGHT_CNT)
          begin
        addr_h_cnt <= (h_h_cnt - pos_h_cnt) % FONT_WIDTH_CNT;
        addr_v_cnt <= (h_v_cnt - pos_v_cnt) % FONT_HEIGHT_CNT;
        valid <= 1'b1;
    end else begin
        addr_h_cnt <= 0;
        addr_v_cnt <= 0;
        valid <= 1'b0;
    end
end
```

Module: blk_mem_gen_font 此為 Vivado 內建的 RAM IP 模組，我們將文字圖片如下放進 RAM 中儲存並讀取。

Module: song_switch

此模組依據is_start、is_game_over和is_overlap三種訊號判斷遊戲目前場景，並回傳對應的歌曲 ID。

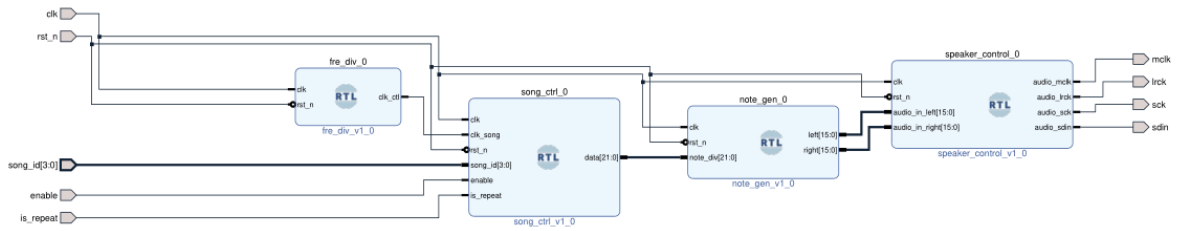
```
always@(posedge clk) begin
    if(is_overlap) begin
        song_id <= `BUMP_SONG_ID;
    end else if(~is_start && ~is_game_over) begin
        song_id <= `ANGRY_BIRD_SONG_ID;
    end else if(is_start && ~is_game_over) begin
```

```
7           song_id <= `FRUIT_PUDDING_SONG_ID;
8       end else if(~is_start && is_game_over) begin
9           song_id <= `ANGRY_BIRD_SONG_ID;
10      end
11  end
```

Module: audio_ctrl

在此遊戲中，背景音樂的部分設計為遊戲進行中和遊戲結束分別播放”fruit pudding”和”angry bird”兩首曲子，並在小鳥拍動翅膀以及撞擊到水管時也會有音效 (備註：最後此功能因為時間限制所以沒有完全實現)。在曲子循環播放的部分，背景音樂是重複循環播放，並由現在是否在遊戲中決定要播放哪首曲子；而小鳥翅膀拍動的聲音以及撞擊到水管的音效，則是單次播放。此模組主要功能是將所有聲音的模組結合在一起，並經由這個模組，可以選擇要播放哪首曲子，以及該首曲子是否要重複播放。

在此模組中，利用`song_id`來決定要播放哪首曲子、`enable`來決定被選到的曲子是否要播放、`is_repeat`來決定是否要循環重複播放該首曲子；`mclk`、`lrck`、`sck`和`sdin`則是 audio 的 output 訊號。



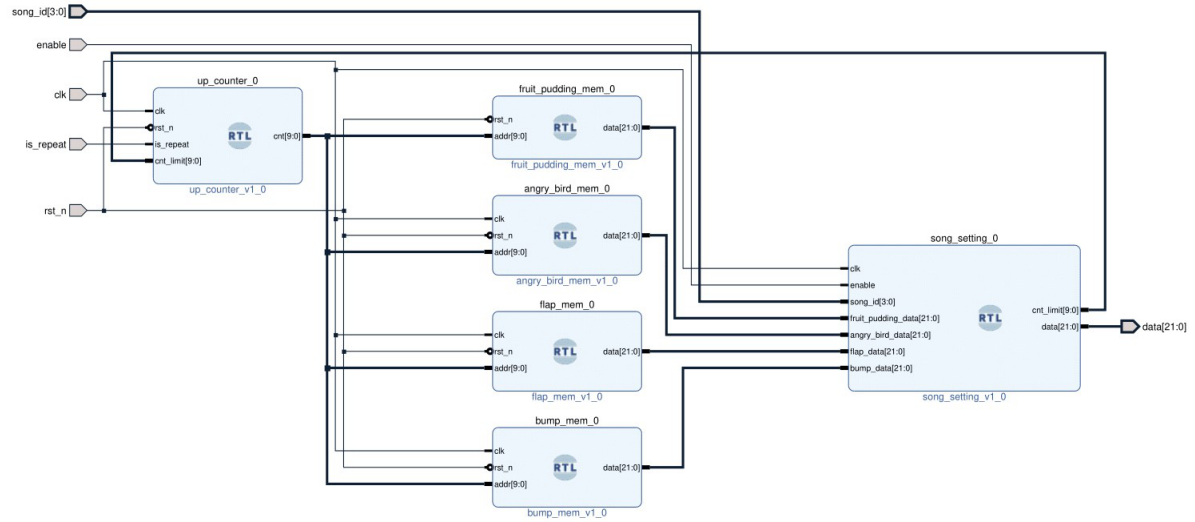
Module: fre_div 此模組主要功能是利用除頻器，產生一個音符播放的時間長度，此模組產生的 clock 訊號輸出給`up_counter`，即可控制一個音符的播放時間。

在播放曲子時，每個音符都有自己播放的時間長度，但在一首曲子中，並不會每個音符播放的時間都一樣長 (例如: 一首曲子中常常會有十六分音符、八分音符、四分音符、全音符等)，在此為了設計方便，統一所有的音符皆使用十六分音符的時間長度，並透過「多放幾個音符」的方式來呈現持續時間不同的音符 (例如: 當播放八分音符時，因為每個音符播放的時間是十六分音符的播放時間，因此就將原本曲子內的八分音符拆成連續兩個十六分音符播放，這樣兩個連續的十六分音符聽起來就會像一個八分音符一樣)

Module: song_ctrl

此模組主要功能為選擇要播放的曲子，以及控制該曲子是否要重複循環播放。`song_id`決定要播放哪首曲子、`enable`；決定被選種的曲子是否要播放；`is_repeat`決定該首曲子是否要循環播放；`data`則是要播放音符的音階。

此模組還有用到up_counter、fruit_pudding_mem、angry_bird_mem、flap_mem、bump_mem等模組，在以下詳述。



Module: up_counter 此模組的主要功能是控制曲子播放到第幾個音符，並在音符結束播放後決定是否要重頭開始循環重複播放。is_repeat訊號會輸入此模組，最為該曲子是否要重複播放的判斷。

因為每首曲子的長度並不相同，就代表每首曲子的音符個數不同。因此在此模組中，也會有輸入訊號cnt_limit，代表該首曲子的音符個數；cnt則是代表 counter。

藉由is_repeat、cnt_limit，和cnt這三個訊號，可以控制該首歌曲的播放以及是否重複播放。

```
always@(*)begin
    if (cnt >= cnt_limit) begin     //當播放的音符個數超過曲子長度時
            if(is_repeat) begin
                cnt_tmp = 'd0;     //若is_repeat=1，代表要重複播放，則當曲子播到最後一個音符時，及回到第一個音符繼續重頭播放
            end else begin
                cnt_tmp = cnt_limit;     //若不循環播放，則停在該曲子的最後一個音符，不再從頭播放
            end
        end else begin
            cnt_tmp = cnt + 'd1;     //一個音符一個音符依序播放下去
        end
    end
```

```
    //up counter
    if (~rst_n) begin
            cnt <= 'd0;
```

```
        end else begin
            cnt <= cnt_tmp;
        end
    end
```

Module: song_setting 此模組依據輸入的song_id和每支不同曲子的音階，包括fruit_pudding_mem、angry_bird_data、flap_data和bump_data，輸出對應的曲子的音階。

Module: fruit_pudding_mem 此模組主要控制遊戲進行時的背景音樂–"fruit pudding" 這首曲子的播放，透過輸入不同音符的 address [MUSIC_ADDR_BITS_N-1:0] addr來判斷要播放哪個音符，並用data將音符的音階讀出來並播放出來。

```
    //曲子中會用到的音符
    //在曲子中會用到各種不同頻率(音階)的音符
    //因此需要先將曲子中會用到的所有音階都先用"100M除以該音符的頻率"，算出對應的數值
    //藉由這些數值，就可以播放出不同頻率、音階的音符，進而拼湊出完整的曲子
    localparam none = 22'd11;     //播放none會沒有聲音，藉由放none在不同音符間可以讓不同音階的音符聽起來不會黏在一起(none也是佔一個音符的播放長度)
    localparam m_do = 22'd382219;
    localparam m_re_b = 22'd360776;
    localparam m_re = 22'd340529;
```

```
    always@(*)begin
        case (addr)     //藉由音符的address(addr)，可以決定要播放第幾個音符
            'd0: data = h_fa;     //在決定要播放第幾個音符後，就可以輸出該addr所代表的data
            'd1: data = h_fa;     //此處有兩的"h_fa"放在一起，表示此為一個八分音符的高音fa。為了使fre_div模組方便設計，該模組只會輸出十六分音符的播放時間，因此若需播放八分音符，就必須要連續播放兩個相同的音符
            'd2: data = h_re;
        endcase
```

Module: angry_bird_mem 此模組主要是負責播放遊戲結束時的背景音樂–"angry bird" 這首曲子。其運作和前面的fruit_pudding_mem模組一樣，都是透過一個音符一個音符，透過不同的頻率產生不同的音階，並利用這些音階拼湊出整首曲子。

Module: flap_mem 此模組主要是負責翅膀拍動時的音效，其運作方式也和前面提到的fruit_pudding_mem、angry_bird_mem模組一樣，都是利用除出不同頻率得到不同音階的音符，再用這些音符將音效做出來。在此模

組因為是模仿翅膀拍動的聲音，因此在此模組只有兩個音符。

```
    localparam h_do = 22'd190839;
    localparam h_mi = 22'd151515;
```

Module: bump_mem 此模組是在小鳥撞擊到水管時，要發出的音效。其運作原理和前面提到的fruit_pudding_mem、angry_bird_mem、flap_mem模組一樣，都是透過不同頻率產生不同音階，再將這些音階拼湊出想要的撞擊音效。

Module: note_gen 此模組主要功能是以”papallel”的方式產生各種不同頻率的左、右聲道訊號，以形成各種不同的音階。在此模組中，有 counter"Note frequency generation"，其運作原理和 1 Hz 的除頻器一樣，但不同的地方是，在此模組中的 counter，有可以改變的note_div當作 counting limit，透過改變note_div，可以產生不同頻率，進而產生不同音階。

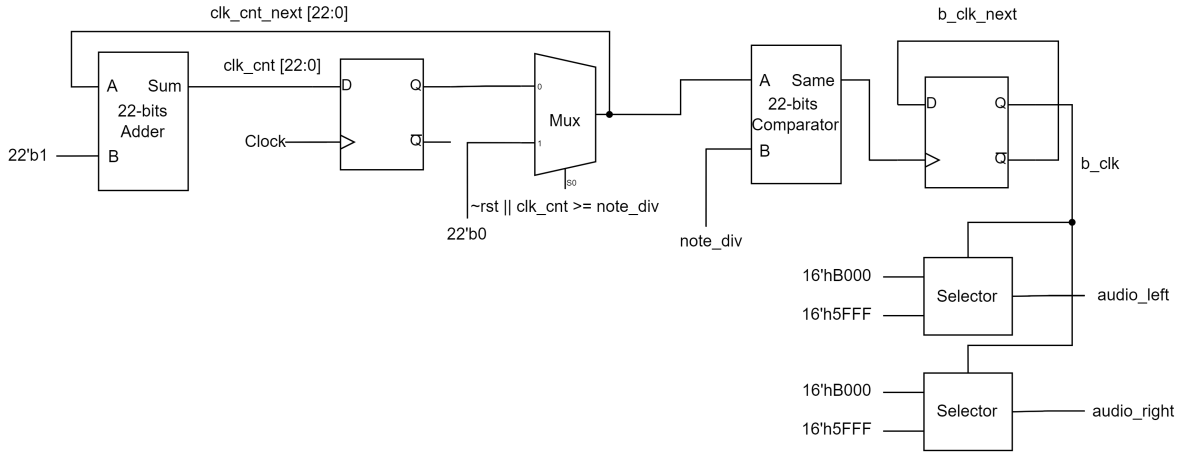
```
// Note frequency generation
always @(posedge clk or negedge rst_n)
  if (~rst_n)
  begin
    clk_cnt <= 22'd0;
    b_clk <= 1'b0;
  end
  else
  begin
    clk_cnt <= clk_cnt_next;
    b_clk <= b_clk_next;
  end

always @*
  if (clk_cnt == note_div)
  begin
    clk_cnt_next = 22'd0;
    b_clk_next = ~b_clk;
  end
  else
  begin
    clk_cnt_next = clk_cnt + 1'b1;
    b_clk_next = b_clk;
  end
```

此外，在此模組中還有b_clk控制振幅，每當 counter 記數到note_div(limit)，b_clk就會切換一次。當b_clk=1時，[15:0] left和[15:0] right(各 16-bit 的 parallel data) 會是16'h5FFF；反之，當b_clk=0時，[15:0] left和[15:0] right則會是16'hB000。[15:0] left和[15:0] right會一直在16'h5FFF(波峰) 和16'hB000(波谷) 之間不斷變換其值，這就是振幅。

```
// Assign the amplitude of the note
assign left = (b_clk == 1'b0) ? 16'hB000 : 16'h5FFF;
```

```
3  assign right = (b_clk == 1'b0) ? 16'hB000 : 16'h5FFF;
```

Note Generator Module(note_gen.v)

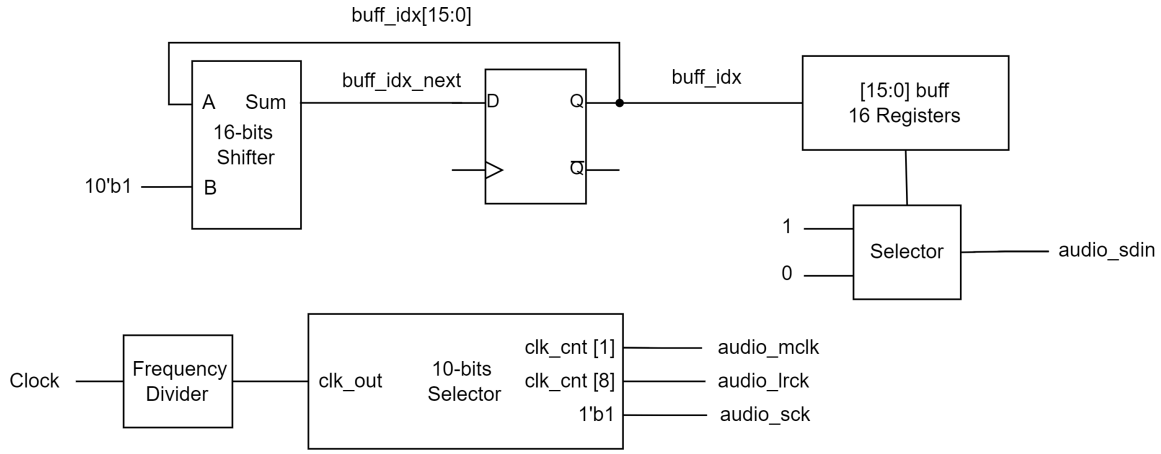


Module: speaker_control speaker 在輸出時，是透過左、右聲各 16-bit 以”serial”的訊號輸出。在此模組中，`clk_cnt`會產生三種 clock 需要的頻率，分別是`audio_mclk`、`audio_lrck`、`audio_sck`。

此模組是以左、右聲道各 16-bit (總共 32-bit)，以“parallel”的方式輸入，並以“serial”的方式輸出。因此在”serial”的 clock (`audio_sck; //serial clock`) 需要比“parallel”的 clock (`audio_lrck; //left-right clock`) 快 32 倍。且`clk_cnt`每往左 1-bit，即代表除以 2，因此將將三種 clock 設定為: `audio_mclk = clk_cnt[1]; (master clock)`、`audio_lrck = clk_cnt[8]; (left-right clock)`、`audio_sck = 1'b1; (serial clock)`

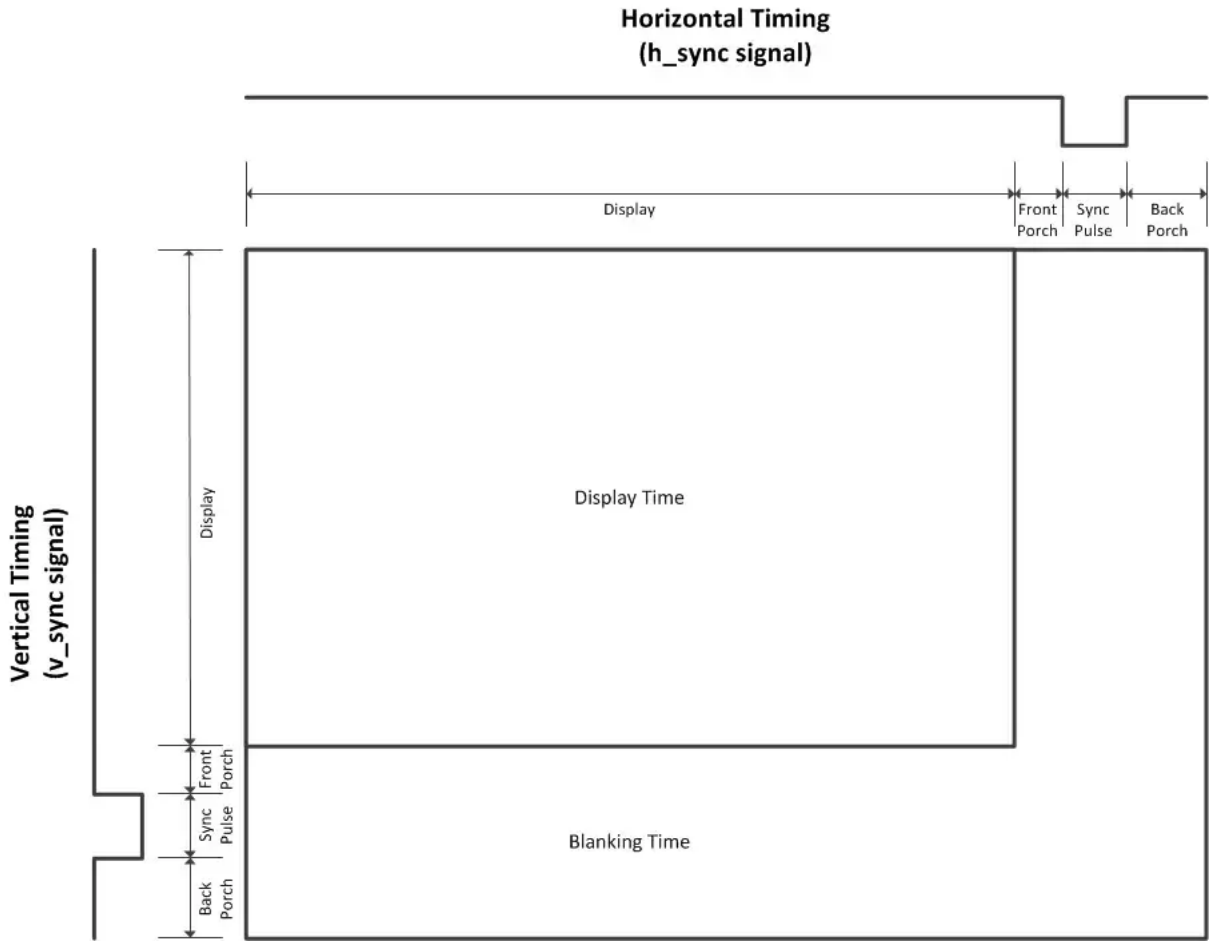
```
1  // Assign divided clock output
2  assign audio_mclk = clk_cnt[1];    // master clock
3  assign audio_lrck = clk_cnt[8];    // left-right clock
4  assign audio_sck = 1'b1;     // serial clock
```

Speaker Control Module(speaker_control.v)



Module: vga_controller

依據 VGA 的設計，我們需要在 Horizontal Sync Pulse 與 Vertical Sync Pulse 的時間區間內拉回 Scan 到下一行或下一個 frame 的起始位置。因此，在 Horizontal Sync 的時間區間內，必須將 HSYNC 設為低電壓，而在 Vertical Sync 區間內，必須將 VSYNC 設為低電壓。而在其他時間則是在每個 clock 依序掃每個 pixel，如下圖所示。



而 pixel clock 的計算方式為 FPS * Width * Height，若為 60 FPS, 640 * 480 的螢幕的話則為 60 * 800 * 525 = 25175000 Hz = 25.175 MHz，詳細參數對應下方表格。

Width = (Horizontal Active Video + Horizontal Front Porch + Horizontal Back Porch + Horizontal Sync Pulse)

Height = (Vertical Active Video + Vertical Front Porch + Vertical Back Porch + Vertical Sync Pulse)

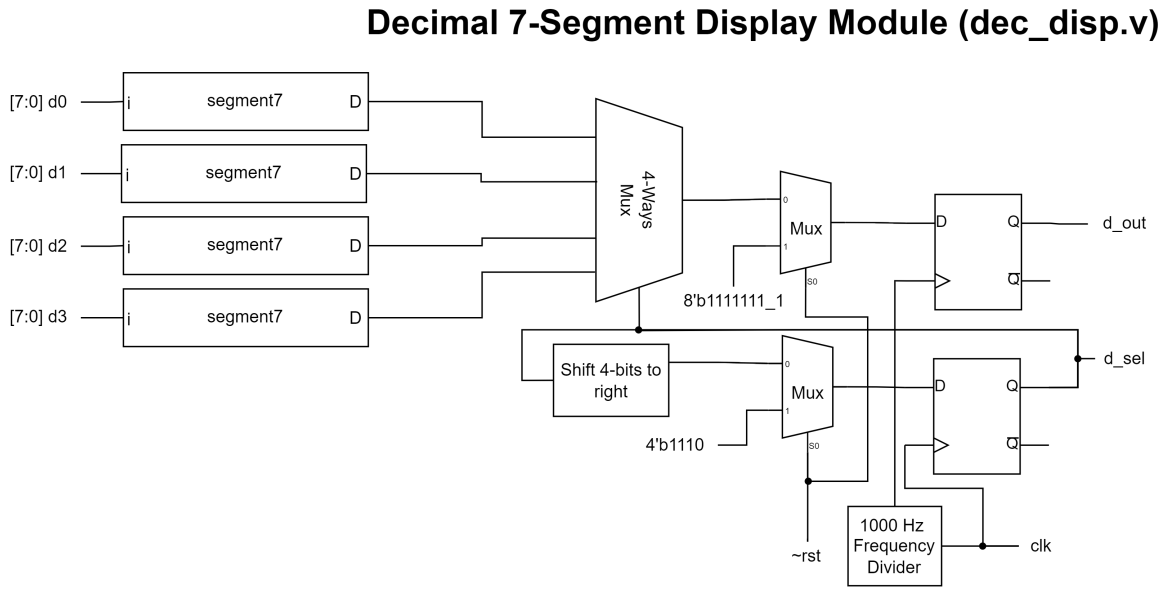
VGA 常用分辨率时序参数

显示模式	时钟 /MHz	行时序参数(单位：像素)					列时序参数(单位：行)				
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	k
640x480@60Hz	25.175	96	48	640	16	800	2	33	480	10	525
800x600@60Hz	40	128	88	800	40	1056	4	23	600	1	623
1024x768@60Hz	65	136	160	1024	24	1344	6	29	768	3	806
1280x720@60Hz	74.25	40	220	1280	110	1650	5	20	720	5	750
1280x1024@60Hz	108	112	248	1280	48	1688	3	38	1024	1	1066
1920x1080@60Hz	148.5	44	148	1920	88	2200	5	36	1080	4	1125

其中 a 為 Horizontal Sync Pulse，b 為 Horizontal Back Porch，c 為 Horizontal Active Video，d 為 Horizontal Front Porch；而 f 為 Vertical Sync Pulse，g 為 Vertical Back Porch，h 為 Vertical Active Video，i 為 Vertical Front Porch。

Module: dec_disp

此模組在七段顯示器上會顯示`d0`, `d1`, `d2`, 和 `d3` 的二進制數。此模組會將二進制的`d0`, `d1`, `d2`, 和 `d3` 轉換成七段顯示模式，並將這些訊號傳入`display_7seg`模組，即可將`d0`, `d1`, `d2`, 和 `d3`以七段顯示顯示出來。



Module: segment7 此模組將 4-bit 二進制數字轉換為七段顯示器

Module: display_7seg 當要控制七段顯示器時，由於每次只能控制一個位數，因此將此模組設計為以四位數為輸入，並在每次時鐘訊號上升的時候，即在顯示器上顯示一個位數。每當時鐘電位為高電壓時，此模組會控制`d_sel`切換到不同的位數，並顯示相對應的數字。例如: 當時鐘電位第一次為高電壓時，模組會設定`d_sel = 4'b1110`和`d_out = d0`；時鐘電位第二次為高電壓時，模組則會設定`d_sel = 4'b1101`和`d_out = d1`等等。

Module: segment7_frequency_divider 為了要產生 1000 Hz 的時鐘訊號，在此模組使用了變數`counter_in`和`counter_out`，並使變數從 0 數到 50000。變數`counter_in`會儲存下一個時間狀態要用到的值，並在時鐘電位為高電壓時將此值傳給`counter_out`。在每次時鐘電位為高電壓的時候，才會觸發記數，因此在此模組需要從 0 到 50000 的記數，且在每兩次 clock pulses ，記數會多 1。

Discussion

如何設計水管滾動機制

在設計水管滾動機制時，我們測試了許多種方法，也有考慮過是否能用不用切分螢幕的方式實現，但最後發現這樣就必須要有三個 index 指出目前第一、二、三根水管在 register matrix 內的座標，因此可能不大可行。最後反覆嘗試才使用目前的作法，而設計這種做法作最難就是要計算目前的 pixel 位置，稍一不慎就很容易寫錯，最後使用的寫法則是統一先判斷 VGA 座標是否在任一水管要顯示的範圍內，再將 VGA 座標減去該水管左上角的座標，對齊水管圖片的座標後再轉成水管圖片的地址。

如何設計多行文字顯示機制

實現文字顯示功能的模組為`text_ctrl`與`font_ctrl`，前者負責顯示多個文字，後者負責顯示一個文字，而實現的方式也類似於`pipe_ctrl`，就是判斷 VGA 座標是否和顯示文字的區域重疊，若有重疊，則將對應文字的座標和文字代碼傳入`font_ctrl`以顯示文字。這樣做的好處不言而喻，只需要一個模組就可以顯示任意數量的文字。但其實我們原本打算顯示一行文字就用一個新的`font_ctrl`，但這樣因為太消耗記憶體作罷，另一個想法是，傳入一個 matrix 紀錄每個欲顯示文字的座標和文字代碼，並用時間分差的方式顯示，也就是每個 clock 輪流顯示不同文字，但這樣需要考量到 clock 速度和 VGA clock 速度的問題，也怕有同步問題導致顯示效果不佳，因此座後決定採用此種作法。

Conclusion

透過這次的專題實做，讓我們更加了解想要實現一個遊戲，各個不同的 module 之間是如何設計的。因為在之前的 LAB，基本上都是只有單個主題，透過這次的期末專題，不只讓我們可以將這些不同主題結合起來，也讓我們體會到這些不只可以應用在課堂上的 LAB，還可以實現在生活中我們自己設計的東西。

Reference

- 【接口时序】7、VGA 接口原理与 Verilog 实现

  此部落格詳細解說了 VGA 的運作機制和各尺寸螢幕的參數表。

- Working with block designs in Xilinx Vivado by Vincent Claes

  Vivado block design tutorial.