Final project

提供遠端操作功能之多功智能洗烘衣機

110060027 朱豐蔚、109061116 徐瑞澤

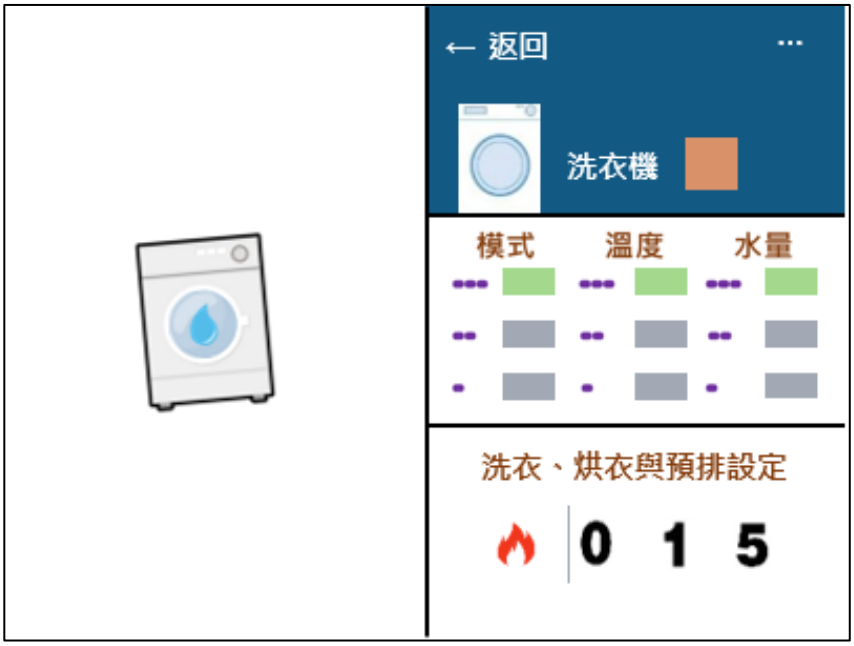
壹、專題內容簡介

在現代忙碌的生活中，洗烘衣機兩用合一的特性使其已然成為使用者不可或缺的 3C 家電，再者，配合如今的互聯網發展，越來越多的洗烘衣機都有搭配能夠與手機 APP 連結的功能，使消費者不再需要點擊洗烘衣機上的按鈕來操作，可以透過 APP 上的按鍵，實現遠端操作，甚至是進一步搭載預先排程(以下簡稱為預排)功能，能夠事先安排洗衣、烘衣的時程，再預定的時間開始進行洗烘衣，以解決現代人因忙碌而來不及回家處理家事的問題。

本期末專題將設計與實現提供遠端操作功能之多功智能洗烘衣機。在專題中，我們以 FPGA 本身看作洗衣機，FPGA 上的按鈕、開關即代表實際上在洗衣機上的諸多按鍵，而相對的，我們以鍵盤上的按鍵模擬手機 APP 的操作。七段顯示器用來進行倒數時間、洗衣時間、水量設定、烘衣時間、溫度設定、排程時間的交替顯示，LED 燈則代表洗衣機各個細節的狀態。

透過 VGA 輸出(如下圖)，螢幕的左半部分將顯示目前洗衣機的狀態(等待、洗衣中、烘衣中、暫停、開門)，而右半則模擬手機 APP 介面，呈現現在洗衣機的狀態與相關設定，右半部的呈現為上述 LED 與 SSD 的綜合呈現。

本洗烘衣機提供基本的洗衣、烘衣、暫停等功能，加入多樣化的水量、溫度、時間設定，而預排功能則是此次專題的重點，讓洗衣機能在預定的時程進行洗烘衣的程序。



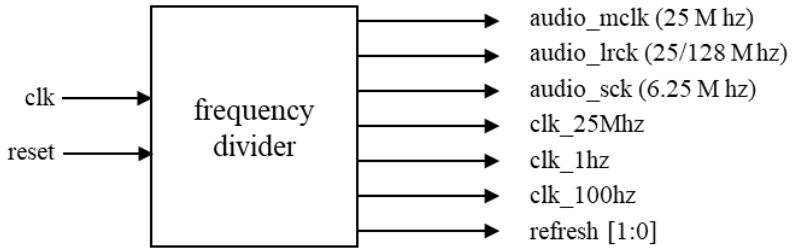
圖一、VGA 呈現畫面示意圖

貳、I/O pins assignment

Input / Output	Pin	Function
Button Up	T18	上下調整控制項目
Button Down	U17	
Button Left	W19	調整溫度大小、水量大小、時間多寡
Button Right	T17	
Button Mid	U18	啟動、暫停、長按取消
DIP switch 1	V17	電源開關(等同於 reset)
DIP switch 2	W16	模擬洗烘衣機門的開啟與關閉
DIP switch 3	R3	預選方案(細緻洗衣): 洗衣 30 分、少水、烘衣 30 分、低溫
DIP switch 4	W2	預選方案(快速洗衣): 洗衣 15 分、中水、烘衣 15 分、中溫
DIP switch 5	U1	預選方案(厚重洗衣): 洗衣 60 分、多水、烘衣 60 分、高溫
Keypad Up	同 Lab 8	(模擬手機 APP) 上下調整控制項目
Keypad Down		
Keypad Left		(模擬手機 APP) 調整溫度大小、水量大小、時間多寡
Keypad Right		
Keypad Enter		啟動、暫停、長按取消
LED light D1	U16	若為洗衣中，燈亮
LED light D2	E19	若為烘衣中，燈亮
LED light D3	V19	若為少水，燈亮
LED light D4	W18	若為中水，燈亮
LED light D5	U15	若為多水，燈亮
LED light D6	V14	若為低溫，燈亮
LED light D7	V13	若為中溫，燈亮
LED light D8	V3	若為高溫，燈亮
LED light D9	U3	若為細緻洗衣，燈亮
LED light D10	P3	若為快速洗衣，燈亮
LED light D11	N3	若為厚重洗衣，燈亮
7-segment digit 0	U2	倒數時間、洗衣時間、水量設定、烘衣時間、溫度設定、排程時間的交替顯示
7-segment digit 1	U4	
7-segment digit 2	V4	
7-segment digit 3	W4	
LCD Display	同 Lab 9	顯示洗衣機目前狀態與遠端控制手機 APP 介面
Speaker	同 Lab 7	洗烘衣完成後的鈴聲

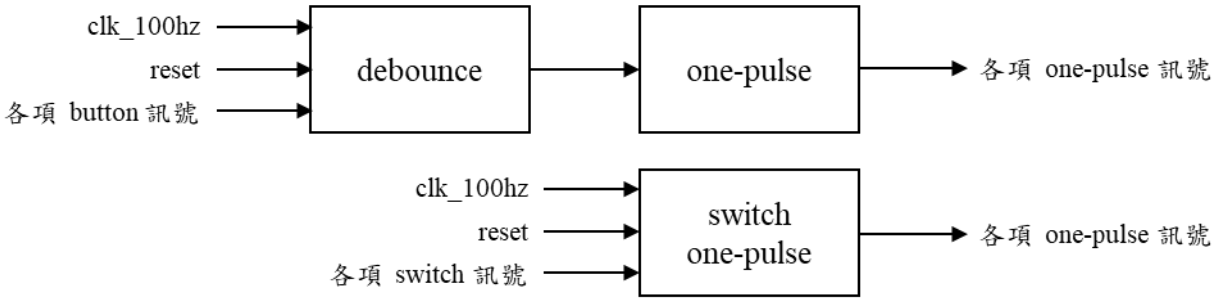
參、各項前處理

一、所需除頻器的統整：



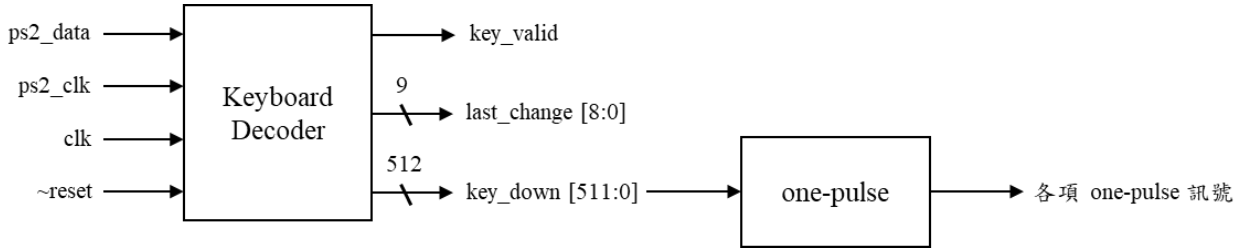
在這部分,先將之後所有需要的頻率都先生成出,包括輸出聲音所需要的 audio_lrck、audio_mclk、audio_sck，還有更新後續 FSM 所需的 clk_100h、更新 VGA 的 clk_25Mhz、倒數計時用的 clk_1hz，最後還有更新 SSD 顯示 digit 的 refresh。

二、按鈕、開關的 one-pulse 統整：



在這部分中，將各項輸入的訊號進行 one-pulse 處理，以方便進行後續各種 FSM 的判定，此外，switch 也使用 one-pulse 的方式生成打開、關閉兩種 one-pulse 訊號，以進行開關洗烘衣機門、選用方案等的判定。

三、鍵盤訊號的統整：



在本次專題中，僅用到上下左右以及 Enter 五個按鍵，故針對此五個按鍵的 keydown 進行判定，並使用 one-pulse 進行處理，以方便進行後續各種 FSM 的判定與 button 的統整。

肆、洗烘衣機設定與 SSD 的顯示切換

一、設計細節：

在這一個大章節中，將會描述 SSD 中六種呈現：1.倒數時間、2. 洗衣時間、3. 水量設定、4. 烘衣時間、5. 溫度設定、6. 排程時間各自的設定細節與切換方式。

在設計中，我們使用鍵盤上下鍵與按扭上下鍵去切換 SSD 此時要顯示 1. ~ 6.的哪一個，我們採用 ring counter 的設計，即 1.與 6.之間是互通的。

備註：reset 過後預設為顯示 1.。

二、水量、溫度的設定 FSM：

當在 3.狀態下，此時 SSD 會呈現水量的設定，僅有在此狀態下，左右鍵才會影響水量多寡；當在 5.狀態下，此時 SSD 會呈現溫度的設定，僅有在此狀態下，左右鍵才會影響溫度高低。

水量與溫度是使用相同的 FSM 去做控制，各自都分為低、中、高三種狀態，彼此之間的切換由鍵盤左右鍵與按紐左右鍵的 one-pulse 來做切換。

備註：低、中、高分別以中橫線呈現於 digit_0、digit_1、digit_2。

三、洗衣時間、烘衣時間的設定 counter：

當在 2.狀態下，此時 SSD 會呈現洗衣時間的設定，僅有在此狀態下，左右鍵才會影響洗衣時間；當在 4.狀態下，此時 SSD 會呈現烘衣時間的設定，僅有在此狀態下，左右鍵才會影響烘衣時間。

洗衣時間與烘衣時間是使用相同的 counter 去做控制，而 counter 又進一步分成處理小時與分鐘的，大體上寫法與 Lab_6 類似，每當按鍵盤右鍵或按紐右鍵時，分鐘的 counter 皆會 +5，而反之，左鍵則是 -5，分鐘的進位與退位會分別讓小時的 counter +1 與 -1。

會採用一次調整 5 分鐘的 counter，是為了更加貼合現實中的設定，通常洗烘衣時間的微調都是以 5 分鐘為單位去進行。

備註：此兩個 counter 不會隨著時間秒數過去而減少，因為在此刻，這兩個 counter 代表的是之後進入洗烘衣狀態後各自所需要跑的時間，僅是設定，不是之後實際倒數的 ocunter。

四、預排時間的設定 counter：

當在 6.狀態下，此時 SSD 會呈現預排時間的設定，僅有在此狀態下，左右鍵才會影響預排時間。

預排時間是使用 counter 去做控制，而 counter 又進一步分成處理小時、分鐘與秒的，大體上寫法與 Lab_6 類似，每當按鍵盤右鍵或按紐右鍵時，分鐘的 counter 皆會 +1，而反之，左鍵則是 -1，分鐘的進位與退位會分別讓小時的 counter +1 與 -1。

而與洗烘衣設定時間的 counter 不同，考慮到現實中使用時，預排大多是以小時為大單位調整，所以加入了長按功能，當長按右鍵會一次增加一小時，長按左鍵會一次減少一小時，最大提供了 9 小時 59 分的預排時間。

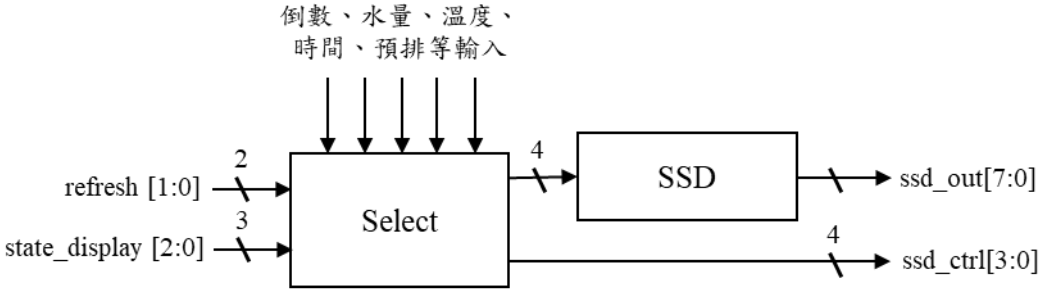
備註：與洗烘衣設定時間的 counter 不同，當 counter 不為 0 時 0 分 0 秒時(reset 完會為 0 時 0 分 0 秒)，此 counter 會隨著時間秒數過去而進行倒數，減少到 0 即會開始進行洗烘衣。換句話說，當在 6.狀態下，一點擊右鍵增加任何分鐘、小時數字，都會開始進行倒數。

五、倒數時間的顯示：

當在 1.狀態下，此時 SSD 會呈現目前進行洗烘衣狀態時間的倒數(與現實中洗烘衣同，顯示小時與分鐘數)，在此狀態下，左右鍵並不會影響任何設定。有關於倒數的細節與值將會於下一大章節中進行討論。

備註：在洗烘衣機並未進行任何洗烘衣時，倒數都會顯示為 0 時 0 分。

六、SSD 控制：



同設計細節中所述，select 將會根據 state_display [2:0]來控制最終輸出的四個 digits 為何，並使用在前述所輸出的 refresh 來做為 SSD 的更新訊號，最終將結果輸出於 SSD 上，以模擬洗衣機上各項燈號、面板的輸出情況。

伍、進程 FSM 與倒數設計

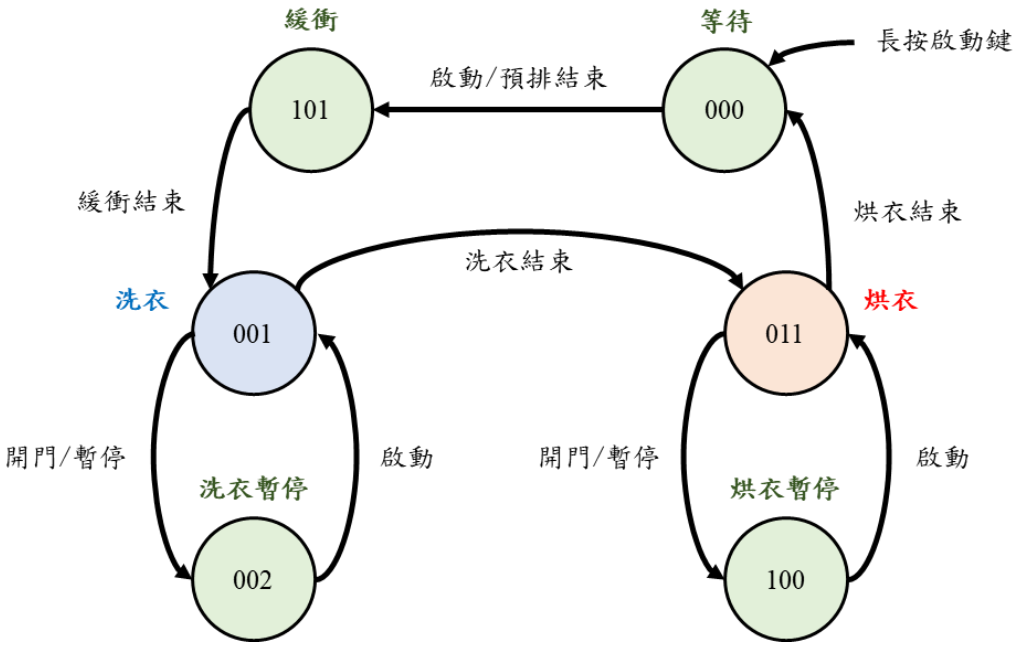
一、進程 FSM：

這一部分的設計目的也就是整台洗衣機最核心的部分：進程，負責通過接受各項指令，例如啟動、倒數結束，來控制洗衣機的狀態切換，進一步影響 LED 燈號、SSD 與 VGA 輸出的呈現。

首先先針對我們所需的 state 畫出簡易的 state diagram，如下頁圖二。如圖，如同正常洗烘衣機，我們需要 6 種 state 來分別描述等待階段、緩衝階段、洗衣階段、洗衣暫停階段、烘衣階段和烘衣暫停階段。

在等待階段中，水量、溫度的 LED 將不會更新，表示階段顯示的 LED 將不會亮，SSD 中的倒數將呈現 0 時 0 分，VGA 左半部分將根據開門與否呈現開門、關門兩種圖案。在此階段中，將會持續等到使用者按下啟動，或是預排時間倒數結束才會切換到緩衝階段，正式開始洗烘衣。

備註：reset 後將會從等待階段開始，在其他任意階段透過長按啟動鍵也能回到等待階段。當開門狀態時，是沒辦法啟動洗烘衣的。



圖二、進程 FSM 之 state diagram 簡易圖

進入緩衝階段後，水量、溫度的 LED 將更新為啟動洗烘衣時當下所設定的水量和溫度，也會根據設定載入洗衣時間與烘衣時間供後續倒數使用，表示階段顯示的 LED 此時仍不會亮，SSD 中的倒數將還是呈現 0 時 0 分，VGA 左半部分呈現關門圖案。在此階段中，將會空倒數 2 秒才正式進入衣階段，這樣的設計是為了與現實中的洗衣機更加相似，能夠給予使用者緩衝時間去取消啟動的動作，去預防誤觸等問題。

從進入洗衣階段後，水量、溫度的 LED 將不會再受外界設定所影響，換句話說，不能因為預排的設定而讓正在洗烘衣的設定產生變化，表示洗衣階段顯示的 LED 燈會亮，VGA 左半部分會呈現洗衣圖案(透過 clk_1hz，我們讓兩張圖片來回切換，進而產生動畫的效果)，且 SSD 中的倒數將呈現洗衣時間的倒數，倒數結束後會進入烘衣階段。

備註：當在洗衣階段下，按下暫停(即啟動鍵)或是開門，皆會使洗衣暫停，此時暫停倒數，必須待到將門關上後，再重新點擊啟動鍵才可回到洗衣階段。若將洗衣時間設定為 0 時 0 分，與緩衝時間相同，我們仍會讓洗衣狀態空跑 2 秒才進烘衣階段，以提供給使用者時間來做取消的動作。

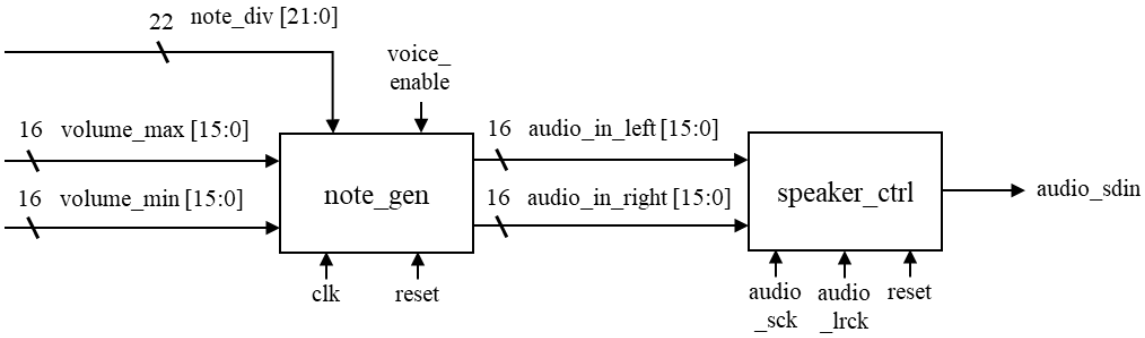
烘衣階段、烘衣等待階段與上述洗衣皆雷同，因此不再重複描述。

二、倒數 counter 的設計：

從上述 FSM 的設計，可以看出倒數 counter 在本次專案的重要性以及廣泛性，為求方便與統一，我們統一都是使用一個 counter (包含時、分、秒的子 counter)來進行緩衝、洗衣、烘衣時間的倒數。

由於採用同一個 counter，我們使用 load counter 的設計，並附上 load 訊號，讓 counter 能夠根據不同 state 下來 load 所設定之倒數時間。至於完成倒數的判斷，我們採用 one-pulse 的方式，當時分秒皆歸 0 時，downtime_complete 將輸出 1，其餘皆輸出 0，而透過 switch one-pulse，就可以將 downtime_complete 的 one-pulse 訊號取出，供進程 FSM 使用。

陸、聲音輸出控制



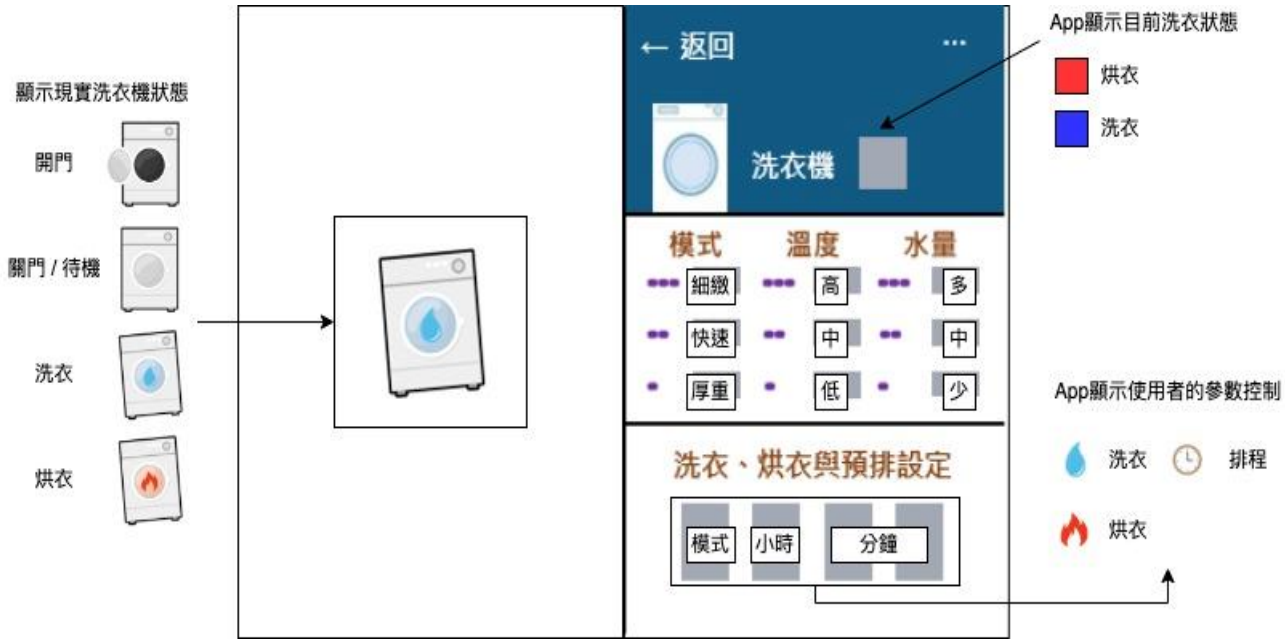
在本次專案中，為了還原洗衣機在結束洗衣、烘衣會有的音效，我們使用了 speaker 來做聲音的輸出。

由於不須調控音量，於是我們直接在 assign volume_max (16'b0011_1111_1111_1111)、volume_min (16'b1100_0000_0000_0000)的值。而至於音高，我們將洗衣完成後的聲音定為 Mi (note_div = 22'd151515)、烘衣完成的聲音定為 Do (note_div = 22'd191571)。

而控制要不要發出聲音的訊號為 voice_enable，當洗衣、烘衣各自結束後的一個 clk_1hz，輸出為 voice_enable，即可達成洗衣、烘衣結束時的音效播放。

柒、VGA 輸出控制

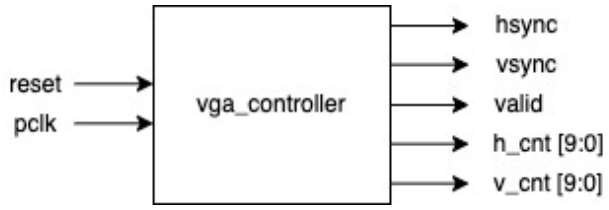
圖案對照功能之示意圖如下方所示：



圖三、VGA 螢幕輸出圖案對照功能圖

而以下部分為 VGA 控制的整體架構說明(部分 codes 位於 main.v 中) ：

一、VGA_controller：



此 Module 為負責 VGA 控制訊號的輸出(vsync, hsync)，以及輸出掃描點目前的位置(v_cnt, h_cnt)。

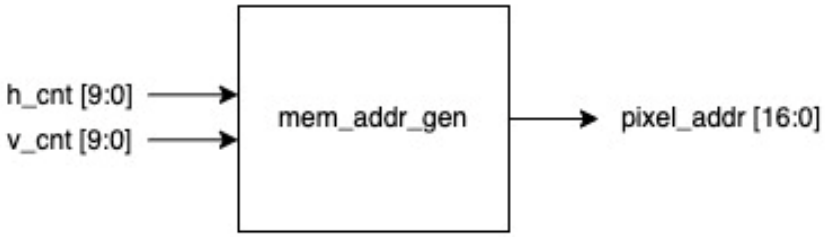
我們透過兩個 counter 產生螢幕掃描的水平(hsync)與垂直(vsync)訊號。而 hsync 和 vsync 的輸出值預設為 1，只有當 counter 在 sync pulse 的範圍(範圍如下頁表一所示)中，vsync 和 hsync 的值才會 = 0。

Parameter	Ver. Sync		Hor. Sync	
	Lines	Time(ms)	Pixels	Time(μs)
Visible area	480	15.3	640	25
Front porch	10	0.3	16	0.64
Sync pulse	2	0.064	96	3.8
Back porch	33	1.05	48	1.9
Whole line	525	16.7	800	32

表一、VGA 規範表

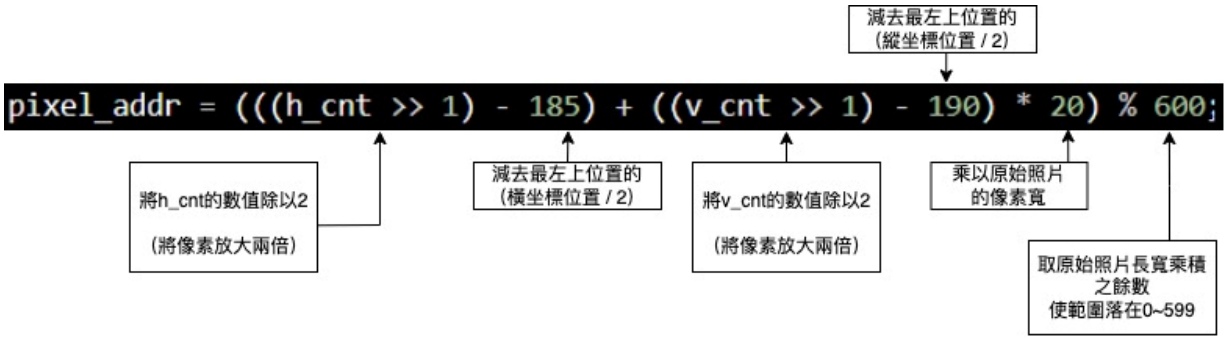
h_cnt 和 v_cnt 的功能則是：當 counter 的值位於 visible area 內(0 ~ 639 / 0 ~ 479)時，兩者才會輸出相對應的行列數。另外，valid 則是用來確認目前的掃描位置是否位於 visible area 內，只有當掃描點在裡面時，數值才 = 1。

二、mem_addr_gen：

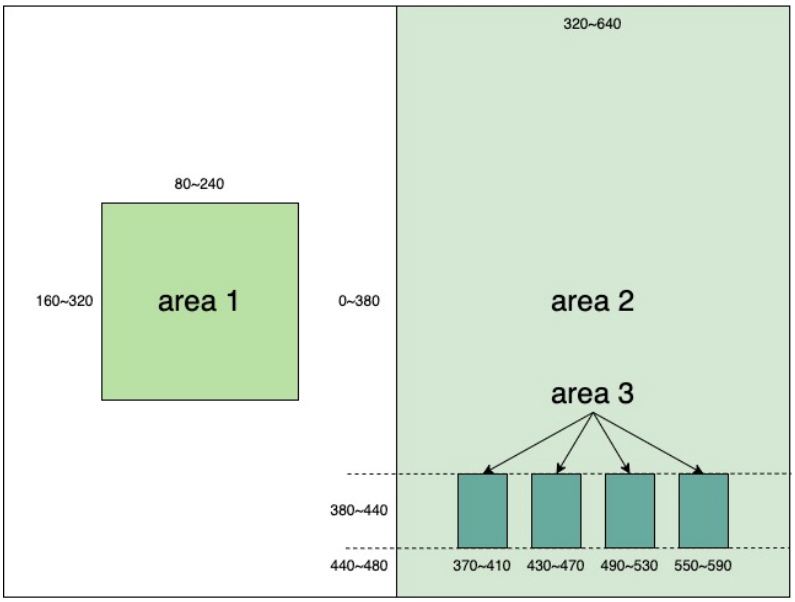


此 module 用來定位照片輸出時，掃瞄照片像素點的位置。

輸出值 pixel_addr (即指定掃描相片像素位置)的代碼和說明如下：



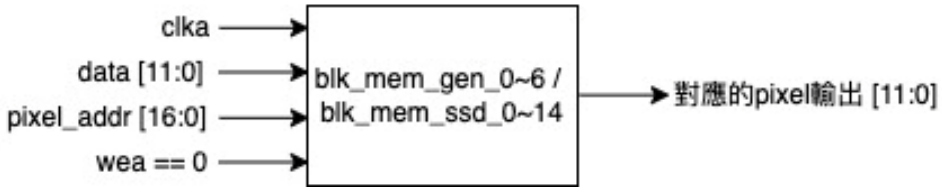
此外，在此 module 中，我們透過 if-else 將整個畫面切割成諸多子畫面，以易於 debug 跟快速修改參數。切割的範圍如下頁圖四所示：



圖四、畫面分割示意圖一

其中，area 1 用於顯示洗衣機動畫、area 2 用於顯示洗衣機 App 的背景、area 3 則用來顯示使用者想設定的參數(水量、溫度、時間等)。實際上，因為繪圖輸出時造成的微小誤差，所以實際範圍會略為加減幾個像素點的位置。

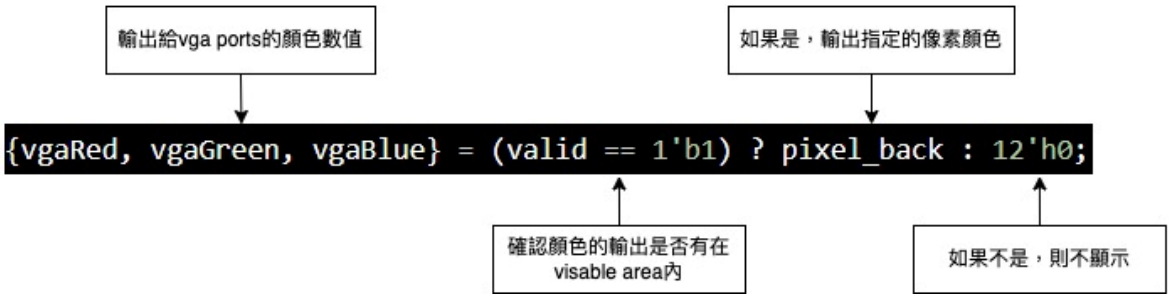
三、block memories



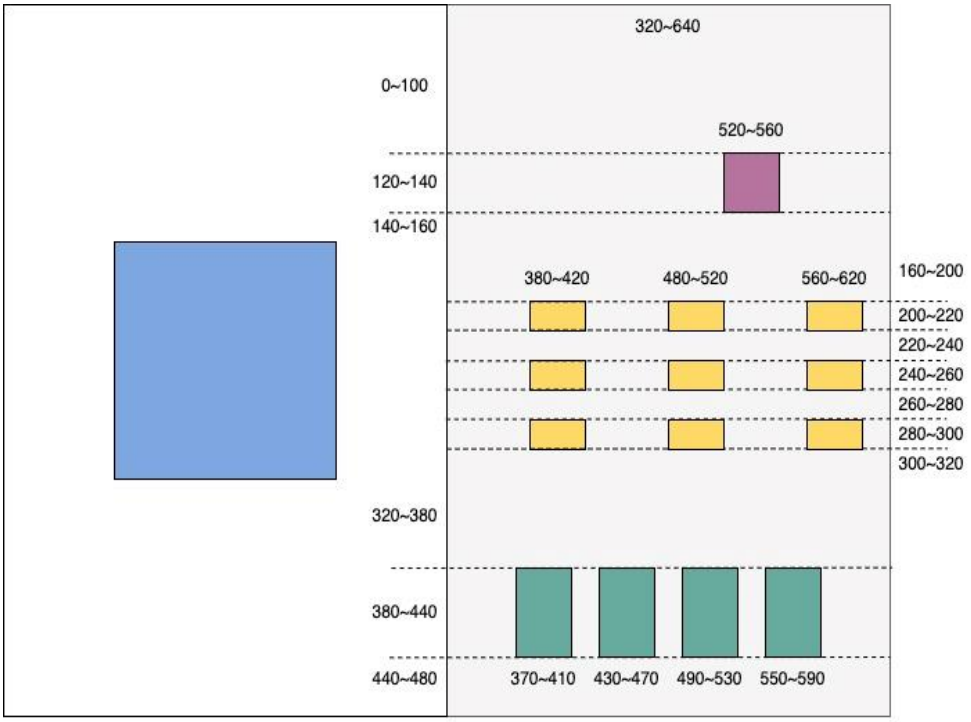
我們使用 blk_mem_gen_0~6 / blk_mem_ssd_0~14，儲存我們整個 final project 所用到的相片檔，並透過 pixel_addr 呼叫圖片像素對應的位置，將顏色的輸出值(Ex：pixel_ssd_0, pixel_back 等)回傳給我們。

四、顏色輸出（整合在 main.v 中）：

我們透過以下代碼來實現顯示指定顏色的功能：



跟我們在 mem_addr_gen 用到的概念類似，我們先將畫面透過 if-else 切割成諸多小部分(如圖四) (不同色塊代表不同的 area)：



圖五、畫面分割示意圖二

其中，藍色區域為現實生活中洗衣機的狀態、紫色區域為 App 中顯示洗衣機「目前狀態」(洗衣或烘衣)的位置、黃色區域為顯示洗衣機「目前正在運作」的模式、溫度、水量、綠色區域則顯示使用者在 app 上「預排」的數值。另外，白色區域單純設定背景為白色、灰色區域則是匯入我們 App 背景的顏色數值。實際上，因為繪圖輸出時造成的微小誤差，所以實際範圍會略為加減幾個像素點的位置。

此外，因為顯示的圖片、顏色需要跟其他 module 內的狀態相對應，所以在 if-else 中，我們另外使用 case 來指定：當接收到的數值為何時，App 或洗衣機的狀態該顯示哪張照片的色塊。除了用來指定該顯示哪個色塊外，case 還可以幫助我們實現動畫的效果（透過 1hz clock 控制），讓洗衣機的狀態可以更活潑生動。

捌、過程中遇到的困難

一開始我們構想是將所有照片都以 320*240 製作，這樣在寫 code 的時候就不需要一直對掃描位置跟圖片位置之間的關係。但當我們把好幾張 320*240 的照片匯入 RAM 時，在 synthesis 就會直接報錯。查了一下 Error message 後，發現可能是我們 memory 總共需要的 Depth 太多，所以 Vivado 直接不給跑 Synthesis。後來我們只好去測試 FPGA 版能接受的總 Depth 最大為多少（大概為 13、14 萬內），並將圖片的部分區改用色塊顯示，減少需要用到的 memory depth。

另外，在編寫 VGA 的顏色輸出時，有一陣子顯示出來的顏色都很奇怪，最後才發現是自己少寫一個 else 跳出去。由於寫 VGA 需要用到大量的 if-else，因此也是花不少時間一個個將 code 給註解掉，才發現這個問題。

在最終的 Debug 階段，我們遇到了由於意外的數值插隊進緩衝時間的倒數，進而產生的無法切換 state 問題，我們很快就能料想到是在倒數的部分出了差錯，但卻在找實際錯在哪個細節上找了許久，最後才發現是在 if-else 迴圈中少寫了最終的 else。同上，if-else、default 等問題常是我們專題出問題的地方，而這樣漏寫 else 的壞習慣，若不是這次專題的撰寫，我們恐怕不會有那麼深刻的體悟，也感謝這次專題的機會，讓我們上到了寶貴的一課。

玖、心得與感想

朱豐蔚：

在製作此次專題的過程中，不像大多數人選擇製作遊戲，我們選擇了能夠完整呈現我們這學期所學的題目，結合鍵盤、speaker、VGA 去製作一台功能完整的洗烘衣機。我認為完整性會是我們組最大的優勢，不管是從一開始的發想，到實際對現有洗衣機的詳細考察，還是到最終的 Debug，我們幾乎考量到所有問題與使用者體驗上的不足，此點也可以從上述我們對專題的細節說明了解到。然而，由於我是負責洗烘衣機的主架構，在重複製作、燒板的過程中，在還沒有加入 VGA 之前，其實很難體會到真的做出一台洗烘衣機的真實感。很感謝我的組員在 VGA 上的製作真的花了很大的心力，能夠在我們最後合併專題時，在一看到洗衣機正常運作、並呈現動畫的剎那，能夠感受到滿滿的成就感。也再次謝謝教授與各位助教這一學期的辛苦指導，很高興能修這門課。

徐瑞澤：

這次我主要負責 VGA 的部分，因為 VGA 是全新的部分，個人認為雖然比起音訊的 Lab，少了需要一直對 clock 的部分，但因為這次是牽涉到二維平面上，掃描點的運動，因此理解起來比音訊的部分還要花時間。不過看著什麼都顯示不出來、顏色錯誤、像素點跑掉，到能夠完整運行洗衣機的功能，心裡的成就感還是多了不少。另外也很感謝我的隊友，讓我能夠沒有後顧之憂的專心調整 VGA，不然光要調整那個像素點真的很燒眼睛。