

# 國立交通大學

工學院聲音與音樂創意科技碩士學位學程

碩士論文

拉伸介面合成樂器設計與實作

Design and Implement of Elastic Interface Synthesizer



研究生：劉哲瑋

指導教授：曾毓忠 教授

中華民國一百零二年四月

拉伸介面合成樂器設計與實作

Design and Implement of Elastic Interface Synthesizer

研究生：劉哲瑋

Student : Che-Wei Liu

指導教授：曾毓忠

Advisor : Yu-Chung Tseng

國立交通大學

工學院聲音與音樂創意科技碩士學位學程

碩士論文

A Thesis

Submitted to Master Program of Sound and Music Innovative Technologies

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

College of Engineering

April 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年四月

# 拉伸介面合成樂器設計與實作

學生：劉哲瑋

指導教授：曾毓忠

國立交通大學 聲音與音樂創意科技碩士學位學程

## 摘 要

本研究為創意發展的獨特性合成樂器，使用 Arduino 經由 Direct Digital Synthesis (簡稱 DDS, 直接數位合成法) 實作新介面電子合成樂器。主要系統架構中的控制在於 Voltage Controlled Oscillator (簡稱 VCO, 電壓控制震盪器) 技術，連續的電壓週期頻率，做為電子合成樂器發聲的主要控制部分。VCO 能即時產生六種波形，基本的波形除了正弦波 (Sine wave) 外還有方波 (Square wave)、鋸齒波 (Sawtooth wave)、三角波 (Triangle wave)、反鋸齒波 (Ramp wave) 及噪音 (Noise)。使用自創式的彈力拉伸為主要的操控介面，主要操控頻率與調變參數；因彈性拉伸材質的特性，可做拉伸、扭曲的動作，並配合 VCO 的技術控制高低頻率的效果。此外可搭配音量踏板，當持續加壓可使得音色有強弱變化。透過 MIDI 或電壓控制的 I/O 可連結其他的類比及數位合成樂器，更豐富了合成樂器的奇特音色。製作過程中以 DIY (Do It Yourself) 的方式進行，降低電子合成樂器的製作成本，融合各種電子合成樂器的特點，發展獨特的新介面電子合成樂器。

論文架構第一章節為研究動機及目的，第二章為文獻探討，蒐集與探討從古至今的電子樂器，並吸收各個電子樂器的優點。第三章為本研究系統之架構。第四章為實作系統之方法。第五章為總結，呈現成果並且提出未來發展及改進目標。

關鍵字：直接數位合成法、電子合成樂器、電壓控制震盪器、橡膠彈力拉伸、新介面合成樂器

# Design and Implement of Elastic Interface Synthesizer

student : Che-Wei Liu

Advisors : Yu-Chung Tseng

Submitted to Master Program of Sound and Music Innovative Technologies  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

In the research, Arduino and the Direct Digital Synthesis (DDS) are used to create the elastic interface synthesizer. Elastic rubber, the main control interface, are employed for the framework of VCO (Voltage Controlled Oscillator) system to control the frequency and modulation index via the characteristics of being stretched of the rubber. The synthesizer can produce six kinds of waveform (square wave, sawtooth wave, triangle wave, reversed sawtooth wave, sine wave and noise) in real time, it also provides various functions via patching. You can synthesize the timbre by Frequency Modulation, Delay Function and Logic Function. The voltage and MIDI messages can be used to link with other commercially available analog synthesizers and digital musical instruments. The goal of the research is to produce a low cost synthesizer, to develop an instinct-controlled, unique new interface instrument.

The thesis contents:

Chapter 1: Research motivation and the purpose.

Chapter 2: The literature of electronic musical instruments.

Chapter 3: System architecture.

Chapter 4: Methods of implementation.

Chapter 5: Summary and future work.

Keywords: Direct Digital Synthesis, Voltage-Controlled Oscillator, Elastic Rubber, New interface synthesizer.

## 誌 謝

三年的時間，我在交大修習聲音與音樂創意科技碩士學位學程，過程歷經各式各樣的考驗，這是我的學習生涯中最豐富的知識之旅，這三年中可說是獲益良多。首先我要感謝我的父母，他們永遠的支持著我，讓我無後顧之憂的朝著音樂科技領域學習，不論是音樂上的學習、科技領域相關的摸索或是人格特質的培養，皆幫助我甚多；就讀海洋大學的弟弟，常常也透過討論給予我眾多意見與想法。感謝我的女友，在我忙碌於畢業論文時陪伴、鼓勵及支持我，伴我生活每一刻點滴。

再來，我要感謝我的指導教授曾毓忠博士，不吝傳授電腦音樂及音樂科技的領域的相關知識；帶領我嘗試作品創作，在他的指導下，我們的作品曾入選國際研討會 NIME2011 及 ICMC2012，開啟我對於科技藝術的視野。

感謝我的口試委員，鄭泗東教授、梁容輝教授以及王福瑞教授，於口試時給我的眾多指導與建議，讓我能更完整我的論文、增進我的知識；以及曾經幫助過及指導我的教授們：陳信宏教授、黃志方教授、冀泰石教授、饒瑞舜教授、李唐君教授以及我大學的指導老師葉正聖教授…等，非常感謝你們在我求學過程中的幫助。

聲音與音樂創意科技碩士學位學程是一個大家庭，大家相處和樂融融；感謝所辦何小姐的照顧，這三年來於學校的大小事，不論是學習上或是生活上皆有妳的幫忙才能完全。還有，感謝學程、實驗室與音樂所的夥伴們，有你們的陪伴碩士生活不孤單，學習上也有你們不辭辛勞的幫忙。還有，感謝致偉學長，學習上的幫忙；以及志翰學長，感謝你帶領我進入類比合成器的領域，所有合成器的相關知識皆受到你的啟發。

感謝 OpenLab.Taipei 的鴻旗以及曾經幫助過我的前輩們；還有，新竹教育大學藝術與設計系的潘力璋，木作技術有如鬼斧神工，讓我的作品除了科技外多了一份美感。感謝 DIY 網站 Music From Outer Space 給予我們多想法及知識。最後我要感謝曾經幫助我的廠商們，俐元科技、有德科技與科亞富科技、鋁丰金屬企業、鉅偉壓克力、翌峰壓克力、貿澤電子…等，感謝你們的幫忙及材料贊助，讓我能順利完成作品。要感謝的人真的太多了，或許沒辦法一一道謝，但我的求學過程真的高興有你們，非常感謝！

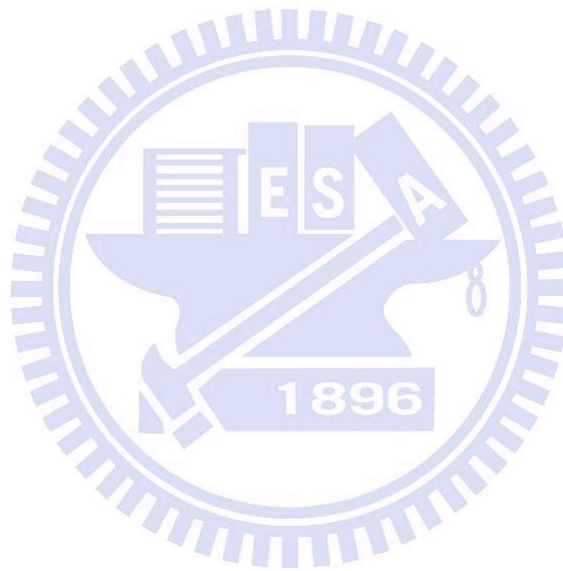
# 目 錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
一、緒 論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目標.....	1
二、文獻探討.....	2
2.1 早期電子樂器（Early electronic musical instruments）.....	2
2.1.1 電傳樂器（Telharmonium）.....	2
2.1.2 特雷門（Theremin）.....	2
2.1.3 馬特諾（Ondes Martenot）.....	3
2.2 類比合成器（Analog Synthesizer）.....	4
2.2.1 模組化合成器（Modular synthesizers）.....	4
2.2.2 集成式合成器（Integrated synthesizers）.....	5
2.2.3 多音合成器（Polyphonic synthesizers）.....	5
2.3 數位樂器（Digital Musical Instrument）.....	6
2.3.1 數位合成器（Digital Synthesizer）.....	6
2.3.2 MIDI 技術（Musical Instrument Digital Interface）.....	7
2.4 新介面樂器（New Interface Musical Instrument）.....	7
2.4.1 The Hydraulophone.....	8
2.4.2 Seaboard.....	8
2.4.3 Sound Low Fun.....	9
2.5 小結.....	9
三、系統架構.....	10
3.1 系統設計.....	10
3.1.1 Arduino.....	10
3.1.2 電路設計.....	11
3.1.3 系統功能.....	11
3.2 介面與操控設計.....	12
3.2.1 功能面板設計.....	12
3.2.2 串接（Patch）設計.....	13
3.2.3 外型設計.....	14
3.2.4 新操控介面設計.....	15

四、系統設計與實作 .....	17
4.1 電壓控制震盪器 (Voltage Controlled Oscillator) .....	17
4.1.1 直接數位合成法 (Direct Digital Synthesis) .....	17
4.1.2 數位類比轉換器 (Digital to Analog Converter) .....	18
4.1.3 記數器與中斷 (Timer and Interrupt) .....	19
4.1.4 頻率調變合成法 (Frequency Modulation Synthesis) .....	21
4.2 波型控制 (Waveform Shaping) .....	22
4.2.1 方波 (Square wave) .....	23
4.2.2 鋸齒波 (Sawtooth wave) .....	24
4.2.3 三角波 (Triangle wave) .....	25
4.2.4 反鋸齒波 (Reversed Sawtooth wave) .....	26
4.3 低頻震盪器 (Low Frequency Oscillator) .....	29
4.4 邏輯閘功能 (Logic Function) .....	30
4.4.1 AND mode .....	30
4.4.2 OR mode .....	30
4.4.3 XOR mode .....	31
4.4.4 NAND mode .....	31
4.4.5 NOR mode .....	31
4.4.6 XNOR mode .....	32
4.4.7 MOD mode .....	32
4.4.8 NMOD mode .....	32
4.5 延遲功能 (Delay Function) .....	33
4.6 混音器功能 (Audio Mixer) .....	34
4.7 MIDI 介面 (MIDI Interface) .....	34
4.7.1 MIDI IN .....	36
4.7.2 MIDI OUT .....	37
4.8 音量踏板 (Volume Pedal) .....	38
4.9 電源系統 (Power System) .....	38
五、結論與未來展望 .....	39
5.1 結論 .....	39
5.2 未來展望 .....	40
5.2.1 增加聲音的品質 .....	40
5.2.2 降低成品與資源使用 .....	40
5.2.3 加入其他控制功能 .....	40
5.2.4 增加震盪器的數量 .....	40
5.2.5 橡膠彈力操控介面的伸長量 .....	40
5.2.6 增加 1V/OCT 功能 .....	41
參考文獻 .....	42

## 表目錄

表格 1：AND MODE 範例真值表 .....	30
表格 2：OR MODE 範例真值表 .....	31
表格 3：XOR MODE 範例真值表 .....	31
表格 4：NAND MODE 範例真值表 .....	31
表格 5：NOR MODE 範例真值表 .....	31
表格 6：NOR MODE 範例真值表 .....	32
表格 7：MOD MODE 範例真值表 .....	32
表格 8：NMOD MODE 範例真值表 .....	32





## 圖目錄

圖表 1：THEREMIN (特雷門)，由 CLARA ROCKMORE 演奏.....	3
圖表 2：ONDES MARTENOT (馬特諾琴) .....	4
圖表 3：DOEPFER A100 ANALOG MODULAR SYSTEM.....	5
圖表 4：INTEGRATED SYNTHESIZER，MINIMOOG .....	5
圖表 5：POLYPHONIC SYNTHESIZERS，OBERHEIM FOUR VOICE.....	6
圖表 6：DIGITAL SYNTHESIZER，YAMAHA DX-7 .....	6
圖表 7：THE HYDRAULOPHONE .....	8
圖表 8：SEABOARD 的演奏方式.....	8
圖表 9：SOUND LOW FUN，VERSION2.....	9
圖表 10：ARDUINO UNO 正面與背面.....	10
圖表 11：ARDUINO IDE.....	10
圖表 12：EAGLE 的使用介面.....	11
圖表 13：主要的操控面板設計 .....	12
圖表 14：MIDI 背板設計 .....	13
圖表 15：功能背板設計 .....	13
圖表 16：BANANA JACK (左上)、BANANA PLUG (右上)、6.3 TRS JACK (左下)、6.3 TRS PLUG (右下) .....	14
圖表 17：系統主體設計圖 .....	14
圖表 18：系統外殼.....	15
圖表 19：音量踏板外型設計 .....	15
圖表 20：音量踏板外殼.....	15
圖表 21：導電橡膠線.....	16
圖表 22：DDS 示意圖 .....	18
圖表 23：R-2R 電路示意圖.....	18
圖表 24：電壓控制震盪器 LAYOUT 圖.....	19
圖表 25：TIME INTERRUPT SETUP .....	20
圖表 26：TIME INTERRUPT ISR 函數.....	21
圖表 27：FM 合成法流程圖 .....	21
圖表 28：FM 波形示意圖 .....	22
圖表 29：FM 合成法 CODE .....	22
圖表 30：示波器測量：方波 .....	23
圖表 31：方波 CODE.....	23
圖表 32：頻譜分析：方波 .....	23
圖表 33：示波器測量：鋸齒波 .....	24
圖表 34：鋸齒波 CODE.....	24
圖表 35：頻譜分析：鋸齒波 .....	24

圖表 36：示波器測量：三角波 .....	25
圖表 37：三角波 CODE .....	25
圖表 38 頻譜分析：三角波 .....	25
圖表 39：示波器測量：反鋸齒波 .....	26
圖表 40：反鋸齒波 CODE .....	26
圖表 41：頻譜分析：反鋸齒波 .....	26
圖表 42：示波器測量：正弦波 .....	27
圖表 43：正弦波 CODE .....	27
圖表 44：頻譜分析：正弦波 .....	27
圖表 45 示波器測量：亂數波形 .....	28
圖表 46：亂數波形 CODE .....	28
圖表 47：頻譜分析：亂數波形 .....	28
圖表 48：低頻震盪器原理圖 .....	29
圖表 49：低頻震盪器 LAYOUT 圖 .....	29
圖表 50：邏輯開 CODE，以 AND MODE 為範例 .....	30
圖表 51：DELAY FUNCTION 原理圖 .....	33
圖表 52：DELAY FUNCTION LAYOUT 圖 .....	33
圖表 53：AUDIO MIXER 原理圖 .....	34
圖表 54：AUDIO MIXER LAYOUT 圖 .....	34
圖表 55：MIDI 訊號結構圖 .....	35
圖表 56：頻率對應 MIDI NOTE .....	35
圖表 57：MIDI IN CODE .....	36
圖表 58：MIDI IN 原理圖 .....	36
圖表 59：MIDI IN 線路圖 .....	36
圖表 60：MIDI OUT CODE .....	37
圖表 61：MIDI OUT 原理圖 .....	37
圖表 62：MIDI OUT 線路圖 .....	37
圖表 63：自製力度感應音量踏板示意圖 .....	38
圖表 64：電源系統 LAYOUT 圖 .....	38
圖表 65：拉伸介面合成樂器完成品，正面（左）背面（右） .....	39

# 一、緒論

## 1.1 研究動機

人們為了追隨樂器的變化，不斷尋求更特別、豐富、有趣的樂器操控方式，從敲擊、吹奏甚至擦弦…等，這些介面操控方式的演進隨著科技與時俱進，從古典樂器到電子樂器的發展可謂日新月異。新介面樂器的操作方法越來越直覺，這也是新介面樂器在音樂科技藝術上一直不斷演化的原因。在本研究創意發展中的電子合成樂器，使用 Open Source 的 Arduino 透過 DIY 的方式，可創造出屬於自己所想要的電子合成樂器。因此集合許多電子樂器的優點，使用特殊操控介面，透過 Effect 功能加強聲音的特質，能夠自由搭配不同功能的選擇以及 Polyphonic 震盪器的設計。本研究採用具有特殊材質及特性的橡膠彈力拉伸操控介面來取代傳統的操作介面；拉伸的介面設計，讓樂器的使用者更簡易、更直覺、更自由的表現樂曲的張力。此樂器也提供多種效果及自由配置聲響的設計，讓合成音色更加的豐富及獨特性。

## 1.2 研究目標

本研究目標為實作低成本高效能的新介面電子合成樂器，透過自創式彈力拉伸材質改變頻率音高及調變機制，能讓使用者體驗不同的操作介面。由於震盪器為電子合成樂器當中不可或缺的主角，在製程方向著重使用電子合成樂器的 Oscillator，透過各種 Mode 及 Function，新加入兩種 Function 來創造更特殊的音色；演奏上也因操作介面本身的彈力特質，讓聲音產生更特殊的變化；讓合成音色加入更多的情感元素，進而豐富了新介面電子樂器的獨特性。預期達到的目標：

- (1) 兩個 Oscillators。
- (2) 豐富的音色及效果選擇。
- (3) 能隨使用者自由鏈結 (Patching) 其想要搭配的功能。
- (4) 橡膠彈力拉伸介面，讓演奏的方式更直覺、更自由發揮。
- (5) 能連結各種數位或類比的樂器。
- (6) 降低電子合成樂器的使用門檻與價格。

## 二、文獻探討

### 2.1 早期電子樂器 (Early electronic musical instruments)

#### 2.1.1 電傳樂器 (Telharmonium)

電傳樂器為早期的鍵盤電子樂器，稱 Telharmonium 或 Dynamaphone、Teleharmonium，美國發明家 Thaddeus Cahill 於 1897 年發明並申請專利，以 tonewheel（註：tonewheel 是以 AC 馬達搭配變速箱，而變速箱內有不同齒數的齒輪，而這些齒輪透過旋轉可以產生一定的頻率音高，再透過拾音器放大輸出。）的方式透過加法合成產生聲音。1901 年，Thaddeus Cahill 製作了第一個版本，重達七公噸，構造非常簡單，但是為日後發展的主要想法。1906 年，新的二代 Telharmonium 誕生(Thaddeus Cahill 自稱 Dynamaphone)，長 60 英尺、重達 200 公噸並且超過 2000 個電動開關。二代 Telharmonium 精挑細選 145 個齒輪的變速箱，比前一版有著更精準與細微的調校，一個八度可以產生 36 個頻率音高，頻率範圍約在 40 至 4000 赫茲。同年，Telharmonium 於紐約展出並且廣受民眾與音樂家的歡迎。第三代 Telharmonium 則於 1901 年發表，約有兩百個對 Telharmonium 有興趣的人來參加。雖然沒有發現 Telharmonium 的錄音，但是 Thaddeus Cahill 所研發的技術 tonewheel 仍存在。很多 Telharmonium 的概念也放入後來發明的 Hammond Organ，說明了電路放大技術應用於電子樂器的重要性。

#### 2.1.2 特雷門 (Theremin)

Theremin 早期的電子樂器之一，運用天線來達到距離感應，成為第一個非接觸式電子樂器。Theremin 由俄國物理學家 Leon Theremin 發明，於 1919 年問世。Theremin 有兩根天線，兩根天線呈現垂直突出與環狀平行。垂直的天線用來控制頻率音高，越靠近垂直的天線所產生的頻率音高越高；環狀平行的天線則用來控制頻率振幅，當完全覆蓋於環狀平行的天線則完全靜音。1928 年 Leon Theremin 在美國申請專利，隨即授權給 RCA 公司生產。Theremin 在 20 至 30 年代造成很大的轟動，許多音樂家也開始使用 Theremin 於音樂創作和演出，其中 Clara Rockmore 為知名

Theremin 使用者之一。Moog 的創辦人 Robert Moog (Bob Moog) 於 1960 年後開始販售 Theremin 的組裝零件，隨即成為熱門的商品。



圖表 1：THEREMIN (特雷門)，由 CLARA ROCKMORE 演奏

資料來源：

<http://4.bp.blogspot.com/-EYzWYLMclYI/T9CxE8oNwGI/AAAAAAAAADoo/XKyLkEWzfII/s1600/clara+rockmore4.png>

### 2.1.3 馬特諾 (Ondes Martenot)

法國發明家 Maurice Martenot 於 1928 年發明了 Ondes Martenot。Ondes Martenot 與 Theremin 很相似，皆由電子震盪器產生聲音。Ondes Martenot 擁有能穩定控制音高，六個八度的傳統鍵盤。同時也擁有能透過金屬指環水平滑動移動的介面，透過水平移動可以調整頻率音高，可以簡易做到滑音 (glissandi)；側向些微移動也可以做到顫音 (vibrato) 將近一個半音。以 1975 的 Ondes Martenot 為例，琴身的左手邊有個控制盒，有個按鍵能控制演奏的力度 (velocity) 和觸發，當按的越深聲音越響，當然節奏也由此控制。控制項也包括音色功能 (timbres)，有四種波形可以選擇：弦波 (sin wave)、方波 (square wave)、三角波 (triangle wave)、脈衝波 (pulse wave)，也能選擇調整諧波數量 (harmonics) 及加入噪訊 (noise) 等。最後 Ondes Martenot 擁有四種揚聲器可以選擇，分別為：

(1) 傳統揚聲器。(2) 在音箱內加入彈簧，以產生共鳴，製造空間感。(3) 將原本共鳴用的振膜改成金屬的鑼，產生豐富諧波，產生金屬感。(4) 類似豎琴的形態

裝上金屬絃線，使之產生共振。透過選擇一個或多個不同的揚聲器將琴所產生的聲音輸出，也因此使得音色的變化非常豐富。



圖表 2：ONDES MARTENOT（馬特諾琴）

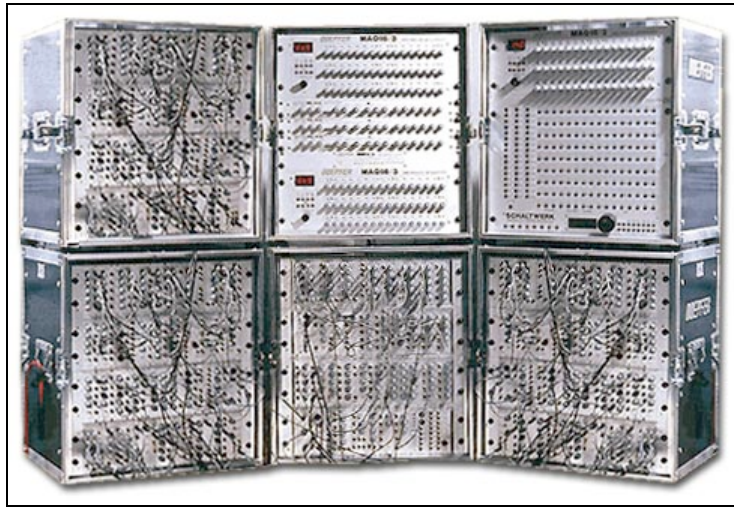
資料來源：[http://www.philharmonia.co.uk/messiaen/images/photos/ondes\\_martenot.jpg](http://www.philharmonia.co.uk/messiaen/images/photos/ondes_martenot.jpg)

## 2.2 類比合成器（Analog Synthesizer）

### 2.2.1 模組化合成器（Modular synthesizers）

講到 Modular synthesizers，就會想到 1953 年美國 RCA 研究室，Harry Olsen 和 Herbert Belar 所發明的 Mark I 以及後來推出的 Mark II，當時的合成器已經由真空管來設計震盪器（Mark I 有 12 顆、Mark II 有 24 顆）加上當時複雜的波型變化器、濾波器、除法器、封包產生器、調變控制項等。使 Mark II 不僅重達 200 公噸，體積甚至大到必須佔據整個錄音室。1963 年，由 Don Buchla 所創立的知名大廠 Buchla，推出了商業模組化的合成器 100 series。同一年，Robert Moog 也與 Herbert Deutsch 相識，他們便一起討論合作開發新樂器的想法。約一年後，也就是 1964 年，Robert Moog 與 Herbert Deutsch 共同合作開發 Moog Analog Modular Synthesizer。這次他們運用體積較為小的零件來開發進而縮小了體積，也灌入了新技術。1965 年，Robert Moog 於 Audio Engineering Society（AES）期刊上發表 Voltage-Controlled Electronic Music Modules [1]。他的新技術 Voltage Controlled 是透過電壓變化控制 oscillator、

amplifier 和 filter，這項的技術可以說幫類比合成器強化了控制項目，此技術也延用至今。



圖表 3：Doepfer A100 Analog Modular System

資料來源：<http://www.vintagesynth.com/misc/a100big.jpg>

### 2.2.2 集成式合成器（Integrated synthesizers）

1970 年，Moog 公司推出了全新的鍵盤類比合成器 Minimoog，捨棄了模組電路的配對自由化，選擇開關切換來簡化電路，不僅縮小體積讓用戶好攜帶也提昇了操作上的便利。Minimoog 也帶領了日後鍵盤合成器的兩項發展；電路開發開始使用微型固態零件並且將電路的流程設計規範為 VCO→VCF→VCA。Moog 的特殊聲音被大家廣稱為 Fat sound，也開始被廣泛使用。



圖表 4：INTEGRATED SYNTHESIZER，MINIMOOG

資料來源：[http://www.vintagesynth.com/moog/moog\\_minimoogd\\_lg.jpg](http://www.vintagesynth.com/moog/moog_minimoogd_lg.jpg)

### 2.2.3 多音合成器（Polyphonic synthesizers）

早期電子樂器多半是單音合成器（Monophonic）同時只能觸發一個音或聲響，而複

音合成器意思為能同時觸發兩個以上的音或聲響，也就是和弦（Chord）的用法也開始在合成器上應用了。1976 年包括 YAMAHA CS80、Oberheim Four-Voice…等。雖然已經可以達到複音，但是仍然是昂貴、複雜並且高重量。而當時較為實用的複音合成器則是 Sequential Circuits 的 Prophet-5，他運用了數位的微控制器和記憶體將所有的旋鈕參數儲存下來，增加了使用樂器的便利性。數位處理運用在類比合成器的方式，在此時也漸漸萌芽發展。



圖表 5：POLYPHONIC SYNTHESIZERS， OBERHEIM FOUR VOICE

資料來源：[http://www.vintagesynth.com/oberheim/oberheim\\_4voice\\_lg.jpg](http://www.vintagesynth.com/oberheim/oberheim_4voice_lg.jpg)

## 2.3 數位樂器（Digital Musical Instrument）

### 2.3.1 數位合成器（Digital Synthesizer）

1983 年，YAMAHA 推出了第一款獨立的數位合成器 DX-7，DX-7 主要使用 FM 合成法(Frequency Modulation Synthesis)。而 FM 合成法是 John Chowning 在 1967 至 1968 年期間所開發的，接著 1975 年時把專利授權給 YAMAHA 使用，之後 YAMAHA 便成功的以數位合成器與 FM 合成法在數位樂器中，佔有一席之地。



圖表 6：DIGITAL SYNTHESIZER， YAMAHA DX-7

資料來源：[http://www.vintagesynth.com/yamaha/yamaha\\_dx7\\_angle2\\_lg.jpg](http://www.vintagesynth.com/yamaha/yamaha_dx7_angle2_lg.jpg)



### 2.3.2 MIDI 技術 (Musical Instrument Digital Interface)

1908 年，一群音樂家與樂器製造商一同討論，希望能討論出一個方法，讓樂器可以與微電腦做連結，他們希望透過數位科技建立一個標準或指令。而 Dave Smith 於 1981 年提出了 MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 這個標準，也在兩年後，1983 年 MIDI Specification 1.0，這個協定順利完成。MIDI 的發明，不僅大大提昇了工作的方便性，不論是滾輪移動的訊號、踏板的開關、按鍵的觸發或是同步所有設備…等，都變得瞭如指掌。而 MIDI 的發展不僅降低了使用儀器的門檻與成本，也因此有了標準規範。讓往後的樂器都跟著這個協定設計，成功的鏈結所有數位樂器，加速了數位音樂的發展。

### 2.4 新介面樂器 (New Interface Musical Instrument)

有別於傳統樂器的介面，新介面樂器主要以不同以往的使用者介面當做樂器的操控。早期的電子樂器很多都是全新的介面被發明出來的，像是 Theremin 的非接觸操控方法及 Martenot 的指環移動…等。由於現在科技日趨進步，發展與變化也較微多元化，因此新介面樂器也漸漸被接受與歡迎。有別於傳統樂器的使用方法，新介面樂器會以更有趣、更特殊、好操控、符合某種演奏需求或是降低學習音樂的門檻…等想法來設計。New Interfaces for Musical Expression (NIME) 始於 2001 年，起源於 ACM 的 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 裡的一個工作坊。至那次之後，開始舉辦 NIME，成立到現在已是第 13 屆。來自世界各地的音樂家或是研究人員，一同分享及討論有關新介面樂器、人機互動、電腦音樂…等科技與音樂藝術的作品或新技術。也因此帶動了新介面樂器的蓬勃發展。[2]

### 2.4.1 The Hydraulophone

2006 年，作者 Steve Mann、Ahmedullah Sharifi、Mike Hung、Russell Verbeeten 於 IEEE2006 發表。The Hydraulophone [3] 結合水與電子電路的設計，非常特殊的新介面樂器。介面上共有 88 個噴水孔，每個水孔代表不同的音階，水會不斷的持續流動。而每個水孔上皆有個觸覺控制器，當你按壓水孔阻擋水流時，則會觸發當下水孔的音階。

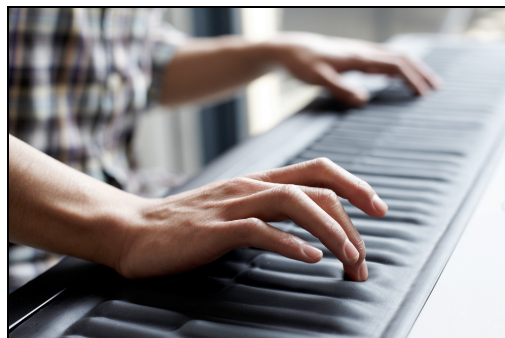


圖表 7：THE HYDRAULOPHONE

資料來源：[http://farm1.staticflickr.com/60/210154492\\_59486924b2\\_z.jpg?zz=1](http://farm1.staticflickr.com/60/210154492_59486924b2_z.jpg?zz=1)

### 2.4.2 Seaboard

2011 年 6 月，作者 Roland Lamb、Andrew N. Robertson 於 NIME2011 (New Interfaces for Musical Expression 2011) 發表。Seaboard [4] 為新介面樂器，造型仍與傳統鍵盤一樣有黑白鍵，但特殊的材質覆蓋，導致鍵盤按起來十分柔軟。特殊材質底下為 FSR (Force Sensing Resistor)，透過壓力傳導至感應器，感應器再由 Arduino 接收。接受的感應器陣列可以當做 Pitch，按壓的深度可以為 Volume。透過特殊材質的新介面，不僅能演奏多音，還可以輕易的透過手指力道來控制力度，讓演奏上更為華麗。



圖表 8：Seaboard 的演奏方式

資料來源：[http://image.midifan.com/data/attach/album/2013/0306/seaboard4\\_3\\_1362602959.jpg](http://image.midifan.com/data/attach/album/2013/0306/seaboard4_3_1362602959.jpg)

### 2.4.3 Sound Low Fun

2011 年 6 月，作者 Yu-Chung Tseng、Che-Wei Liu、Tzu-Heng Chi、Hui-Yu Wang 於 NIME2011（New Interfaces for Musical Expression 2011）發表。Sound Low Fun [5] 為大型新介面樂器，由 C60 的架構來設計，為 12 面五邊形與 30 面六邊形組成的足球體。介面為按壓方式，透過壓力感應器接收力度來產生聲音。由於足球形特性，每個六邊形會與三個五邊形相鄰，因此音樂的演奏架構上將 12 面五邊形分配為 12 個全半音階，另外 30 個六邊形則為三個相鄰五邊形的音階組成的和弦。因為大型球體的關係，演奏的動作會加大，和弦與單音的使用更為方便且快速。



圖表 9：Sound Low Fun，version2

## 2.5 小結

所以本研究集結上述各階段的各個樂器的優點，發展出本研究的特色：Polyphonic 震盪器、可以自由鏈結各個獨立項目的功能、FM 合成法、特殊的功能效果以及發展特殊的新控制介面。希望能發展出不同以往的新介面樂器。

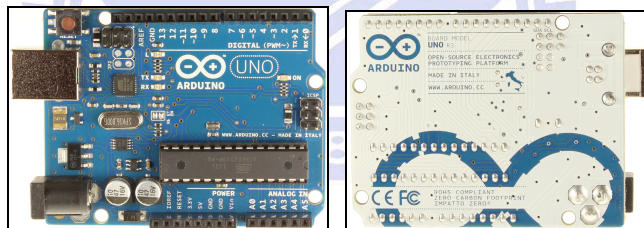
## 三、系統架構

### 3.1 系統設計

#### 3.1.1 Arduino

Arduino 為 Open source 的 I/O 板，使用單晶片微控制器來處理。Arduino 方便於使用電子電路，包括輸入及輸出訊號。透過外部電路，開關、按鈕及各式各樣的感應器…等，Arduino 可以簡易的控制其他的外部硬體，甚至是軟體；Max/MSP/Jitter、Flash、Processing…等，皆可以順利的與 Arduino 溝通。而 Arduino 自己也擁有輔助程式開發的整合開發環境（IDE，Integrated Development Environment），方便與所有不同類型的板子建立開發環境，並且編譯程式碼。

本研究以 Arduino 為主要核心架構，用來處理訊號及發送訊號；接收外部電子電路控制及外部電壓控制，完成電子合成樂器的各項功能。本研究使用兩塊 Arduino 於震盪器系統，另一塊於 Logic Function；共使用三塊，其餘功能以類比電路實行。



圖表 10：Arduino UNO 正面與背面

資料來源：

[http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno\\_R3\\_Front.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg)

[http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno\\_R3\\_Back.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Back.jpg)



圖表 11：Arduino IDE

資料來源：

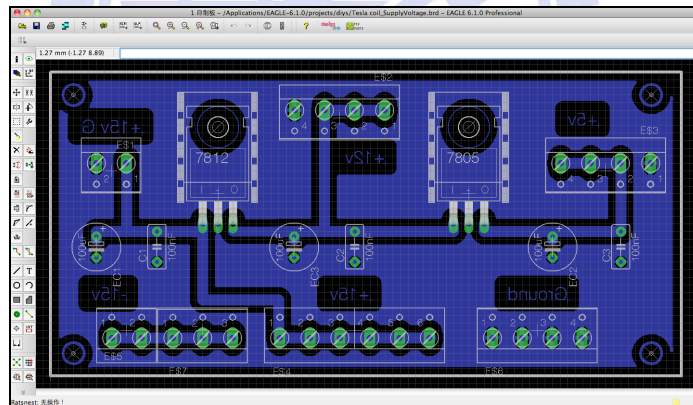
<http://arduino.cc/en/uploads/Guide/Arduino1Blink.png>

### 3.1.2 電路設計

本研究電路繪製使用 EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) 這套電路繪製軟體，功能包括繪製原理圖、PCB Layout 圖、自動佈線…等功能。本研究為了達到電路的一致完整性將各個功能結合於一電路中，以系統電源供應整體電路。電路設計過成為全手工製作，過程為：

- (1) 製作 Layout 圖，並且將電路印製於投影紙。
- (2) 曝光，將 Layout 圖與電路感光板重疊，透過曝光燈照射使線路留於電路感光板上。
- (3) 顯影，使用顯影劑洗去電路以外的部分。
- (4) 蝕刻，透過蝕刻劑將不需要的銅箔洗去，留下電路。

透過上述步驟為手工 DIY 電路板之方法，而降低成本與因應結構的需求為本研究之目的。



圖表 12：Eagle 的使用介面

### 3.1.3 系統功能

一般合成器的基本功能有：

- (1) Voltage Controlled Oscillator 電壓控制震盪器，產生各式各樣的 waveform、
- (2) Voltage Controlled Filter 電壓控制濾波器，Low Pass Filter 低通濾波器、High Pass Filter 高通濾波器、Band Pass filter 帶通濾波器…等、
- (3) Voltage Controlled Amplifier 電壓控制放大器，對訊號做 Amplitude Modulation、簡稱 AM、
- (4) Low Frequency

Oscillator 低頻震盪器，為電壓控制項、(5) Envelope Generator，在時間上產生電壓控制 ADSR，Attack、Decay、Sustain、Release。

本研究則以 Voltage Controlled Oscillator 電壓控制震盪器為主要發展，在加上簡易的 Low Frequency Oscillator 低頻震盪器作為控制項，並且加入 Effect 效果及 Audio Mixer。最後搭配操作介面，以完善的 VCO (Voltage Controlled Oscillator) 系統為架構。而本系統功能有：

- (1) 電壓控制震盪器、(2) 低頻震盪器、(3) 邏輯效果、(4) 延遲效果、(5) Audio Mixer、(6) 音量踏板、(7) MIDI IN/OUT、(8) 系統電源、(9) 新操控介面。

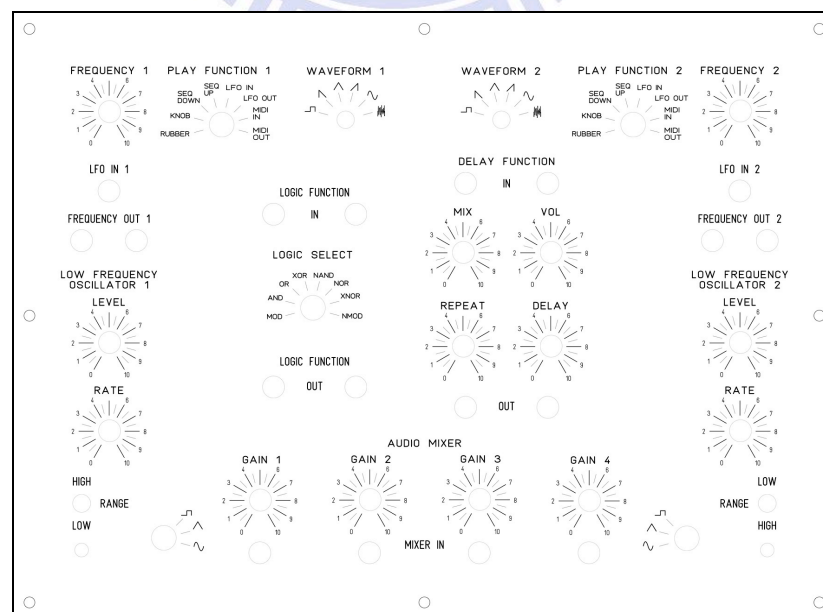
### 3.2 介面與操控設計

#### 3.2.1 功能面板設計

面板主要分成三個部分：

- (1) 主要操控面板

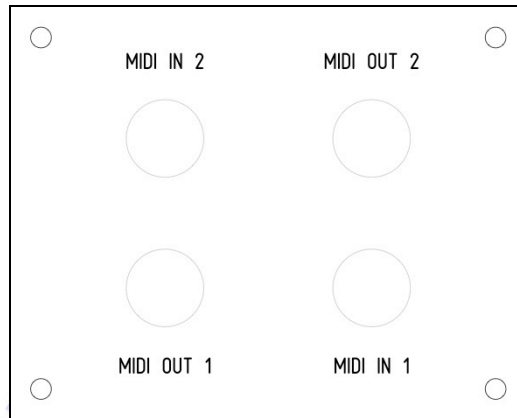
主要操控面板安裝於樂器正面，包含所有的控制項目，而為了使用者方便與直覺使用，將兩個震盪器、兩個低頻震盪器與新操控介面各分左右兩邊，以防使用者自由串接時互相干擾；中間則為延遲效果器與邏輯效果器，最後輸出將串接至最下排的 Mixer，此配置為了避免阻礙到新操控介面。



圖表 13：主要的操控面板設計

## (2) MIDI 背板

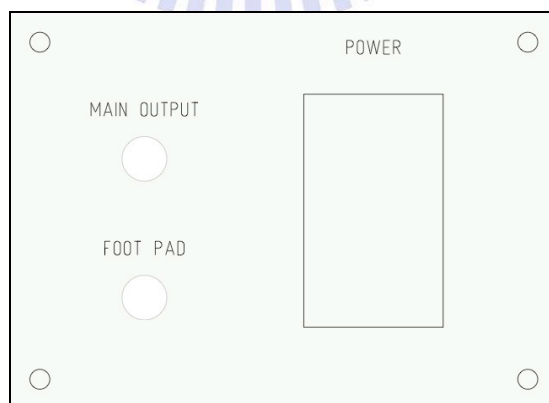
MIDI 背板，安裝於樂器後方。為 MIDI 介面輸入及輸出座，共兩組 IN/OUT 於背板上。將 MIDI 傳輸介面至於後方，方便串連其他擁有 MIDI 的電子樂器，並且降低與其他電子樂器串連時導線的干擾。



圖表 14：MIDI 背板設計

## (3) 功能背板

功能背板，同樣安裝於樂器後方。功能背板包含：電源系統、音量踏板輸入及整體訊號輸出。電源系統則擁有 110 伏特的插座及帶燈電源開關。

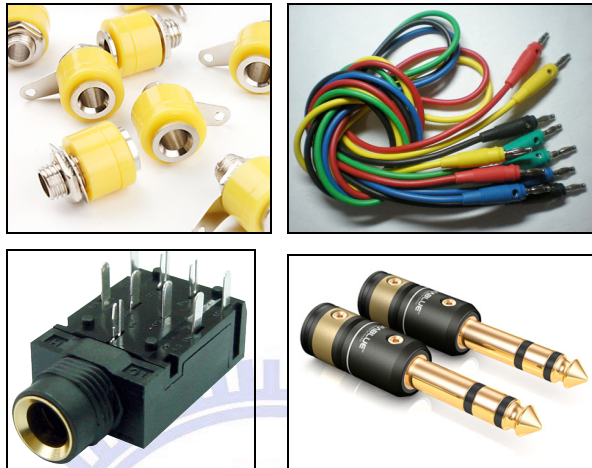


圖表 15：功能背板設計

### 3.2.2 串接 (Patch) 設計

本研究採用類似模組合成器的作法，將各個獨立的功能透過自由 Patch [6] 並且設計

自由多變的聲音。主要面板上面的串接方式以 Banana Jack 設計，分成兩種顏色，紅色為輸出、藍色為輸入。而功能背板上的音量踏板輸入及整體訊號輸出皆使用 6.3 的單音座，任何 6.3 的 TS 導線皆可使用。



圖表 16：Banana Jack（左上）、Banana Plug（右上）、6.3 TRS Jack（左下）、6.3 TRS Plug（右下）

資料來源：

[http://cloud1.lbox.me/images/384x384/201207/20-pieces-banana-jack-for-4mm-banana-plug-diy\\_lpxmvmv1343623520476.jpg](http://cloud1.lbox.me/images/384x384/201207/20-pieces-banana-jack-for-4mm-banana-plug-diy_lpxmvmv1343623520476.jpg)

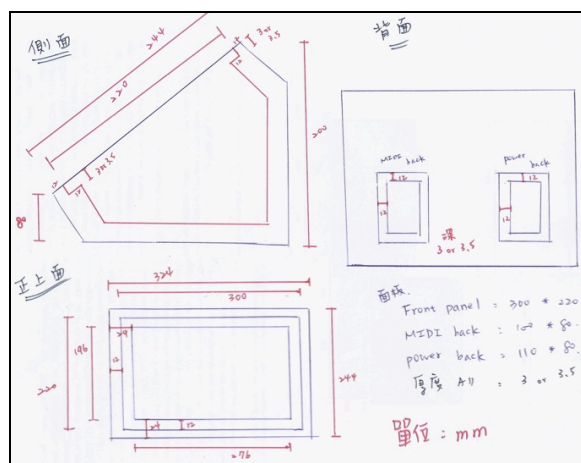
[http://i.ebayimg.com/18/!B7z++5!!Wk~\\$\(KGrHqF,!iUEzN3MUC8QBM1Ws30vEg~~\\_12.JPG](http://i.ebayimg.com/18/!B7z++5!!Wk~$(KGrHqF,!iUEzN3MUC8QBM1Ws30vEg~~_12.JPG)

<http://www.touke.com.tw/Logo/PHONE%20JACK/6.3/1.TC68-112-01.gif>

[http://www.qables.com/shop/images/t6s\\_klinkensteckerstereo\\_2.jpg](http://www.qables.com/shop/images/t6s_klinkensteckerstereo_2.jpg)

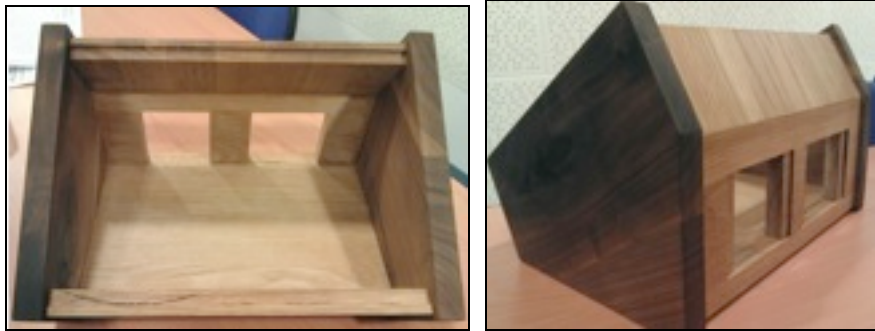
### 3.2.3 外型設計

#### (1) 系統主體：



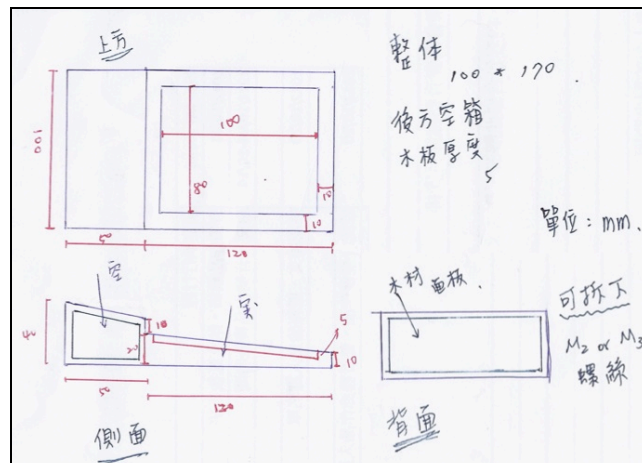
圖表 17：系統主體設計圖





圖表 18：系統外殼

(2) 音量踏板：



圖表 19：音量踏板外型設計

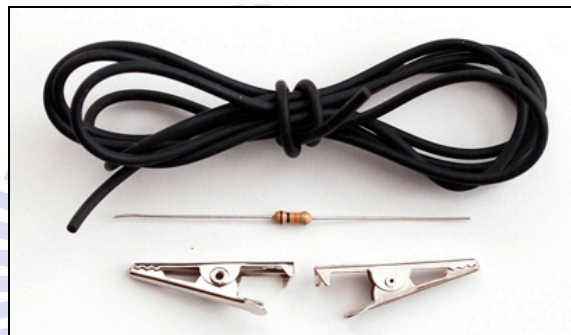


圖表 20：音量踏板外殼

### 3.2.4 新操控介面設計

操控介面的創新，一直是新介面樂器的目標，包括手勢控制 (Gestural Control) [7]、敲擊控制 (Percussion interface) [8]、力度控制 (Force control) [9]...等，透過各式各樣的操控介面找尋更合適演奏的樂器操控方法。而本研究使用特殊材質的橡膠

線設計為彈力拉伸操控介面。此橡膠線為浸泡黑碳所製成，為徑寬約 2mm 的導電橡膠線。橡膠線於放鬆狀態，每公分約 140 至 160 歐姆，當拉緊橡膠線時，密度及接觸面積會改變，電阻將會線性增加。而放鬆時，電阻值會跟著回復；但由於橡膠材質的關係，會存在彈力的特性，橡膠本身會慢慢回復，產生特殊的電阻變化效果。橡膠本身的伸長量約為靜止放鬆時的 50%至 70%，如 10 公分線段約 1400 歐姆，最高的伸長量所對應的阻值約為 2.4K 歐姆。橡膠的鬆緊度直覺的與音高相同，當施力增加，橡膠伸長就像弦繃緊一般，音高提高；反之施力減少，橡膠呈現鬆弛，音高便降低。因此本研究透過彈力拉伸操控介面，讓使用者能更直覺的操控樂器頻率及調變參數。



圖表 21：導電橡膠線

資料來源：

[http://www.spikenzielabs.com/Catalog/images/large/Adafruit/519\\_00\\_LRG.jpg](http://www.spikenzielabs.com/Catalog/images/large/Adafruit/519_00_LRG.jpg)

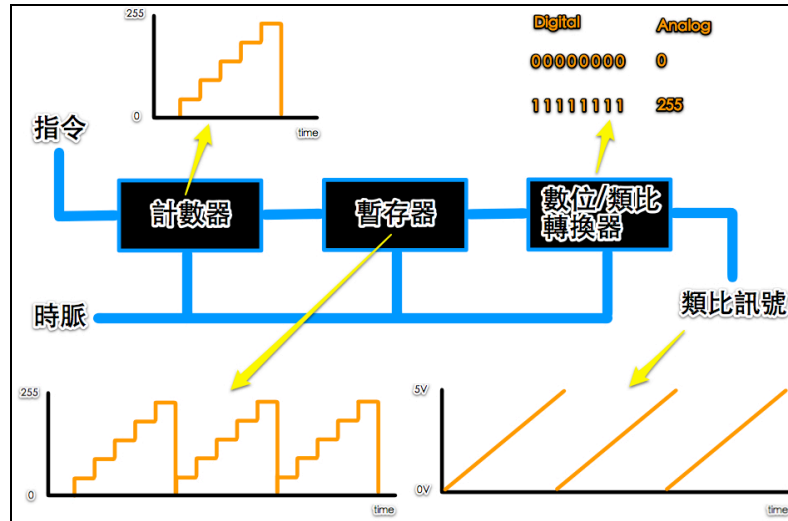
## 四、系統設計與實作

### 4.1 電壓控制震盪器 (Voltage Controlled Oscillator)

所以本研究集結上述各階段的各個樂器的優點，發展出本研究的特色：Polyphonic 的電壓控制震盪器、可以自由 Patch 項目的功能、FM 合成法、特殊的功能效果以及發展特殊的新控制介面。希望能發展出不同以往的新介面樂器。[10]

#### 4.1.1 直接數位合成法 (Direct Digital Synthesis)

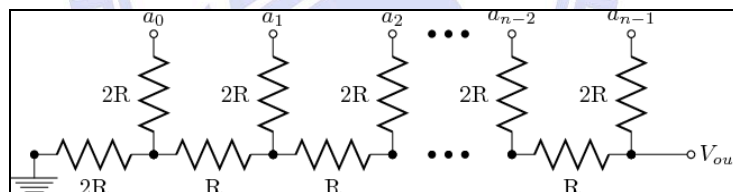
DDS (Direct Digital Synthesis) [11]又被稱為 Numerically-Controlled Oscillator (NCO) [12]，顧名思義是一種透過數位方式使用數字當做數據的方法，運用這些數字數據搭配精準的時脈可以產生固定的頻率，相對的也能處理輸入進來的頻率。DDS 透過使用的數字數據越廣 (bit 數越高)，則執行出來的樣本越為精準，在頻率調變上更為突出。像是：Arbitrary waveform、Waveform generator、Function generator...等，都是透過 DDS 來產生。DDS 的基本架構有 precision reference clock、address counter、memory Lookup、compare register 及最重要的 DAC (Digital to Analog Converter)，Oscillator 透過 DDS 所產生的數位信號皆會透過最後的 DAC 轉換成類比訊號。Korg 早期於 80 年代的 DW 系列電子樂器也使用 DDS，但他們稱之為 DWGS (Digital Waveform Generator System)；PPG (Palm Products GmbH) 早期所生產的 Wave 也是使用類似的方法，但卻是放棄利用讀取的速度來改變頻率，而是靠可變的取樣頻率來改變。由於現今科技越來越發達，導致許多軟硬體成本下降、性能提高、功能完善、晶片體積下降或是記憶體的使用下降...等。不論是軟體或是硬體，DDS 技術皆可以簡單實用又快速生成；也因此被廣泛應用，如函數波形產生器、無線電的電子設備或是精密調整頻率的發射器...等，都是現今大量使用的電子設備。本研究於 Arduino 上以 Direct Digital Synthesis 方法，實作電子樂器的 Oscillator。



圖表 22：DDS 示意圖

#### 4.1.2 數位類比轉換器 (Digital to Analog Converter)

本研究的 DAC 以 R-2R 電阻系統 (The R-2R Ladder) [13] 方式來批配電壓，而 R-2R 是一種利用電阻來當做電路中的階梯；透過這樣的批配方式，R-2R 會依據輸入端的順序配置好電壓大小。基於使用 8 bit 的輸入，電阻批配為  $a_{n-1}$  MSB (most significant bit)  $n=8$ ，到  $a_0$  LSB (last significant bit)。



圖表 23：R-2R 電路示意圖

資料來源：

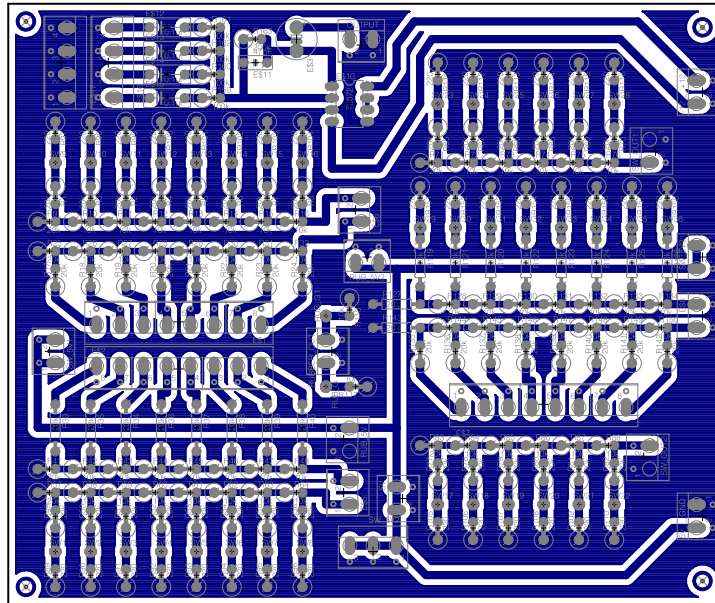
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/R2r-ladder.png>

$$V_{out} = V_{ref} \times \frac{VAL}{2^N}$$

本研究根據上述式子，使用 8 bit 的輸入  $N=8$ ， $V_{ref}$  參考電壓則使用 5 伏特， $VAL$  則為 Arduino 輸出來控制。 $V_{out}$  的範圍將會在 00000000， $VAL=0$  及 11111111， $VAL=255$ 。

當我將 Arduino 的八個輸出為 10000000， $VAL=128$ 。則  $V_{out} = 5 \times \frac{128}{256} = 2.5$  伏特。透

過這樣的方式我可以輕易的調整我需要的電壓值。多個開關也可以透過 R-2R 的方式轉換成類比電壓，節省 Arduino 的 Digital 腳位使用。



圖表 24：電壓控制震盪器 Layout 圖

#### 4.1.3 計數器與中斷 (Timer and Interrupt)

在 microcontroller 中，中斷有各式各樣的形式，如：按鈕觸發、Timer overflow 或是重新啟動…等。這時候 CPU 會停止當下的工作來執行你需要他優先做的，Arduino 裡有個稱做 ISR (Interrupt Service Routine) 的中斷服務函式，其目的是讓條件觸發後可以跳至 ISR 運作，當 ISR 跳出則回原本崗位繼續執行。中斷有很多種作法，最常使用的為 CTC mode (Clear Timer on Compare Match)。然後計算取樣頻率、送出特定頻率的訊號、產生一個週期所需要的時間為  $\frac{1}{100}$  秒，假如 Sample 點有 100 個的話，一秒內將要處理一萬次，這將需要非常快的處理速度，Timer Interrupt 便能達到毫秒以下的運算。在撰寫 Arduino sketch 時，所有指令都是在 Loop() 底下執行，由於工作順序的關係很難運算時間，很多指令也會消耗過多的時間，如同 If、for 或是 While…等；而 Arduino 也有許多函式是由多個指令所組成的，如 digitalRead、digitalWrite、analogWrite、tone…等。Arduino UNO 有三種 Timer，分別為 Timer0、Timer1、Timer2，每個 Timer 裡都有一個自己的 Counter，而 Counter 會隨 Timer clock 每個記數而遞增。當計數器達到我們所規定的批配數值，CTC Timer 將會觸發，並且儲存於 compare match register 裡，之後便將 counter 歸零重新計數。當我們進入

系統參數設定 counter 的 compare match value 和 speed，我們可以控制中斷的頻率。Arduino UNO 的時脈為 16Mhz，但這是最高的執行速度。當設定在 16Mhz 的狀況下工作，counter 每計算一次事件是  $\frac{1}{16000000}$  秒（約 63ns）；當我們需要一個累加器從 0 算到 9 則需要花費 10/16,000,000 秒的時間來完成，以此類推數到 999 則需要  $\frac{1000}{16000000}$  秒的時間。Timer0 與 Timer2 為 8 bit timer，意味著 Timer0 和 Timer2 最高計數器的批配值為 255；Timer1 是 16 bit timer，最高計數器的批配值為 65535，當計數器超過最大批配值時，將會發生 overflow，counter 歸零。因此，當我們把 compare match register 設定為最大值，8 bit 的 counter 最高執行速度只能達到  $\frac{256}{16000000}$  秒（約 16us），以此類推...16 bit 為  $\frac{65536}{16000000}$ （約莫 4ms）。

$$\text{compare match register} = \left[ \frac{16000000 \text{ Hz}}{(\text{prescaler} * \text{InterruptFrequency})} \right] - 1$$

$$\text{compare match register} = \left[ \frac{16000000}{(1 * 25600)} \right] - 1 = 624$$

程式碼如下：

```
void setup() {
  //Timer1 設定

  cli(); //啟動中斷
  TCCR1A = 0; // 設定TCCR1A register為0
  TCCR1B = 0; // 設定TCCR1B register為0

  //設定compare match register 週期為25600Hz
  OCR1A = 624; // = (16,000,000 / 25,600) - 1 = 624
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); //取動比較中斷

  //開啟CTC (Clear Timer on Compare Match) 模式
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS10); //設定為0 prescaler
  samplerate = 25600; //取樣頻率

  frequency = analogRead(A5); //初始值為A5的值
  //每個週期可使用的SAMPLE數量
  perSample = samplerate/frequency;

  //鋸齒波的每個SAMPLE點上升一格所需的值 (Amplitude)
  sawtoothAmp = 255/perSample;
  sei(); //結束中斷
}
```

圖表 25：Time Interrupt Setup