

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

球面波表合成模型之實作與探討

The Implement and Study for Sphere Wavetable
Synthesis Model

研究生：紀子衡

指導教授：曾毓忠 教授

黃志方 教授

中華民國一百零二年一月

球面波表合成模型之實作與探討

The Implementation and Study for Sphere Wavetable Synthesis Model

研究生：紀子衡

Student：Tzu-Heng Chi

指導教授：曾毓忠

Advisor：Yu-Chung Tseng

黃志方

Chih-Fang Huang

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

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Engineering

January 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年一月

球面波表合成模型之實作與探討

學生：紀子衡

指導教授：曾毓忠

黃志方

國立交通大學聲音與音樂創意科技碩士學位學程

摘要

本論文介紹的是一個新型態的聲音合成模型—球面波表合成模型，並且結合動態影像，建構一套表現在三維度空間中的即時數位音像互動環境。其運算核心是由即時影音互動程式 Pure data 裡的 pmpd 完成。pmpd 是一個物件，也是一套系統，藉由其內部程式做物理建模的運算，建立起質點和鏈結的互動機制，且以質點彈簧系統做低速的物理運動行為。另外，運用波域合成法(Wave Terrain Synthesis)和掃描合成法(Scanned Synthesis)在掃描波形的特性。以有限元素的概念將質點和鏈結排列成一個球面，表現在球座標上，並且實作出一套即時的控制介面。透過聲音與影像生成機制的模組化，賦予聽覺與視覺同步更直覺的意義。

關鍵字：波表、波域、掃描、pmpd

The Implementation and Study for Sphere Wavetable Synthesis Model

Student : Tzu-Heng Chi

Advisors : Yu-Chung Tseng

Chih-Fang Huang

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

ABSTRACT

In this thesis, Sphere Wavetable Synthesis (SWS) model, a new kind of sound synthesis model is introduced. This model provides a real-time digital audio-visual interactive environment in a three-dimensional space. The computational framework of SWS model is based on the pmpd object in Pure Data, a real-time interactive programming language. The pmpd object is able to conduct physical modeling simulations, generating low-speed physical movements of an equivalent mass-spring system. In SWS model, the concepts of Wave Terrain Synthesis and Scanned Synthesis were adopted to obtain dynamic sounds. Masses and links were arranged to construct a virtual sphere, rendering users a real-time interactive interface for sound manipulation. This model aims to modulate the generating mechanism of sounds and images, providing users a more intuitive experience of the audio-visual synchronization.

Keyword : wavetable 、 wave terrain 、 scan 、 pmpd

致謝

感謝神，保守我過去兩年半研究所生活中的一切，使我再次體認到，生命中無一時刻不在祂的計畫中進行著。感謝我的家人，總是在我求學的過程中尊重我的決定，使我可以進入社會前還不斷摸索這塊領域，並且供給我一切所求所需。感謝我的指導教授與修課老師們，不僅給予我在聲音領域上極為豐富寶貴的知識，更給予我很大的自由實現自己的創作。感謝交通大學所有同學，伴隨我度過兩年半充實的研究與表演生活。感謝科技藝術與聲音藝術領域的朋友們，開啟我跨領域創作之路。感謝教會的弟兄姊妹時常關心我，為我禱告。

最後要再次感謝神，帶領我人生中的每一步，願我一生中的時時刻刻，都好好行在祂的旨意中，將一切的榮耀都歸給祂。



目錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
致謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
一、緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	2
1.3 研究目標	3
1.4 研究架構	4
二、文獻探討	5
2.1 音像共感覺	5
2.2 數位音像機制	6
2.2.1 音像相互觸發	7
2.2.2 音像同時觸發	8
2.3 視覺化聲音合成	10
2.3.1 波表合成法	11
2.3.2 波域合成法	12
2.3.3 掃描合成法	15
2.4 視覺化聲音形塑	17
2.4.1 CORDIS – ANIMA	17
2.4.2 pmpd	19
2.5 相關實作	22
2.5.1 音源軟體	22
2.5.2 iPad 音樂軟體	22
2.5.3 電子樂器與裝置	24
三、物件與結構設計	25
3.1 音像系統架構	25
3.1.1 開發環境介紹	25
3.1.2 球座標的應用	26
3.2 幾何外觀設計	26

3.2.1 骨架結構.....	26
3.2.2 色塊對應.....	28
3.3 物理動態應用.....	29
3.3.1 一維與二維運動.....	29
3.3.2 三維運動.....	30
3.4 聲音合成對應.....	31
3.4.1 球缺與波表對應.....	31
3.4.2 掃描對應.....	32
3.4.3 倍頻對應關係.....	34
四、軟體介面實作與操作.....	35
4.1 質點彈簧物件宣告.....	35
4.2 GEM 結構描述.....	38
4.2.1 座標軸轉換.....	38
4.2.2 質點與鏈結算圖機制.....	39
4.2.3 物理動態與方程式波域表現.....	40
4.3 聲音合成機制.....	42
4.3.1 波表即時動態運算.....	42
4.3.2 掃描波形的對應.....	43
4.3.3 動態倍頻與對應倍頻.....	45
4.4 使用者介面.....	45
五、介面操作與討論.....	49
5.1 音像表現控制.....	49
5.1.1 靜態表現.....	49
5.1.2 動態表現.....	50
5.2 結果討論.....	53
六、結論與未來展望.....	55
參考文獻.....	56

表目錄

表 1 抽象數位合成法與物理建模合成法分類.....	10
表 2 質點與鏈結對應.....	19
表 3 球缺與球面結構.....	27
表 4 掃描波形與方式.....	33



圖目錄

圖 1 作品《FluOREScenT lamp》的表演片段.....	3
圖 2 作品《Composition VIII》.....	5
圖 3 作品《Improvisation 28》.....	6
圖 4 Metasynth 軟體介面.....	7
圖 5 作品《一個人被外星人抓走的故事》的表演片段.....	8
圖 6 傳統外部控制對應[4].....	9
圖 7 動態獨立對應層對應[4].....	9
圖 8 數位聲音合成法的歷史時間表[6].....	10
圖 9 聲音透過波表合成示意圖[6].....	11
圖 10 (a)為波表，(b)、(d)為查表波形，(c)、(e)為輸出波形 [7].....	12
圖 11 方程式 (6)產生的的波域表面[8].....	14
圖 12 (上)掃描軌道(下)波域上掃描投影之波形[6].....	15
圖 13 (上)掃描軌道(下)波域上掃描投影之波形[6].....	15
圖 14 有限元素模型來描述一維弦模型[9].....	16
圖 15 M 點和 L 點的屬性[10].....	17
圖 16 M 點與 L 點的基本連結[10].....	18
圖 17 M 點與 L 點的基本傳遞[10].....	18
圖 18 物件 mass 和物件 link 做一維弦模型之模擬.....	20
圖 19 不同型態的拓撲[11].....	20
圖 20 質點與鏈結的更新率.....	20
圖 21 (上)一維模型做二維度運動(下)二維模型做一維度運動[4].....	21
圖 22 Scanned Synth Pro 和 Scanned Synth Mini 的介面.....	22
圖 23 The Wablet 的介面.....	23
圖 24 SpheroSampler 的介面.....	23
圖 25 系統架構圖.....	25
圖 26 r值對應 RGB 色彩.....	29
圖 27 質點運動將能量沿 θ 方向傳遞.....	30
圖 28 整體質點集結成線做r方向運動.....	30
圖 29 質點與鏈結在面上的位置關係.....	30
圖 30 球面波表現在xy平面.....	31
圖 31 動態波表.....	32
圖 32 固定波表.....	32
圖 33 φ 軌道的波動.....	33
圖 34 倍頻關係的泛音列.....	34
圖 35 倍頻對應關係.....	34

圖 36 質點編號順序.....	35
圖 37 起始宣告流程圖.....	36
圖 38 質點屬性資訊.....	36
圖 39 鏈結屬性資訊.....	37
圖 40 質點和鏈結的宣告.....	37
圖 41 GEM 直角座標軸.....	38
圖 42 θ_i 方向排列.....	39
圖 43 θ_i 方向與 ϕ_i 方向排列.....	39
圖 44 方程式(15)在(左)直角座標(右)球座標.....	40
圖 45 方程式(16)在(左)直角座標(右)球座標.....	40
圖 46 方程式(17)在(左)直角座標(右)球座標.....	41
圖 47 方程式(18)在(左)直角座標(右)球座標.....	41
圖 48 方程式(19)在(左)直角座標(右)球座標.....	41
圖 49 tabread4~讀表輸出曲線.....	42
圖 50 動態波表的矩陣運算.....	43
圖 51 鋸齒波實作.....	43
圖 52 三角波實作.....	44
圖 53 正弦半波實作.....	44
圖 54 掃描波形實作.....	45
圖 55 SWS 使用者介面與 GEM 視窗全貌.....	46
圖 56 SWS 使用者介面(一).....	46
圖 57 SWS 使用者介面(二).....	47
圖 58 SWS 使用者介面(三).....	47
圖 59 高頻且音量小(左)，低頻且音量大(右).....	49
圖 60 波形單調變化短促(左)，波形複雜變化多元(右).....	50
圖 61 動態波表波形(左)固定波表波形(右).....	50
圖 62 $K = 0$, $D = 0$	51
圖 63 $K > 0$, $D = 0$ 時， K 值小(左)， K 值大(右).....	51
圖 64 $K = 0$, $D > 0$	52
圖 65 $K > 0$, $D = 20$ 的各樣圖形.....	52
圖 66 模型系統崩壞.....	53

一、緒論

1.1 研究背景

隨著電腦的發明，工業時代的機器自動化，西方文明一切的設計都是為了解決人類生活上的不便，或是更方便人類生活。而滿足生活的條件，有時不只是滿足生活機能與生理需求而已，有很多人更是追求心裡的滿足、多重感官的享受，例如藉由藝術欣賞或創作；而在欣賞或創作藝術的過程中，視覺與聽覺一直是兩種最常使用的感官，也是可以互相填補單一感官不足的缺陷，過去例如戲劇、歌舞劇、舞劇需要背景與哼唱的音樂，而音樂會則希望可以看到鮮明的舞台，樂手們在台上盡情地彈奏樂器；而現在科技發達，電子計算機不管是硬體或軟體上的運算越來越快速，從低科技(Low Tech)慢慢演進到高科技(Hi Tech)的過程中也因著電的大量使用，在藝術上的發展越來越多元，以往很多人手所不能表現的手法與技法，可以藉由電腦的高度運算達到聲光燦爛奪目的效果。從六零年代錄影機和錄影帶尚未普及的「電視藝術」，到七零年代VHS錄影帶和手持攝影機的出現，開啟了接下來二十年的「錄像藝術」，開始更多的加入表演與裝置，成為動態影音藝術的代名詞，到了九零年代個人電腦與應用軟體蓬勃發展，數位動態影音科技再次帶領藝術領域進入了「數位藝術」時代[1]，到了兩千年後至今，筆記型電腦的大量普及，體積越來越小，顯示卡與音效卡越來越高階，不僅攜帶方便，行動能力高，使得數位藝術表演更為興盛，其中最為廣泛的，就是數位音像(Digital Audio-Visual)。

『音像軟體憑藉電腦軟體當成它的媒介，並且主要是探討聲音與影像的關係。有一些作品被創作來多元化社會的景況，而為了展現此種意圖的作品很多。廣義地來說，且在這篇文章中提及的例子，我們認為軟體藝術作品與像是電腦、表演、裝置、室內設計、遊戲電玩、儀器、保護銀幕程式、診斷工具、研究成果呈現，甚至是迷幻藥幻覺，有著一些相同的目標—雖然許多作品突破了界線的藩籬，但這樣的例子並不常見。如同，數位音像軟體藝術作品持續地融合多管道且偶然地與研究科學家、新媒體藝術家、軟體發明家、音樂家、自由業者相交對話，致力於外拓機構到像是實驗室、學校、

博物館或企業。』¹，在現今的世界中，人類接收資訊的方式逐漸由單一媒體轉向多媒體，任何產業不論是主導性或是輔助性，上述所提的起源和意圖，都可以看到數位音像藝術的影響力大大改變人類的生活[2]。然而，論到聲音與影像共存時，不難去想到兩個問題，首先是：影像和聲音之間的從屬關係。不論在視聽上哪個方向的作品先被創作出來，為了增強感受而搭配上另一個面相的感知，勢必有主要感受和附加感受的先後順序，進而延伸出第二個問題：影像和聲音之間的主動與被動性。既然有先後順序問題，討論同步時勢必也會有主動產生與被動產生的問題，但是是否「先」有的就是「主動」，而「後」來的只能「被動」，仿真也好，虛擬也好，將是本論文在研究的過程中想去探討的。

1.2 研究動機

數位藝術在台灣近三十多年的發展，不論是純聲音作品或裝置，影像搭配的錄像作品或是音像作品，中間不斷地有創新的想法。藝術家們尋找適合的媒材與手法，目的就是為了豐富作品或表演，增強表達意境，透過觀賞和自身實際參與表演，所看到的數位音像跨媒材表演大概分成幾類：實體樂器搭配電子聲響與影像、實體樂器經由電腦處理產生電子聲響與影像、自製樂器/裝置經由電腦處理產生電子聲響與影像、純粹電子聲響與影像/燈光搭配等，不論以何種方式，呈現聲音為主體的表演所選用的跨媒材作為輔助一直是門學問，要如何的輔助增強聆聽聲音的感受，而又不失去欣賞作品的焦點？以交通大學的 CLork 樂團為例，在 2011 年的六月與十月有兩場表演，其中一件作品《FluOREScenT lamp》將影像與燈光兩個元素加入表演。將音樂與影像/燈光的控制分開作業，透過 Pure Data²產生圖像，並且連結微控制板 Arduino³控制日光燈的電路，透過操作 midi 控制器傳送 midi 訊號給 Pure Data 作運算處理，然後將影像訊號投影出去，同時觸發電路系統讓日光燈做開關動作；音樂部分則是做橋段與配器的預製，現場搭配影像與燈光互動 (圖 1)。此作品藉由日光燈表達人類試圖用自身文明的方式來管理大自然，預期可以讓世界更好，卻仍然徒勞無功。

¹ Golan Levin, *Audiovisual Software Art: A Partial History*, May 2009

² 由 Miller Puckette 開發的自由軟體，簡稱 Pd，圖型化界面的即時影音處理程式，針對音訊、視頻和圖形作處理。

³ 基於開放原始碼的小型單晶片 i/o 板，類似於 Java 和 C 語言的開發環境，可以同時讓外部軟體與外接硬體互動。



圖 1 作品《FluOREScenT lamp》的表演片段

在表演這個作品的當下，即便是聲音的素材與編曲符合情境，但由於論述是討論森林與日光燈的關係，不知不覺得在準備的過程中，已經將影像與燈光導向為主體。也因著以預置的方式搭配呈現，這其中「聲音」與「影像」與「表演者」三者之間的互動性不夠強烈，圖像與聲音之間的意義也確認不明，使得表演者的情緒在表演當下獲得的共鳴不足。

1.3 研究目標

本論文不是要探究音像藝術的發展脈絡與其藝術性之間的關係，反之想要研究探討的是關乎聲音與影像間的同步化，並且以創作時期的角度，摸索以聲音為主體的表現，對於發聲機制以及聲音形塑的即時互動，反應在最初的聲音合成法與影像之間的輔助關係更加直覺。

因此本論文的目的是，探究過去聲音合成法中，找出可以用影像來輔助的合成法，表現的方式就是利用最純粹的「點、線、面」來包裝成一個立體的球體，找出聲音與影像之間的共通性，加到合成的參數中。在介面與表現的方式上，嘗試做出過去看不到的介面型態，並且加入物理動態的想法，建構一個獨立且模組化的系統環境後，再討論各個參數的對應方法，最後在軟體上實作出一個模型和使用者的介面，期盼包裝成一套獨立音源軟體，成為一個供給創作者更直覺的數位音像軟體。

1.4 研究架構

承續本章節的緒論，以下分成五個大章節做討論：

第二章：文獻探討

探討過去相關的研究，分成音像共感覺，數位音像的機制、視覺化聲音合成、視覺化聲音形塑和相關實作五個部分，觀察過去人所做過的研究與分類，探討數位音像中以聲音為主體來帶動影像的機制，以及數位聲音合成中可視覺化的合成法，並且與不同平台間的整合。

第三章：物件與結構設計

介紹系統的架構設計想法，先描述其結構，再來引用物理動態來描繪運動行為，最後是聲音與影像如何合成以及相互對應。

第四章：軟體介面實作

進入實作部分，並且講解如何運用 Pure Data 物件的屬性，處理影像和聲音在呈現上的一些限制與解決，並且中間實作的過程。

第五章：介面操作與討論

實作完藉由操作介面控制聲音與影像，討論過程的變化，以及優缺點與限制。

第六章：結論和未來展望

二、文獻探討

2.1 音像共感覺

聲音與影像的感知同步性，一種聽到特定名詞引發味覺感受，或是聽到音樂便看到顏色諸如此類的聯動感知能力叫做「聯覺」(Synesthesia)⁴，又可稱作「通感」或是「共感覺」，而其中最常見的是「視聽聯覺」，具有這種聯覺的著名藝術家可以追溯到二十世紀表現主義的俄國繪畫大師瓦西里·康丁斯基⁵，因著他對於色彩有著異常的感受力，以致於讓他可以從色彩中聽出音樂的和聲與旋律性，將這些元素融入在他的畫作當中。他的影響更在他年輕時所參與的慕尼黑藝術團體「藍騎士」裡結識的一位二十世紀重要作曲家荀白克⁶身上看到，在這個時期他的音樂風格由傳統調性慢慢地轉向無調性，也被稱作是荀白克在音樂上的表現主義時期[3]。康丁斯基在中晚年的「點線面」時期，變得更理性，作品多有嚴謹的幾何架構，猶如作曲般地鋪陳他的畫作，由他的作品命名更可窺知一二，例如：《構成第八號》(見圖 2)和《即興第二十八號》(見圖 3)。

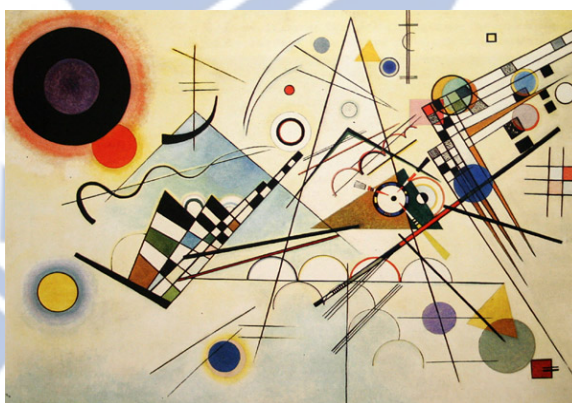


圖 2 作品《Composition VIII》

(資料來源：<http://www.wassilykandinsky.net/work-50.php>)

⁴ 具有神經基礎的感知狀態，表示一種感官刺激或認知途徑會自發且非主動地引起另一種感知或認識。

⁵ Wassily Kandinsky (1866-1944)，生於俄羅斯的畫家和美術理論家，著有「藝術的精神」和「點線面」。

⁶ Arnold Schönberg (1874-1951)，奧地利作曲家，音樂風格從早年的浪漫派到無調性音樂再到十二音列。



圖 3 作品《Improvisation 28》

(資料來源：<http://www.wassilykandinsky.net/work-68.php>)

『康丁斯基說過：「長度就是時間。」克利⁷認為：「空間也是種時間性的觀念…每當一個點開始移動而成為線條時，時間的因子就在其中了。』⁸聲音是時間上的表現，在時間中移動的每個點記錄了能量的大小，如同繪畫中的最原始元素是「點」一樣，點是極微小看不見的，以物質的角度來看，它就像是無形的東西，是零；而「線」是點移動的軌跡，點同時在空間與時間中的移動投影連結起來就成為了「線」；最後的「面」則是由線組成，兩條相交的線就構成了一個面，兩條水平線和兩條垂直線圍成的則是一個「基面」，若是一連串的点連結成一條線代表著是一個音的話，那四條線所圍成的封閉面就是一個複音了；而線條代表的音又因為溫度有冷與熱，是一個多重意義的結構。共感覺產生的感知，不僅是被動地增強感受，更是抽象地給予新視野。

2.2 數位音像機制

當「電」在人類生活中越來越被大量使用時，產生影像或聲音的自由度與配合度又提高了，音像的同步可以藉由電子計算機內微小的晶體震盪器給定的時脈更加精確，以數位音像表現的即時處理來說，不論是使用工具、內部或外部資料參數產生結果，可以分為：聲音觸發影像、影像觸發聲音和聲音影像同時觸發，而上述的前兩者所指的是單方向的觸發[4]。

⁷ Paul Klee (1897-1940)，德國籍瑞士裔畫家，和康丁斯基一樣深受音樂影響的抽象派畫家。

⁸ 周怡秀，《節奏》：從聽覺到視覺，音樂小百科，<http://www.epochtimes.com/b5/4/4/5/n501396.htm>。

2.2.1 音像相互觸發

由影像來觸發聲音的案例是最多的，這跟人類生活的感官發展有很大的關係，以視覺為主體的表現脈絡一直比聲音的發展還要快速；最早的研究是把影像處理分析，將點陣圖或是向量圖編碼成聲音[5]，參數對應到聲音的基本參數做合成，或是藉由圖像編輯器直接將聲音畫下來後產生，用頻譜的方式表現，或是以樂譜的概念標記。而被包裝成商用軟體的 Metasynth 是一個可以用畫畫的方式產生聲音的音訊處理軟體(如圖 4)。第一種方式是以像素(pixel)的概念，以亮度對應音量，以顏色對應相位，任意在視窗上繪畫產生聲音。第二種是直接將原始圖片放進聲音參數的座標，橫軸當做時間軸，縱軸當做是頻率軸的方式產生聲音，或是去調變影像，使其變化後的對應當做聲音合成的素材。

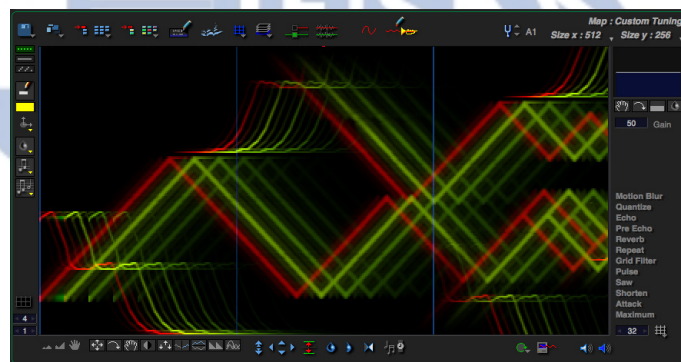


圖 4 Metasynth 軟體介面

(資料來源：<http://www.uisoftware.com/MetaSynth/index.php>)

以聲音的呈現為主要導向，為了讓影像和聲音有所關連，將音訊作分析後的各樣物理參數當做控制影像的輸入資訊，用來作圖像的合成或是調變，甚至以圖的方式直接呈現音訊的特徵，這種現象稱作『聲音視覺化』(sound visualization)。這樣的表現方式會讓視覺畫面很抽象，卻是一種在藝術上很好發揮的媒體材料，因為保留許多的不確定性和隨機性；但也有少數的表現手法是刻意在量化的座標下讓聲音視覺化，或說以聲音作為畫筆作畫，從視覺的感受上賦予影像意義，以林育德的作品《一個人被外星人抓走的故事》為例，這是一個動態的音像作品，畫面的縱軸為由上而下持續進行的時間軸，橫軸為頻率分佈 0 至 20k Hz 的範圍，顏色和亮度的變化則為聲音的能量大

小，藉由聲音主要表現在中低頻，較複雜的影像資訊則隱藏在音訊的高頻中，或是以低能量的方式分布在各個頻段中，讓畫面像捲軸般不斷向上(見圖 5)。

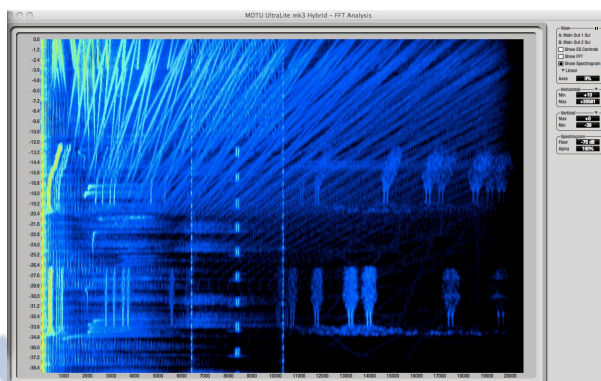


圖 5 作品《一個人被外星人抓走的故事》的表演片段

而透過以聲音訊號參數的特徵來直覺地達到聲音視覺化的例子，最普遍看到的就是商業音樂播放軟體。例如美國蘋果公司的 iTunes、微軟公司的 microsoft media player 和 Nullsoft 的 Winamp 也都會把聲音的資訊透過圖像表現出來，增加視覺的感受。

2.2.2 音像同時觸發

這裡定義的同時觸發，來源並不是由影像或聲音被分析的參數所提供，而是由第三方的外部訊號控制，是獨立且可變的參數，更可以是一套系統。以日本視覺藝術家池田亮司⁹的作品《data.matrix》為例，利用很純粹的數據資料同時作為聲音和影像的觸發，影像多為黑與白的影格色塊、數字符號和直接的訊號線條，以灰階的點線面來描繪整個動態的畫面，聲音的呈現則是經過調變的白色噪音，以高頻點綴，低頻延續的快節奏方式搭配黑白影格及幾何圖像做 IDM¹⁰風格的聲響音樂。

而透過物理模型來模擬物體運動/振動狀態是最直接反應物體的形變與聲音的傳遞，然而建模本身不僅是複雜的工程運算，電腦在跑程式時也需要消耗大量的效能做

⁹ 池田亮司(Ryoji Ikeda, 1966—)，出生於日本岐阜，當紅的電子音樂與視覺影像藝術家，

<http://www.ryojiikeda.com/>

¹⁰ 智慧型電子舞曲 Intelligent dance music 的縮寫，為了區別九〇年代的電子音樂而在八〇年代末期發展的風格

快速運算，因此在軟體上的實作有一部分的作法還是依賴對應(Mapping)來給定物理意義；在法國的技術開發兼藝術表演團隊—chdh¹¹，專門開發以物理建模為基礎的環境平台，研究運動行為、圖像和聲音之間的對應關係[4]；他們在實作想法上提出了關於對應的改良，在傳統的聲音影像對應架構(圖 6)之間加入了動態獨立對應層(Dynamic Independent Mapping Layers，圖 7)，作為觸發物件後的自身運動行為以及仍然可以直接對應聲音影像的雙重對應。

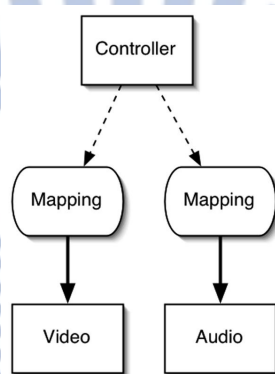


圖 6 傳統外部控制對應[4]

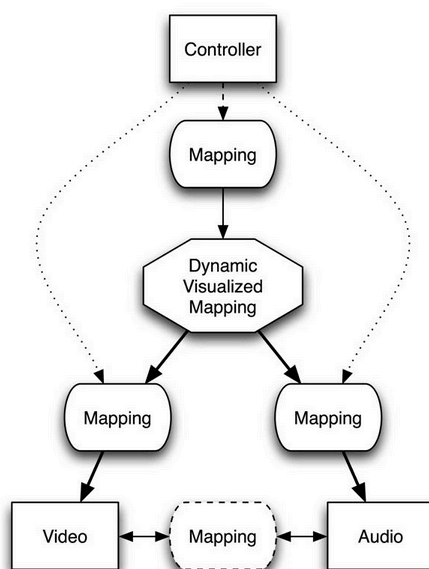


圖 7 動態獨立對應層對應[4]

¹¹ 由核心成員 Cyrille Henry 和 Damien Henry 所命名，分別做藝術、跨領域開發與工程開發，後來加入了 Nicolas Montgermont 做更多的科學應用整合以及音像研究，是一個兼具技術開發與藝術表演的團隊 www.chdh.net。

2.3 視覺化聲音合成

聲音合成的方式大體上可以分為類比式和數位式，電腦工業發展的速度越來越快，許多以前在類比電子電路上才能做的聲音合成，都可以在軟體上實作，透過音效卡運算後轉成類比訊號。而數位式的合成法又大致可以分成抽象數位合成(Abstract Digital Sound Synthesis)和物理建模合成(Physical Modeling)兩大類，如表 1 所示。而圖 8 是近五十年重要的數位聲音合成法歷史時間表[6]。

表 1 抽象數位合成法與物理建模合成法分類

抽象數位合成法	物理建模合成
加法合成(Additive Synthesis)	質點彈簧結構網絡(Lumped Mass-Spring Networks)
減法合成(Subtractive Synthesis)	模態合成(Modal Synthesis)
波表合成(Wavetable Synthesis)	數位波導(Digital Waveguides)
振幅/頻率調變合成(AM/FM Synthesis)	混合合成(Hybrid Methods)
	直接數值模擬(Direct Numerical Simulation)

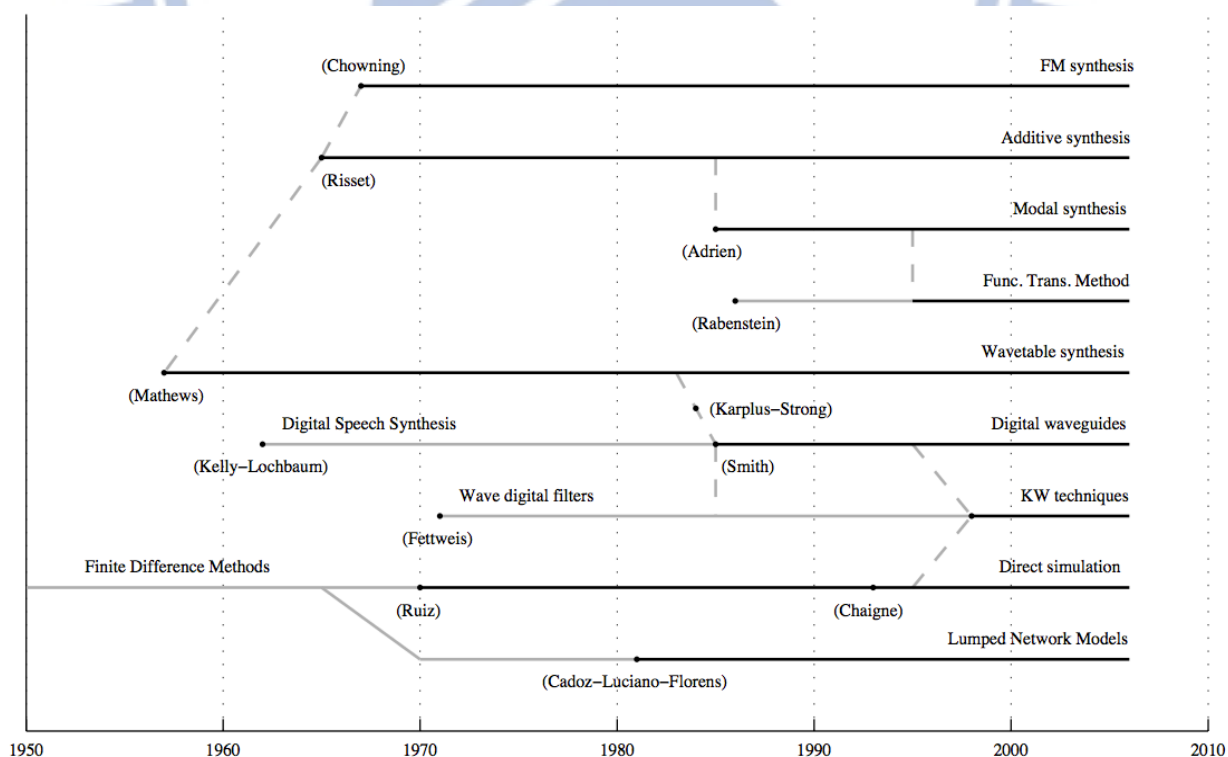


圖 8 數位聲音合成法的歷史時間表[6]

其中在抽象合成類別和物理模型類別中，以點的方式記錄聲音能量大小，以時間為橫軸將點和點之間連貫起來，形成連續性的聲音訊號，並且圖型化描繪聲音的方法，就是波表合成和質點彈簧結構網絡合成，以下將介紹跟波表相關的三種聲音合成法，以及用質點彈簧結構來描述低速的物理動態行為。

2.3.1 波表合成法

在數位音訊合成的世界裡，最多使用的技術就是將這種數值運算後所產生的數字串根據演算後排列成音訊波形的取樣方式，透過索引值讀取對應到波表的取樣值，傳到數位類比轉換器(DAC)將這串連續且隨電壓值變化的數字藉由訊號放大並送到揚聲器播出[6]，如圖 9所示。

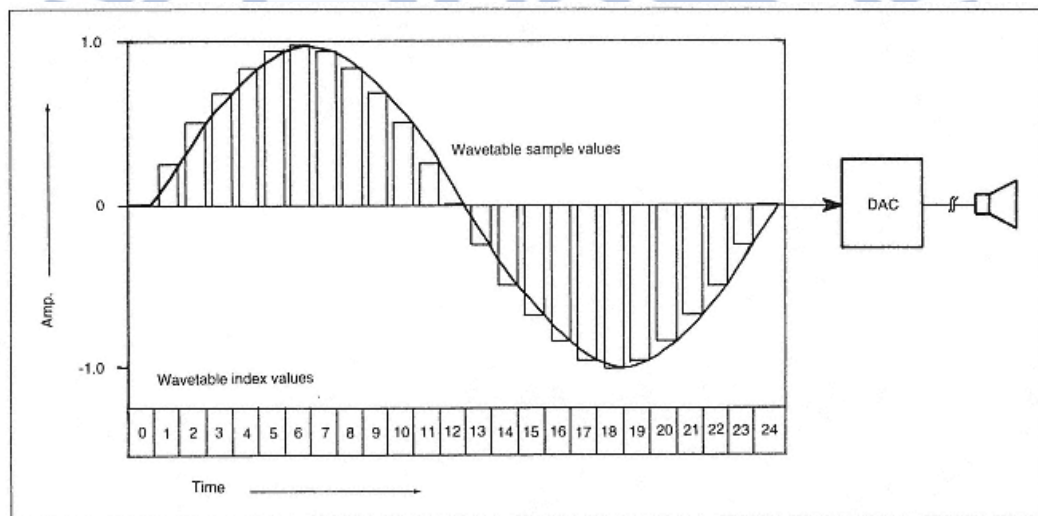


圖 9 聲音透過波表合成示意圖[6]

然而將這種以既存的固定數字串列透過索引值一一傳送的方法用在波表合成法，其中兩個最主要的要素就是：波表(wavetable)和波形查表(table-lookup)。將一串輸入的波形訊號 $y[n]$ 當做是波形查表訊號，對應在既定的波形波表 $x[n]$ ($n = 0 \dots N$ ， N 為波表的長度)，如圖 10 所示，可以定義這串波表為一個新的訊號[7]：

$$z[n] = x[y[n]] \quad (1)$$

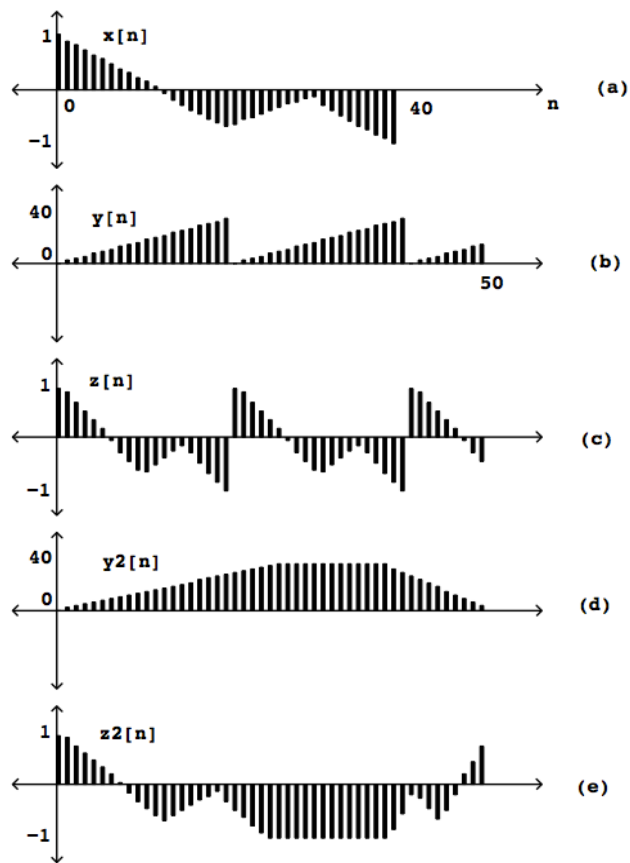


圖 10 (a)為波表，(b)、(d)為查表波形，(c)、(e)為輸出波形 [7]

而談到波表合成時，更嚴謹的來看待波表的話，它應該是單一週期的波形所構成的波表，利用極小的記憶體儲存取樣點，藉由來回快速掃描同一個波表來減少電腦的運算，但是對於固定波形來講，要變換音色的方法就是切換不同的波表了。

2.3.2 波域合成法

傳統波表都是建立在一個維度上面看另一個維度的變化，藉由查表波形當做索引值做單方向的重複來回掃描，訊號的波形僅呈現在 xy 平面上；因此考慮到是否可以延伸波表合成的想法，在二維平面上看第三維度的變化，也就是說用同樣查表波形的原理在二維平面上面做掃描，於是有別於傳統一維波表，將這個被掃的平面叫做波域 (Wave Terrain)，以 $w(x, y)$ 表示。而掃描波域的索引方程式稱作軌道(Orbit)，軌道是 xy 平面上產生的，將軌道投影在波域上(把軌道的 x 值和 y 值代入 $w(x, y)$)得到 z 方向的參數變化，這就是波域合成法(Wave Terrain Synthesis)[6]，也因為此合成法既存的波表是一個二元方程式，故此又稱作二元方程式合成法(Two-variable function synthesis)。

此合成法的實作概念是藉由一個 n 元的取樣方程式，透過函數 t 做週期性運算，比起波表的單方向掃描，軌道做循環的掃描更具有空間中的幾何物理意義；當使用 n 元的取樣方程式時就表示會有 n 個索引查表波形，以下案例就以 $n = 2$ 為例。軌道的兩個索引與時間的基本關係為：

$$x = x(t), y = y(t)$$

由於波域方程式在 x 分量與 y 分量超過 ± 1 的 z 軸變化太過劇烈，為了使波域平滑，關係式的邊界設為 $(-1 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1)$ ，且遵循著以下三個條件[8]：

(1) $w(x, y)$ 方程式和它的一階偏微分 $(\partial w(x, y)/\partial x, \partial w(x, y)/\partial y)$ 在邊界內的區間都是連續的。

(2) $w(x, y)$ 在邊界上的值為零，也就是 $w(\pm 1, y) = 0, w(x, \pm 1) = 0$ 。

(3) $w(x, y)$ 在邊界上的一階偏微分為零 $(\partial w(x, y)/\partial x = 0, \partial w(x, y)/\partial y = 0)$ 。

上面第三個條件為非必要，只是確保如果軌道在做掃描時跨越邊界銜接時會讓波形更加滑順。因此定義出一個基本的方程式如下：

$$w(x, y) = g(x, y)g_1(x, y) \quad (2)$$

其中的多項式

$$g_1(x, y) = (x - 1)(x + 1)(y - 1)(y + 1) \quad (3)$$

同時滿足 $w(\pm 1, y) = 0$ 和 $w(x, \pm 1) = 0$ 。而如果更加嚴謹的加入第三個條件時，方程式可以表示成：

$$w(x, y) = g(x, y)g_2(x, y) \quad (4)$$

其中的多項式

$$g_2(x, y) = (x - 1)^2(x + 1)^2(y - 1)^2(y + 1)^2 \quad (5)$$

在 $x = \pm 1$ 和 $y = \pm 1$ 時分別同時滿足 $\partial w(x, y)/\partial x = 0$ 和 $\partial w(x, y)/\partial y = 0$ 。以下方程式便以 Borgonovo 和 Haus 提出的二元方程式為例(圖 11)[8]：

$$w(x, y) = (x - y)(x - 1)(x + 1)(y - 1)(y + 1) \quad (6)$$

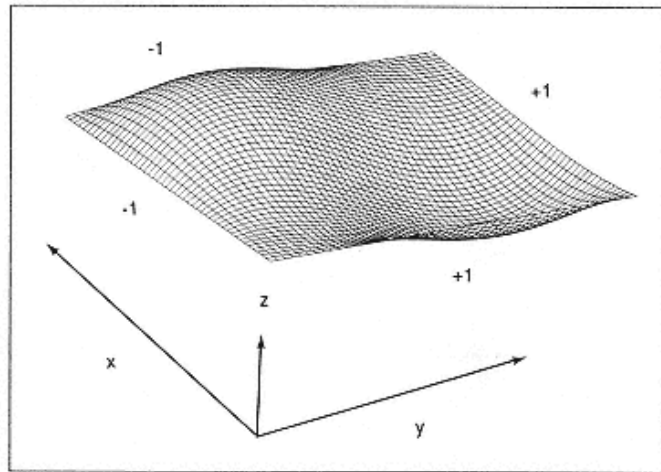


圖 11 方程式 $w(x, y) = (x - y)(x - 1)(x + 1)(y - 1)(y + 1)$ (6) 產生的波域表面[8]

下面則為掃描的週期性軌道，隨時間變化的二元一次方程式：

$$\begin{cases} x = 0.5 \times \sin\left(8\pi t + \frac{\pi}{5}\right) \\ y = \sin(8\pi t) \end{cases} \quad (7)$$

隨著時間 t 變化週期性的跑完軌道，所掃描的波域形成的聲音波形也就是一個完整週期，因此是固定波形的聲音；想要動態的隨時間改變聲音的波形有兩個作法，一是改變軌道，波域不變，軌道隨時間變化；二是改變波域，軌道不變，波域隨時間變化，掃出來的波形就會一直改變。如圖 12 所示，上半部是封閉式掃描軌道，下半部是軌道在波域上的投影掃描出來的波形，而圖 13 則是開放式掃描軌道，週期內掃出來的波形更多變化。

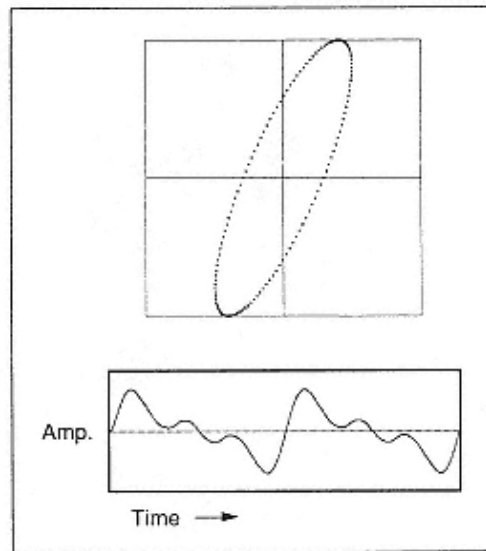


圖 12 (上)掃描軌道(下)波域上掃描投影之波形[6]

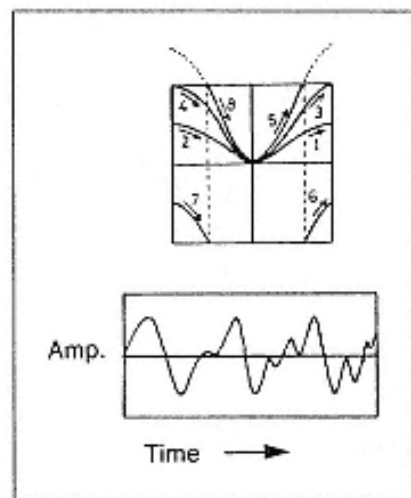


圖 13 (上)掃描軌道(下)波域上掃描投影之波形[6]

2.3.3 掃描合成法

由 Bill Verplank, Max Mathews 和 Robert Shaw 在 1998 年至 2000 年發展的一套適合於表演的聲音合成法：掃描合成法(Scanned Synthesis) [9]。是一個基於心理聲學的合成法，根據我們對音色所聽到的和感受到的觸動回饋(haptic)來操作音色，很適合用在現場即時的表演。因此這個合成法包含了兩種感知的頻率：聽覺頻率和觸覺頻率(haptic frequencies)。聽覺頻率是人耳接收到的頻率響應範圍 20 至 20000 Hz，在音樂上的表現也就是音高，相較於波域合成的音色是取決於一個週期性的掃描方程式，對於聲音的頻率取決於週期性的掃描速度是一樣的，不同的是掃描合成的音色是根據一個特定機

制中給予各個取樣點不同的位置變化而變化，並且這個變化是在一個特有頻率範圍內操弄形變合成的波形，這個特有頻率就是觸動頻率。觸動頻率則是由於掃描合成是一個低速動態的系統而產生 0 至 15 Hz 的頻率，因為這個振動的頻率低於人耳所能接收的最低頻率，因此只會由身體感受到，不會被人耳聽到。

然而，這個在空間中變化的觸覺頻率，若只是隨意且獨立的改變它點的位置而被掃描是不夠的，點與點之間必須有關連性，最基本用來描述一個低速動態的系統就是一維的弦模型(如圖 14)。將這條弦拆成多個元素來看，用有限元素法的概念去逼近這條弦上每個點，並且以牛頓運動定律來描述弦的運動。描述運動的核心模型是建構在 CORDIS - ANIMA 系統上[10]，不同的是，掃描合成法不是直接靠物理建模振動而產生聲音，它一定要透過特有的掃描機制來得到音頻；至於振動的話，掃描合成法會有一個低於 15Hz 的觸覺頻率限制，而非 CORDIS - ANIMA 系統模擬物體做快速振動。

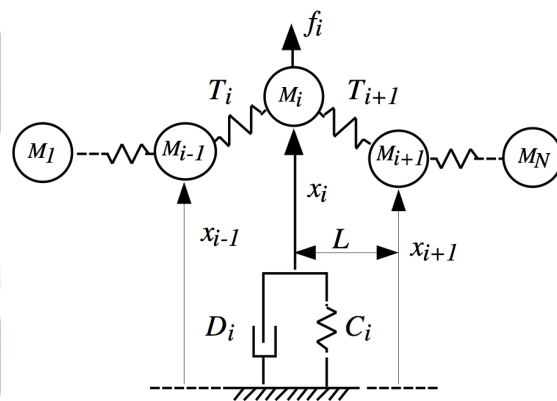


圖 14 有限元素模型來描述一維弦模型[9]

上圖中，把弦拆成：質點(M_i)、鏈結(T_i)、對地的鏈結(C_i)與阻尼(D_i)，這是一個最基本被建構的模型，並用一個觸覺力(f_i)造成質點 M_i 位移，連動其他的質點在這條弦上的位移，造成隨時間變化的低速運動，生成低速變化的波表。

總之，要做到掃描合成的方式有很多種，但最基本的三個元素必須達成[9]：

- (1) 一個低速振盪的動態系統
- (2) 一個在觸覺頻率範圍內且依照表演者操作的控制介面

(3) 一個週期落在聽覺頻率範圍內的掃描機制

2.4 視覺化聲音形塑

人耳可以接收到的頻率響應範圍為 20 至 20000 Hz，這個單位代表著物體以秒為單位做振動的次數，而物體振動造成介質傳遞能量的過程中有疏密波，讓耳朵可以在特定的頻率區間接收到；而視覺則是不同，當物體做快速振動時眼睛會無法感測到，因此本論文所探討的物理動態，皆是低速的物理動態；而談論到以有限元素模型作為物理建模並且應用在音樂上，可以追溯到 Claude Cadoz [10]和 ACROE¹²研究組織，在 1970 年代開始發展至今。

2.4.1 CORDIS – ANIMA

CORDIS – ANIMA 是一套數位式即時物件建模與模擬系統，在西元 1978 年由 ACROE 發明的，是現今許多以質點彈簧系統為主要模型架構的合成法的始祖，例如上一章節提到的掃描合成法，用有限元素概念構成的一維弦模型便是以此系統為基礎架構做延伸。此系統被模擬的物件有三種特性，它具備視覺性、聽覺性以及操縱性，由這個系統所構成的核心工具應用在電腦音樂(CORDIS)和動畫影像(ANIMA)[10]。

此模擬系統是以物理化的模組所拼湊，將整體拆成兩個最基本的單元：M 點和 L 點，而這兩個基本單元都各自有一個輸入和輸出。如圖 15 所示，M 點的輸入是力，輸出的值是位置；L 點則是相反，輸出的是力，輸入則是位置。

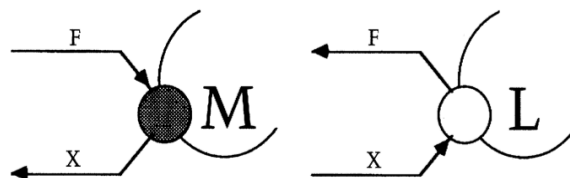


圖 15 M 點和 L 點的屬性[10]

¹² 由 Claude Cadoz, Annie Luciani and Jean-Loup Florens 在 1976 年發起的組織，致力於藝術科學技術的研究，發展各樣的創作工具，不論是硬體或軟體

一套物理性質的系統要做到物件的模擬，最小元素們彼此間相連但要離散，並且在有限的維度下完成，勢必要藉由微小物件的構成來完成，將這些物理的溝通轉變成為點對點的機械式溝通。一個 M 收到外力後傳出受力後的位置，一個 L 接受來自 M 的位置後回饋一個散射或反射的作用力，再次回到 M，形成一個最基本的物件集合；延伸物件之間的連結形成集合，當一個 M 連接多個 L，受到多個 L 傳遞的力，就把這些力加總起來；但是反過來則不行，一個 L 無法連結多個 M，無法把多個 M 傳過來的值做加總，因為位置有方向性，L 最多只能連結兩端的 M 將彼此間的作用力與反作用力做傳遞。

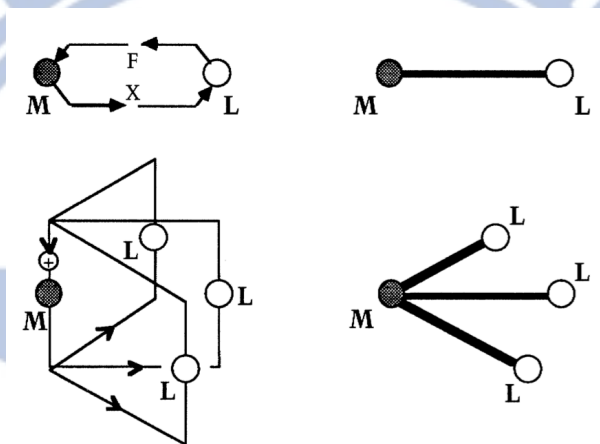


圖 16 M 點與 L 點的基本連結[10]

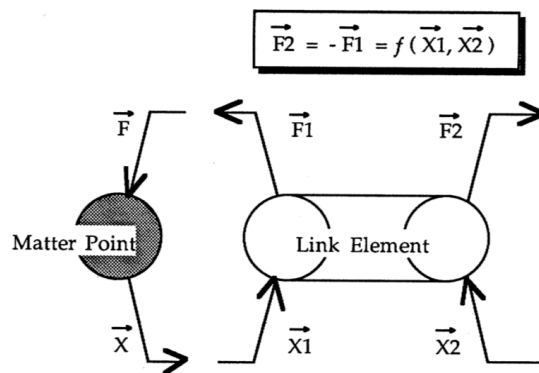


圖 17 M 點與 L 點的基本傳遞[10]

將這些基本的集合再一一串連結成純物理結構的網路拓撲(network topology)，可以形成二維或高維度不同型態的拓撲。

2.4.2 pmpd

pmpd 為一個設計給 Pure Data 專門處理物理建模的系統，這個系統最核心的兩個物件是虛擬的質點(virtual masses)與黏彈性的鏈結(visco-elastic link)，根據 CORDIS - ANIMA 系統理對 M 和 L 的描述，用上述兩個物件來建構一個質量彈簧網路結構[11]。

質點是具有質量、有慣性，但是沒有體積的，藉由牛頓運動定律簡單描述受力後的加速度與位置：

$$\Sigma F = m\alpha \quad (8)$$

鏈結溝通兩端的質點，接收兩端質點的位置，傳送力給兩端質點，力的產生由兩種力而得：彈力與阻力。根據虎克定律知道，給定已知位置(x)以及鏈結本身的彈性係數(k)便知道力：

$$F = kx \quad (9)$$

又知道鏈結在受力時間內的位移，產生了速度(v)以及自身的阻尼係數(d)：

$$F = dv \quad (10)$$

將兩種力做加總便是此黏彈性鏈結(visco-elastic link)所輸出的力總和：

$$F = kx + dv \quad (11)$$

質點與鏈結根據不同的維度而有對應的物件，質點是什麼維度，鏈結就要選用同樣維度配合質點，接錯則會產生物件無法識別，如表 2 所示。

表 2 質點與鏈結對應

	質點物件	鏈結物件
一維	mass	lia/link
二維	mass2D	link2D
三維	mass3D	link3D

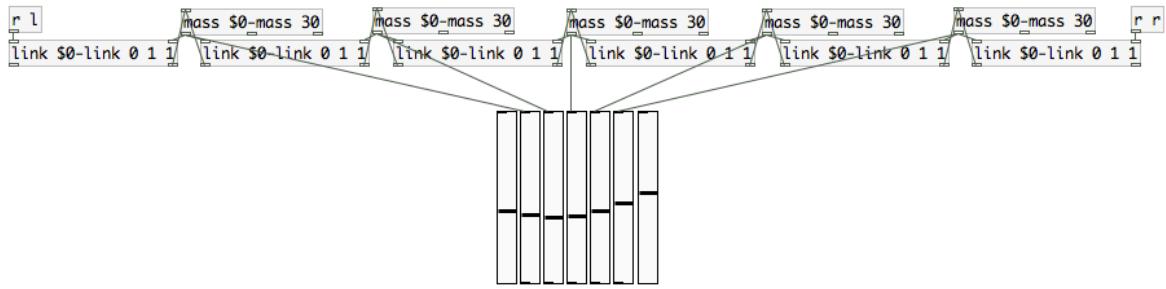


圖 18 物件 mass 和物件 link 做一維弦模型之模擬

在 Pure Data 上實作也是以物件的概念組合，物理的運動型態與結構也會因為組合不同形成各種類型的拓撲，也就是說即使質點數量一樣，與鏈結相接的方式不一樣都會有所不同(如圖 19)。

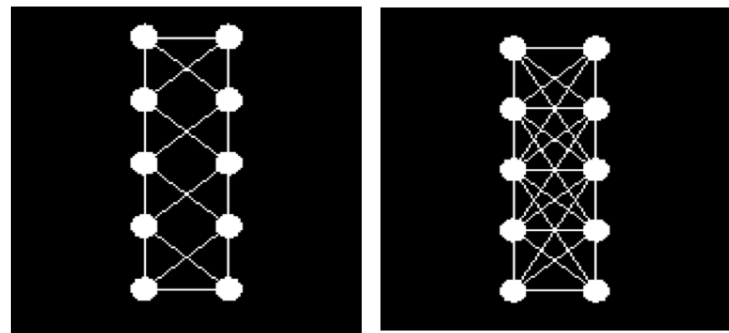


圖 19 不同型態的拓撲[11]

描述物體結構在畫面上的運動，需要一個外部排程器不斷做訊號的觸發，將畫面連貫起來，如同動畫的原理是將不同的圖片根據影格率(frame rate)連貫起來；而人類的眼睛因為視覺暫留現象，可以以畫面影格率大約 10 至 12 的量值讓畫面看起來連貫，如圖 20 所示，以每 50 毫秒觸發一次，也就是一秒內畫面更新 20 次。

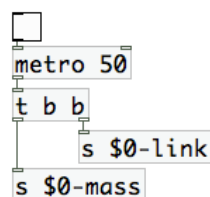


圖 20 質點與鏈結的更新率

除了質點和鏈結物件外，另外還有兩個輔助型的物件：互動物件和偵測物件。互動物件提供了不論是對整體物件、對環境的互動，也因為跟整體的質點在空間中的運動有關，針對環境、圓圈、線條、線段、球面結構、平面結構、環狀結構與圓柱結構等做相對不同的作用力與製造重力場，而偵測物件如同質點物件與鏈結物件的關係一樣，是為了配合互動物件而計算運動位移的物件，互動物件與偵測物件都分別有二維與三維，因為種類繁多，不在本論文一一詳述其功能。

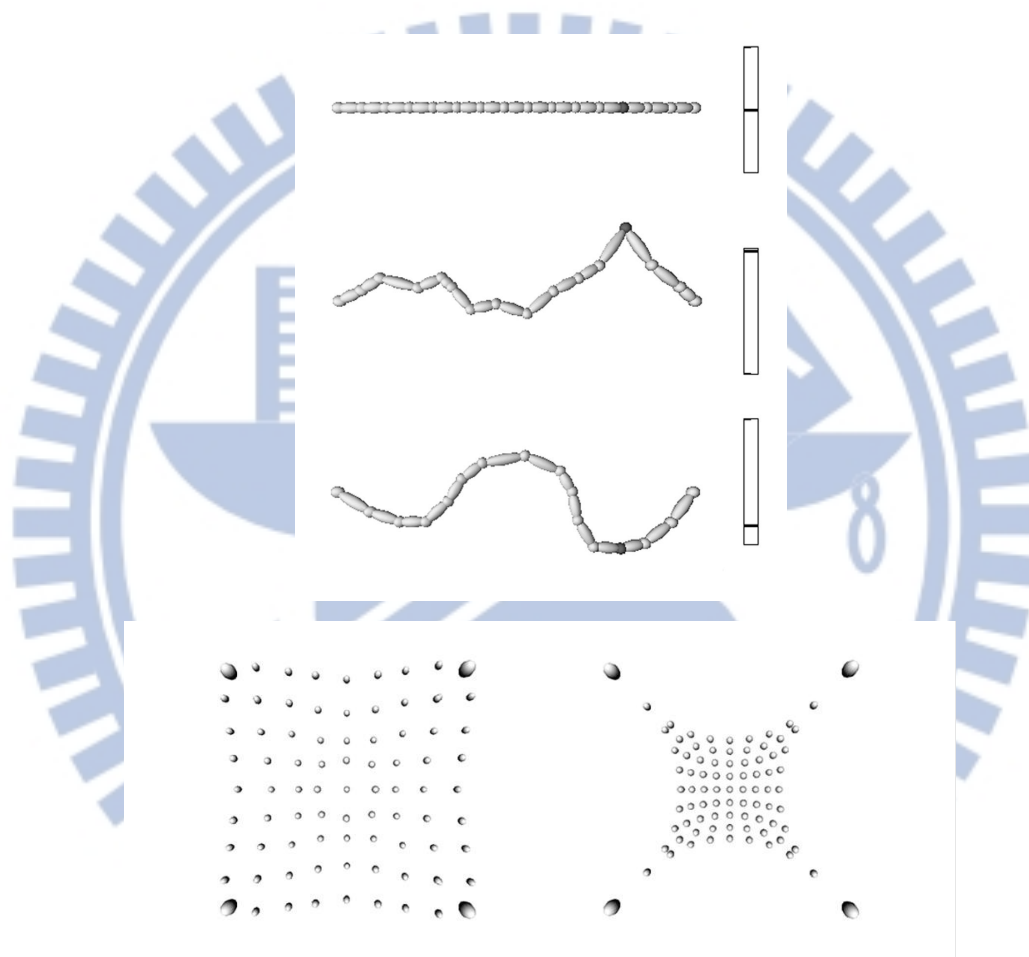


圖 21 (上)一維模型做二維度運動(下)二維模型做一維度運動[4]

以質點的數量對應到物件或物件副程式的數量，因為是一對一所以是直覺的，鏈結也根據質點的位置在 Pure Data 上圖形化介面直接拉線即可，但是當結構複雜或是數量過多時，所耗費的時間成本太高，希望可以靠矩陣型態記錄所有的質點與鏈結，因此 chdh 在 2011 年的時候釋出了 pmpd 0.10 版本，最大的改善就是提高了質點與鏈結物件在宣告時的速度與完整性，藉由數值陣列式的呼叫出抽象型態的質點與鏈結，再透

過不同的演算將質點與鏈結連接好，這樣的方式節省了設計與實作過程所花費的時間，詳細的物件介紹與實作，會在之後的第四章作更詳細的說明。

2.5 相關實作

掃描合成法被發明時有一個很獨特的地方，就是強調表演者對於音色的操控[9]，因此以下列舉的一些實作，都是跟介面或是電子樂器做整合，以「掃描式合成樂器」為主題，討論其中手勢(gesture)的操作與參數的對應[12]。

2.5.1 音源軟體

市面上主打掃描式合成法的 VSTi(Virtual Studio Technology instrument，虛擬音源軟體)少之又少，最有名或說幾乎唯一的就是『Scanned Synth Pro』(圖 22，左)，是第一套做成商用軟體用的外掛音源，是由 Humanoid Sound Systems 公司出的，音色飽滿多層次且充滿電音感很重。後來又出了可相容的版本『Scanned Synth Mini』(圖 22，右)，用的是同一套開發引擎，並且在使用者介面上精簡許多，雖然多了很多控制上與音色調變權限的限制，但是隨機篩選功能把各項參數都預設好，用起來也是挺方便的。



圖 22 Scanned Synth Pro 和 Scanned Synth Mini 的介面

(資料來源：<http://www.humanoidsounds.co.uk/>)

2.5.2 iPad 音樂軟體

而對於操弄波表與顯示波表兩者，在二維上的表現是最直覺的，以『The Wablet』

[13]為例，這是一個基於掃描式合成的聲音合成軟體，同時在畫面與操作介面上以多點觸控操作，利用物理運動特性來描述二維空間中多種不同形式的網格，可以即時操控網格形變、拖拉網格中的聲音合成路徑變化以及各項物理參數(見圖 23)。

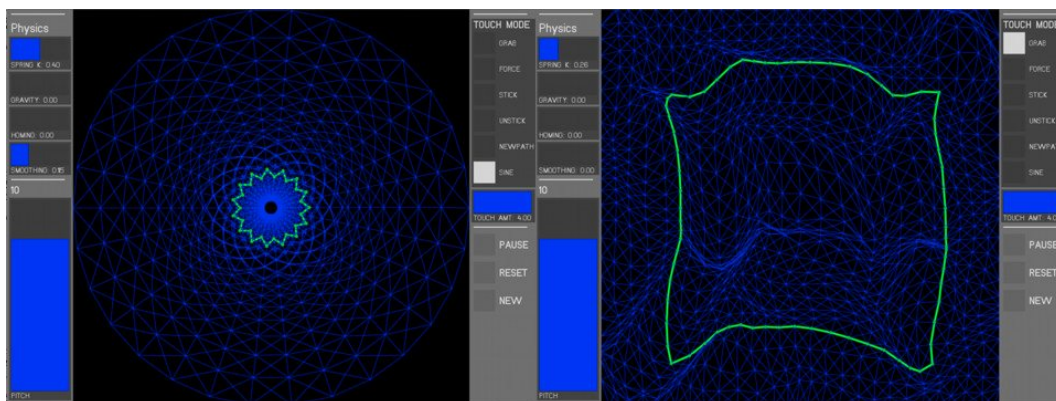


圖 23 The Wablet 的介面
(資料來源：<http://createdigitalmusic.com/>)

另一個軟體是最近新出的『SpheroSampler』(圖 24)，這是一個罕見的操作介面，用 3D 球型的方式即時錄放聲音，介面上兩個球體，可以藉由手的滑動更換錄音的音軌位置和播放速度(見)，猶如 DJ 的工作一樣；雖然這個軟體不是用到掃描式合成法，但是它的表現方式與循環模式也有掃描的味道。

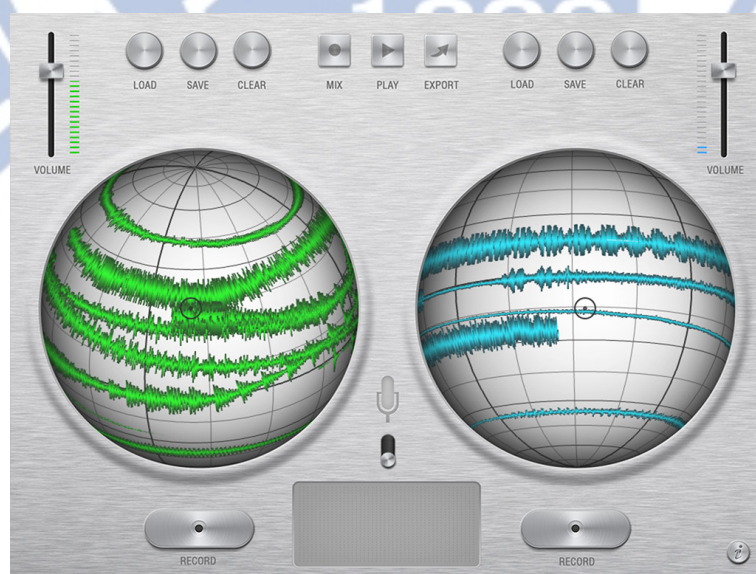


圖 24 SpheroSampler 的介面
(資料來源：<http://spherosampler.com/>)

2.5.3 電子樂器與裝置

關於如何操弄掃描的方式，探討的就是音樂新介面與表現(New Interfaces for Musical Expression，簡稱 NIME)，不論是以現成的手勢裝置(gesture device)，像滑鼠、數字鍵盤和電子手繪板等電腦輔助裝置，作為輸入對應參數的方式建立一個平台[12]，或是結合陣列式的控制器『the MATRIX』，把聲音取樣後做離散式的動態掃描[14]，又或是結合各樣感應器做成的樂器『The Squiggle』、『The WaveSaw』 [15, 16]和接觸式體感感應器『MiniBioMuse-III』偵測肢體肌肉脈動[17]，以及用即時影像偵測，利用光打在水面上的漣漪反射，數值化後轉換做對應[18]等，都是很創新的表現介面。



三、物件與結構設計

3.1 音像系統架構

本系統在整體架構的設計上可以分成控制介面、音像演算程式兩大部分。如圖 25 所示，控制介面為指令輸入與監視功能，分為預置調變與即時調變；輸入的參數對應到音像演算程式，以 pmpd 物件為主體，連結其他邏輯運算子程式後做音訊與影像處理，最後送出的音像輸出會回傳給控制介面中的顯示介面做監控。

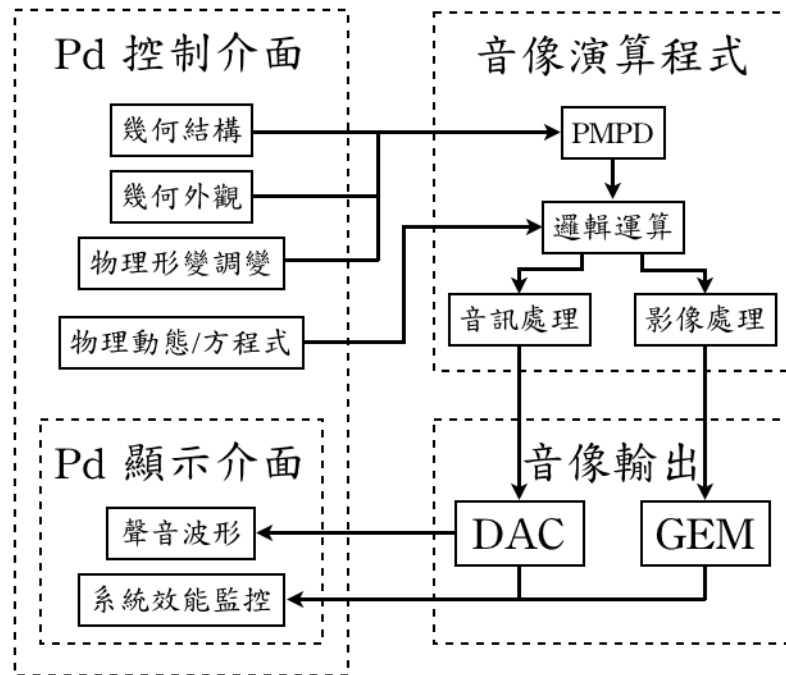


圖 25 系統架構圖

3.1.1 開發環境介紹

本系統與介面是用圖型化介面的即時影音處理程式 Pure data 實作完成，指令的函式皆由物件的形式做處理，透過拉線的方式完成物件與物件之間的溝通。模擬物理動態的物件是 pmpd，在本論文的章節 3.3 會做詳細介紹；影像的處理與輸出是透過 GEM

系列的物件完成，GEM 的全名是多媒體製圖環境(Graphics Environment for Multimedia)，包括產生畫面視窗、描繪畫面中的幾何物件、物件在三維空間中的運算和打光與色彩處理等，是處理數位音像的必要物件。聲音的處理是透過物件 dac 將數位訊號傳給電腦內建或是外接的聲卡做處理。

3.1.2 球座標的應用

傳統在表現三維度時，都是用直角座標系(笛卡爾座標系)為座標軸，對應三個維度的代表的物理意義；此研究用球座標表現的用意，除了希望對應的座標軸具有物理意義外，也希望讓聲音的表現針對讀波表這件事有循環性，即便隨著時間變化，在座標上的刻度不會無限延伸，而是在一個封閉的曲面上呈現。

在 GEM 環境中的三度空間預設是以直角座標系表示，因此要透過座標轉換公式將已知的球座標系的三個分量(r, φ, θ)轉換成直角座標系的三個分量(x, y, z)後，給定各分量區間範圍，在 GEM 視窗上描繪出來。

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

$$0 \leq r \leq 4, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

由上式知道，當 $r = 0$ 時， θ 和 φ 都失去意義；當 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 時， φ 失去意義。

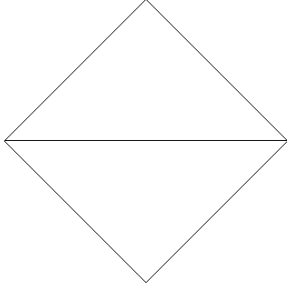
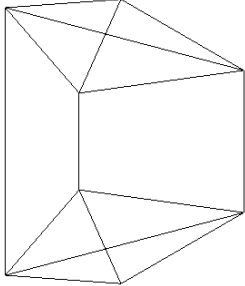
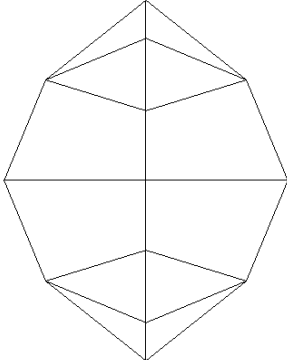
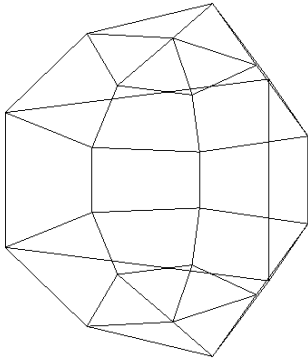
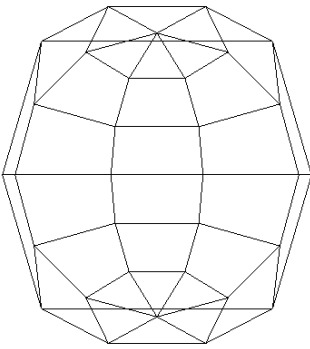
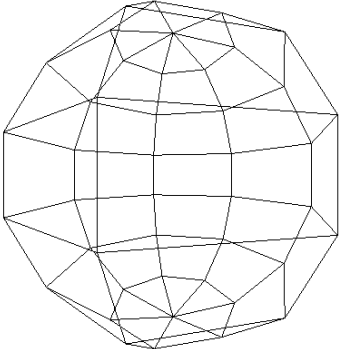
3.2 幾何外觀設計

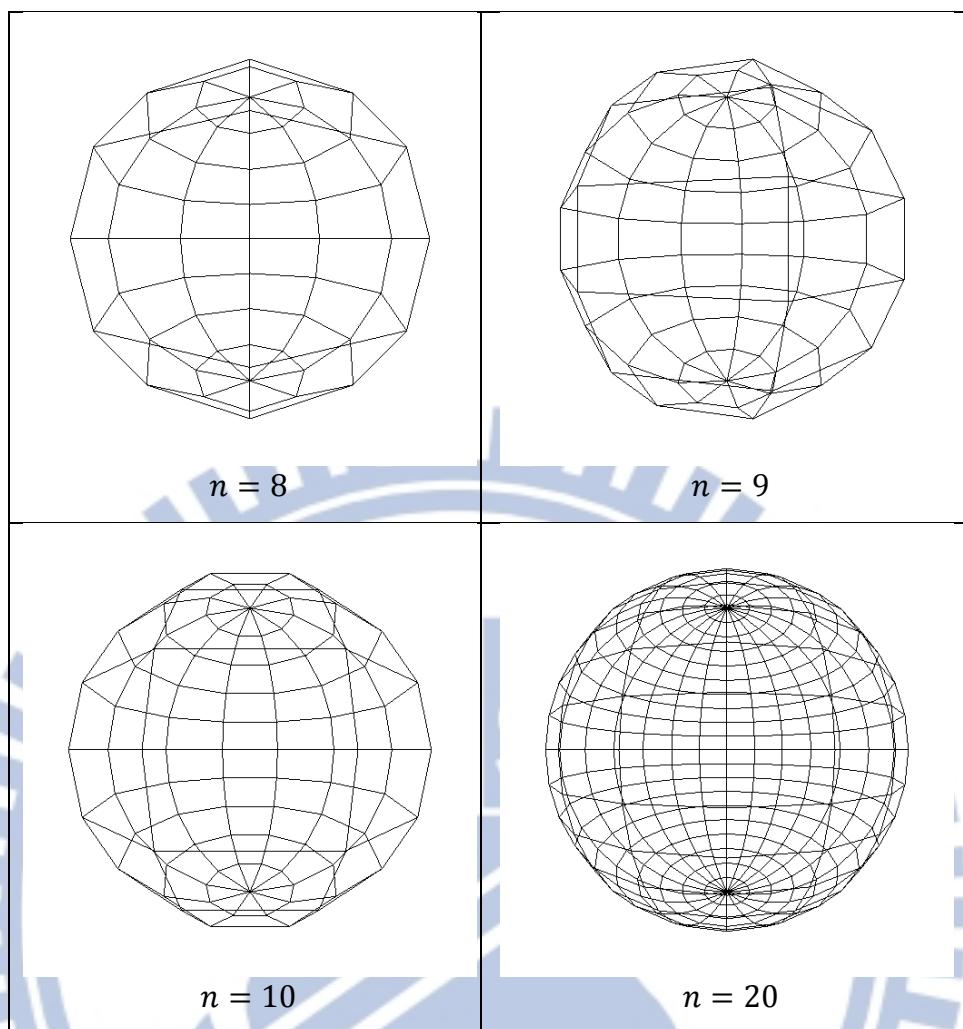
3.2.1 骨架結構

建立球座標下的幾何結構是遵循 GEM 中一個建構球面的物件 sphere 的線條原理所構成，此物件可以接收三種資訊，分別是：描繪成點線面、大小和球缺(segments)。球缺是由 θ 方向和 φ 方向在區間範圍內可以由鄰近點所連成的線段數目而決定，但是因為用物件 sphere 描繪的球面如同靜態貼圖一般，無法任意變動球面上各點的物理量，

因此改以獨立建構點、線、面的方式來描繪球面，球缺從 $n = 2$ 到 $n = 20$ 。

表 3 球缺與球面結構

 <p data-bbox="560 801 644 837">$n = 2$</p>	 <p data-bbox="1043 801 1128 837">$n = 3$</p>
 <p data-bbox="560 1317 644 1352">$n = 4$</p>	 <p data-bbox="1043 1317 1128 1352">$n = 5$</p>
 <p data-bbox="560 1823 644 1859">$n = 6$</p>	 <p data-bbox="1043 1823 1128 1859">$n = 7$</p>



球面的結構又可以看做是地理結構， θ 方向是緯度， φ 方向是經度，靜止狀態時的球面半徑為 2，而各個質點就坐落在以半徑為 2 畫出的圓弧線上，質點的位置把弧線做等分。

3.2.2 色塊對應

為了方便觀看球面上各點、線、面的運動情形，在 r 的徑向方向根據高度做 RGB 色彩模型的組合變化，紅色最高，藍色最低，設一個三維陣列 (Y_R, Y_G, Y_B) 來記錄浮點數量值，以聲音振幅的範圍 -1 至 1 來看，定義小於 -0.75 和大於 0.75 的值對應到 RGB 色彩模型的藍色和紅色，以 r 的值範圍來對應的話就是 0.5 至 3.5，透過下面的轉換式便能得到對應色彩變化分別在藍色(0,0,1)、綠色(0,1,0)和紅色(1,0,0)之間變化的值。

$$Y_R = \begin{cases} 1, & r > 2.75 \\ \frac{4}{3}r - \frac{8}{3}, & 2 \leq r \leq 2.75 \\ 0, & r < 2 \end{cases}$$

$$Y_G = \begin{cases} -\frac{4}{3}r + \frac{14}{3}, & 2.75 \leq r \leq 3.5 \\ 1, & 1.25 < r < 2.75 \\ \frac{4}{3}r - \frac{2}{3}, & 0.5 \leq r \leq 1.25 \end{cases}$$

$$Y_B = \begin{cases} 0, & r > 2 \\ -\frac{4}{3}r + \frac{8}{3}, & 1.25 \leq r \leq 2 \\ 1, & r < 1.25 \end{cases}$$

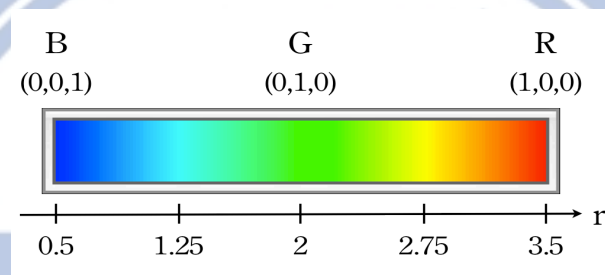


圖 26 r 值對應 RGB 色彩

3.3 物理動態應用

由 *pmpd* 的核心物件 *pmpd* 作物理動態運算，根據 CORDIS - ANIMA 系統提出的質點與鏈結概念，用 401 個質點和 800 個鏈結連結成一個球面，800 個鏈結中又可分成 θ 鏈結和 φ 鏈結，除了頭尾兩個質點是固定點之外，每個質點都會連接兩條 θ 鏈結和兩條 φ 鏈結，每條鏈結上都有基本阻尼係數 D 與彈性係數 K ，分別調整黏滯性與剛性。

3.3.1 一維與二維運動

描述各個質點在球面上的運動情形，以「點」的運動開始描述一維運動；質點在 r 的徑向方向根據給予質點不同的受力時會根據質點的質量、鏈結的彈性係數、阻尼係數做一維的運動，當施予一個固定的力時，所有的質點在自己的位置上做簡諧式的振盪，而在「線」上的表現會有兩種型態：一是垂直於 r 方向的橫向波導，也就是沿著 θ 方向將能量由受力質點往兩邊傳遞；二是平行於 r 方向的擺盪，將線上所有質點看做是一體

做整個包絡線的運動，這是線的二維運動。

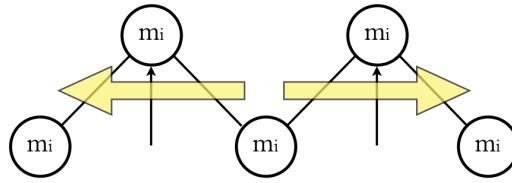


圖 27 質點運動將能量沿 θ 方向傳遞

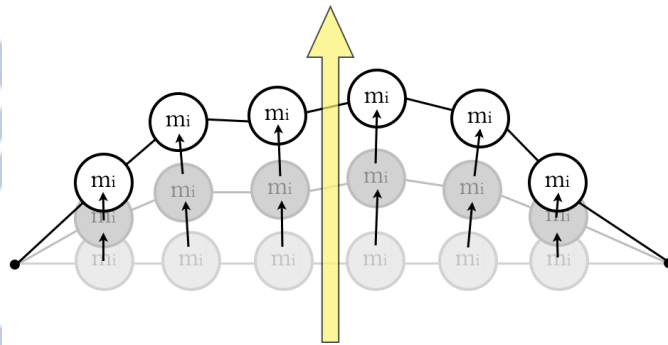


圖 28 整體質點集結成線做 r 方向運動

3.3.2 三維運動

延續「線」的型態，集結成「面」，因此「點」的運動造成整個球面做三維運動，也就是球面上因著沿 r 的徑向方向運動的振盪，造成能量傳遞給周圍的質點，此能量同時沿著 θ 方向和 φ 方向傳遞，形成球面波。(見圖 29 圖 30)

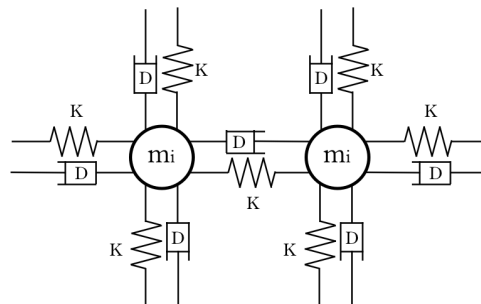


圖 29 質點與鏈結在面上的位置關係

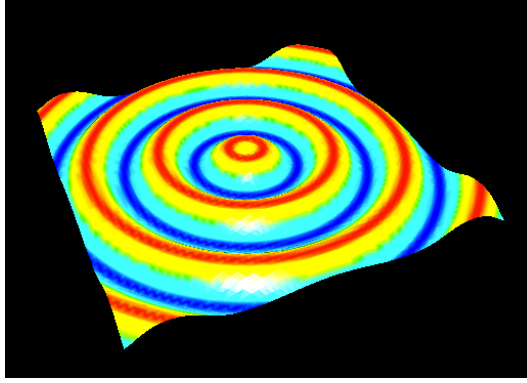


圖 30 球面波表現在 xy 平面

波的傳遞除了整體球面上下兩邊的端點外沒有其他邊界，這表示波動會因為球面的特性不斷循環，直到能量消散或是被反方向的能量波互相抵制。此球面的物理動態應用，運動範圍落於 $0 \leq r \leq 4$ ，之所以給定這樣的限制原因有兩個：一是因為物件 *pmpd* 只能處理一維方向的運算(處理二維和三維的分別是物件 *pmpd2d* 和物件 *pmpd3d*)；二是因為如果在球面上的質點增加了 θ 方向和 φ 方向維度的運動的話，球面的結構就會因為阻尼與彈性的係數調變而破壞整體形變，各個質點無法回到原本的網格上，這也是為什麼單使用物件 *pmpd* 的理由。

3.4 聲音合成對應

3.4.1 球缺與波表對應

聲音的合成的核心是整合掃描合成法和波域合成法，藉由物件 *pmpd* 動態的產生質點與鏈結位置，直接對應在波形的取樣點，並且可以隨著球缺的變化很即時又動態地改變波表。波表的大小根據球缺做對應，當球缺 $n = 2$ 時，波表顯示的一個動態取樣點，加上了兩邊的端點總共三個取樣點，掃描波表就是最基本的擺盪三角波。

記錄波表的方式是一個隨索引儲存長度變化的波表，而此波表有兩種記錄方法：一是不固定波表長度，隨著球缺改變而波表大小跟著改變，也就是動態波表，球缺數(n)對應的波表為 $T((n - 1) + 2)$ ，其中的減 1 是因為取樣點數比球缺數多 1，加 2 是因為兩邊的端點(見圖 31)。二是固定波表長度 $T(21)$ ，隨著球缺改變而波表大小不變，對於

當下變化的索引 n_t 而言，索引之後的數值皆為零： $n_t < n \leq 21$ ， $y(n) = 0$ 。(見圖 32)
 以上兩種方式皆可以以此類推到球缺數 $n = 20$ 時，聲音的變化也會隨著波表取樣點變
 多而越來越豐富。

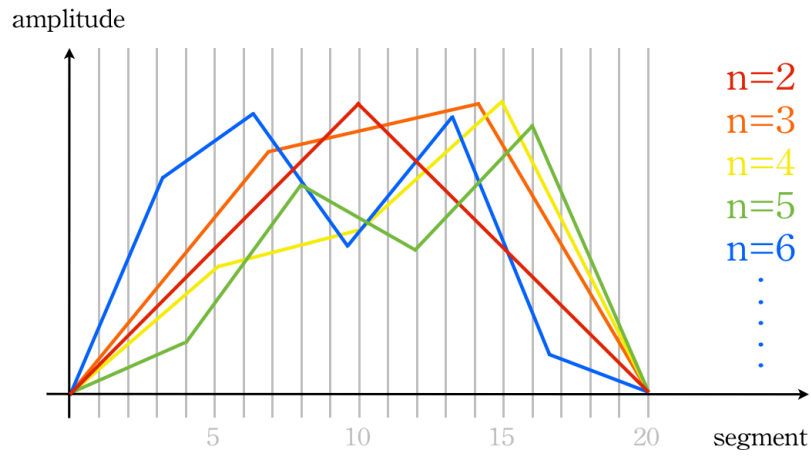


圖 31 動態波表

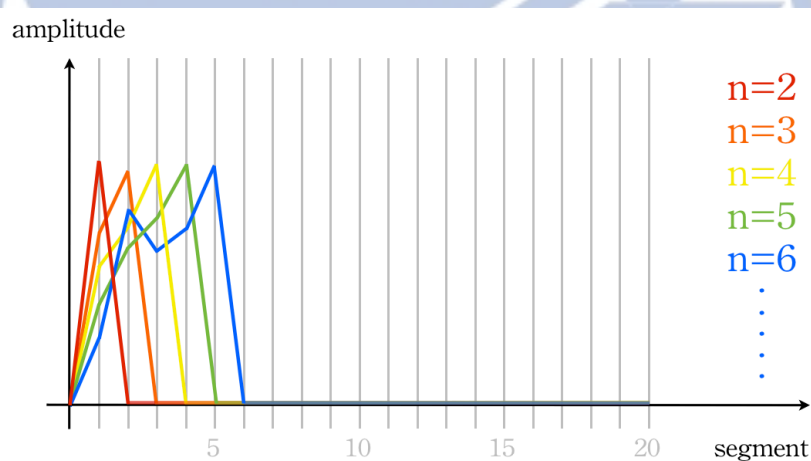



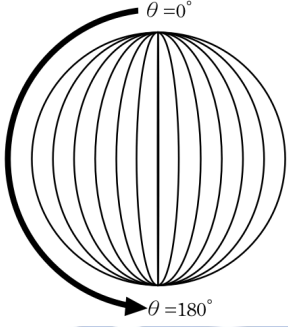
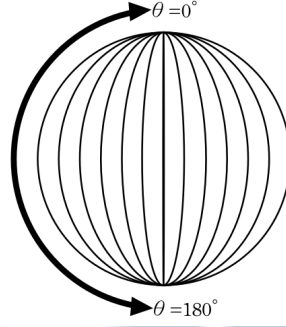
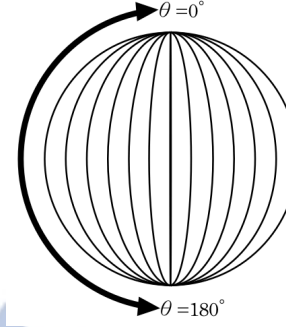


圖 32 固定波表

3.4.2 掃描對應

將鏈結所連接的線段定義是軌道，因此有兩種軌道： θ 軌道與 φ 軌道。 θ 軌道是由
 兩端點之間所形成的封閉曲線，軌道的長度範圍為 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ ，可以分為循環式
 掃描和來回式掃描，循環式掃描是以一個鋸齒波當做索引，而來回式掃描又可以分成
 三角波和正弦半波為索引，差別在於直線與曲線的方式掃描，見表 4。

表 4 掃描波形與方式

掃描波形	 鋸齒波	 三角波	 正弦半波
圖示			

φ 軌道沒有固定的兩個端點，軌道範圍為 $\varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$ ，不同於 θ 軌道的是 φ 軌道有方向性，直角座標上從 z 軸往下看 xy 平面的話，兩個方向分別是順時鐘和逆時鐘，此軌道並不是對應什麼參數，而是讓球面根據 K 值和 D 值形成的球面波傳遞路線(圖 33)。

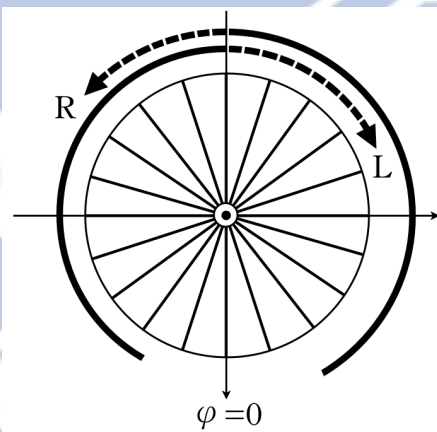


圖 33 φ 軌道的波動

掃描的頻率就是聲音的音高，引用康丁斯基所言：『不同樂器表現的音高就是線的寬度：小提琴、笛子、短笛的線是細的，中低音提琴、豎琴的線稍粗。音越低，線越粗，最粗的是低音喇叭或低音提琴。』[19]，因此音高就對應到球面上「線」的寬度，頻率越低，線段越寬；反之頻率越高，線段越細。『音樂的最弱到極強都可以用線的精細或明亮度表之。』[19]，所以聲音的大小聲則是對應到「面」與「線」的透明度，或以明亮度來表示之。

3.4.3 倍頻對應關係

固定波表以單一頻率掃描時，波形裡面隱藏了其他頻率項的資訊而有不同的倍頻；而動態波表更是可以強調出倍頻的表現，因為波形不斷變化的緣故，隱藏的頻率成分隨著時間做消長，聽覺上更可以感受到倍頻的變化(見圖 34)。倍頻的對應方式和球缺有關，球缺數就是倍頻數的最大值。

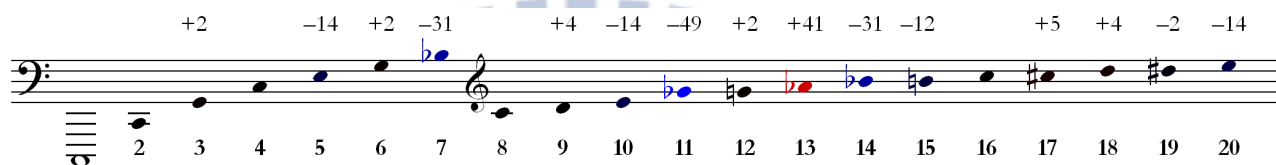


圖 34 倍頻關係的泛音列

(資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/File:Harmonic_Series.png)

當給予球面一個力時，波動會根據施力點所在的 φ 區間為中心分別向右及向左傳遞，以球缺數 $n = 20$ 為例，傳遞的過程中會經過十九個區間，這十九個區間就是對應到以施力所在的 φ 區間為基頻的其他十九個倍頻(見圖 35)，而每一次施力給的觸發，都以施力點為基頻，因此當波的傳遞尚未結束時又在別處給予另一個力時，就會發生不同倍頻因為在球面的同一處能量累積特別高而大聲。

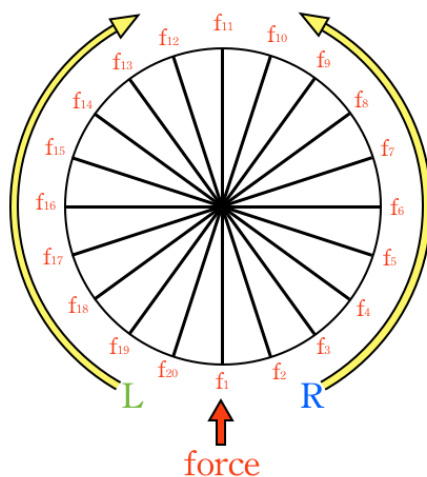


圖 35 倍頻對應關係

四、軟體介面實作與操作

本章節開始介紹軟體的內部程式與軟體介面是如何實作與操作的，根據第三章的設計理念，於 Pure Data 上撰寫，程式的核心用 pmpd 0.10 版本的物件 *pmpd* 做物理動態運算。同時也設計一個操作介面，讓影像的資訊顯示在 GEM 視窗上。

4.1 質點彈簧物件宣告

如前面章節所提，物件 *pmpd* 的運作方式，需要一個固定頻率的外部訊號做觸發；GEM 在程式端要連結欲產生的物件描繪在 GEM 視窗，都是用物件 *gemwin* 管理 GEM 視窗，並以物件 *gemhead* 產生描繪的圖像。物件 *gemwin* 可以設定影格率(frame rate) 以每秒 N 次，也就是每 $1000/N$ 毫秒發送一個撞擊訊號，而本程式的影格率是 25 fps，因此物件 *pmpd* 便能以 40 毫秒運算一張影像，並在 GEM 視窗上清楚描繪物理動態。

由於質點在被宣告前都會做重置，因此本程式的作法是先設好 401 個質點(masses)，設成固定點並且放置在原點，等到變換球缺時再照順序一一放置(圖 36 為球缺數 $n=20$ 時的編號全貌)。 θ 方向為連續編號的串接， φ 方向則以 θ 方向二十個質點為一排做進位，也就是，每個質點與四周鄰近質點在編號上的關係： θ 方向各差 1， φ 方向各差 20。凡是編號為二十的倍數皆為固定點(下端點)，最後一個 no.400 也為固定點(上端點)，而每個質點的質量設為 100。

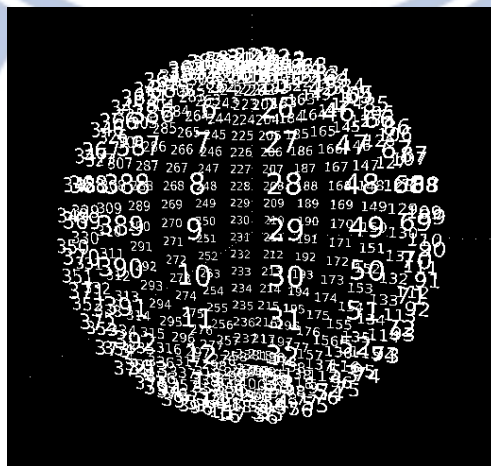


圖 36 質點編號順序

整個系統的物件宣告流程如圖 37 所示。宣告出質點後，縱向使用 θ 鏈結(theta links)連結，橫向則以 φ 鏈結(phi links)做連結，鏈結的阻力初始值設定為 10，剛性設定為 0.1，最後給定質點的邊界值，也就是 r 的運動範圍介於 0 至 4 中間。

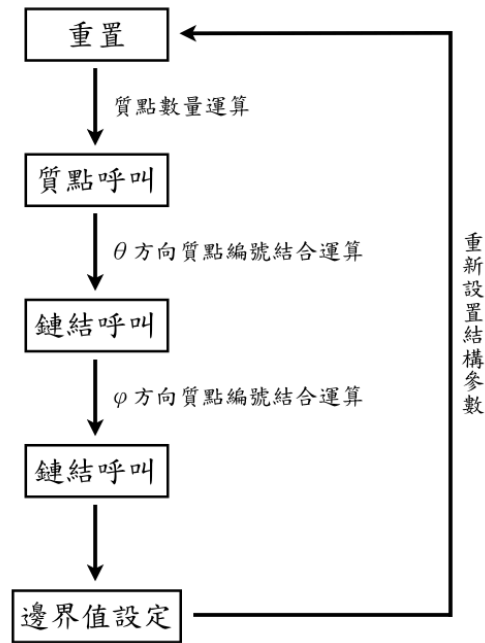


圖 37 起始宣告流程圖

質點與鏈結的屬性資訊，可以印下來，在 Pure Data 的 console 介面上看到，質點的資訊列表包含了：{ 編號，名稱，活動性，質量，阻尼，位置，速度，受力 }，如圖 38 所示，而鏈結的資訊列表包含了：{ 編號，名稱，質點一，質點二，剛性，阻值，硬度距離平方，鏈結長度，鏈結最大長度，鏈結最小長度 }，如圖 39 所示。

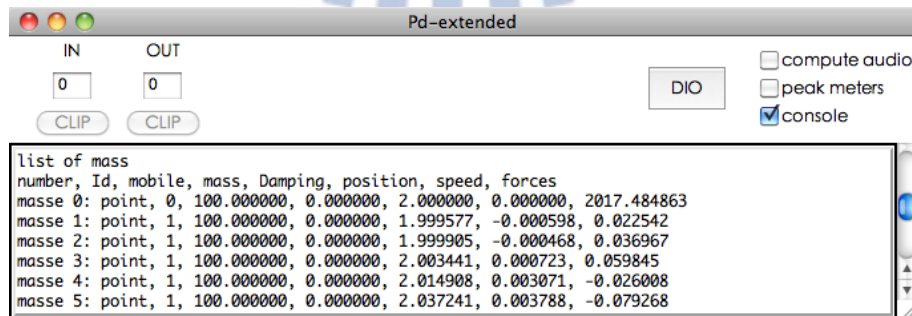


圖 38 質點屬性資訊

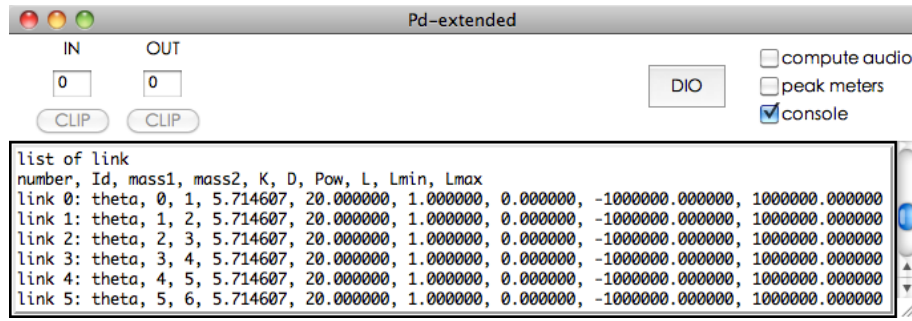


圖 39 鏈結屬性資訊

當質點被宣告出來，在原點位置連接好鏈結等待，除非被宣告成移動點，它的狀態是固定點就不會受到運動的影響被牽動，所以為了可以即時的增加球缺數，也為了即便任意變換球缺也不會因為任意點回到原點(端點)持續運動而造成破面，因此設置了兩個子程式 *pd Mobile_loop* 和 *pd Fixed_loop* 來即時處理質點的移動屬性，如圖 40 所示。

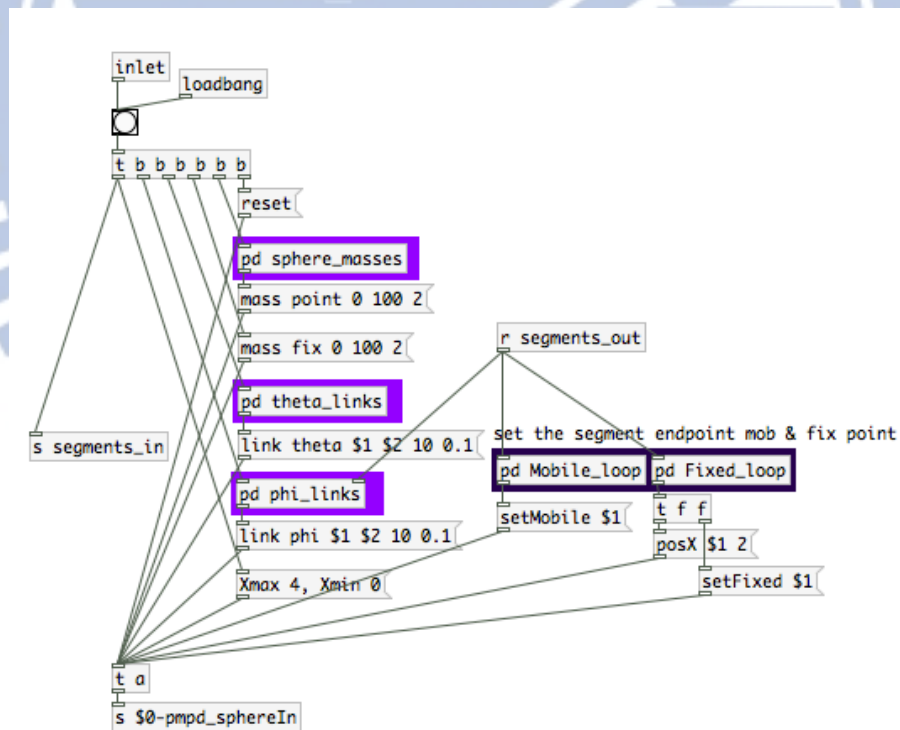


圖 40 質點和鏈結的宣告

4.2 GEM 結構描述

4.2.1 座標軸轉換

質點與鏈結宣告完後，便開始設計聲音與影像的對應，建構整個球面，首先要做的是清楚顯示座標軸，讓 3D 物件在 GEM 視窗上知道方位，作法是改編 chdh 所寫的副程式 *ch_gemwin.pd*，此副程式不僅在 GEM 視窗上顯示座標軸(如圖 41)，更提供了使用者用滑鼠旋轉與縮放座標軸視野，使用電腦滑鼠操作來說，按住左鍵做水平位移即是以 GEM 畫面的 Y 軸為軸心做旋轉，按住左鍵做垂直平移即是以 GEM 畫面的 X 軸為軸心做旋轉，按住右鍵做垂直位移即是以 GEM 畫面的 Z 軸為軸心做縮放。

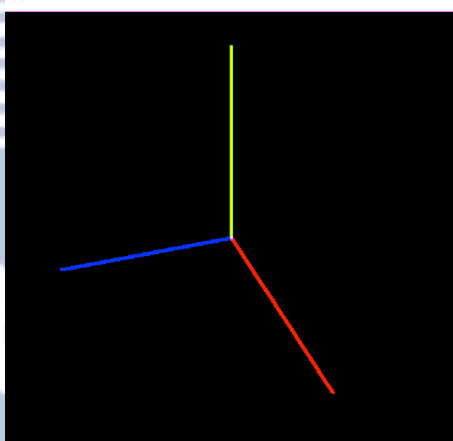


圖 41 GEM 直角座標軸

副程式 *pd gem_structure* 藉由 *\$0-pmpd_sphereOut* 將物件 *pmpd* 傳來的訊息傳遞下去，而此程式中只接收了物件的位置，因此訊息包含了質點編號和質點位置，因此每次在做對應時，都需要先抓到質點編號後，再把質點的位置丟進轉換，確保是此刻質點的位置後再做下一個質點的位置運算；質點的位置先以 θ 方向描繪(圖 42)，再以 φ 方向描繪(圖 43)，描繪的排列方式依照以下自行推算的公式：

$$M\theta_i = 180^\circ \times \left(1 - \left(\frac{n-i}{n}\right)\right), i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13)$$

$$M\varphi_i = 360^\circ \times \left(1 - \left(\frac{n-i}{n}\right)\right), i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

其中 n 為球缺數， $2 \leq n \leq 20, n \in N$ 。輸入以球面座標的度數為刻度排列，用物件 *deg2rad* 將度數轉成弧度，再透過轉換成直角座標參數對應。

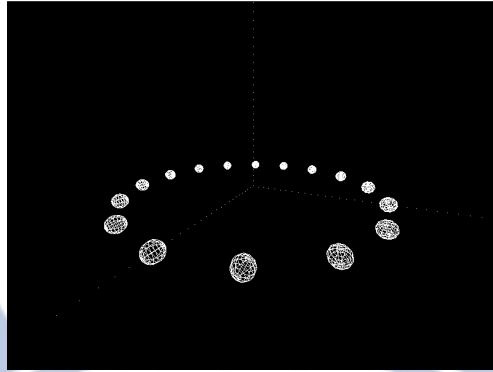


圖 42 θ_i 方向排列

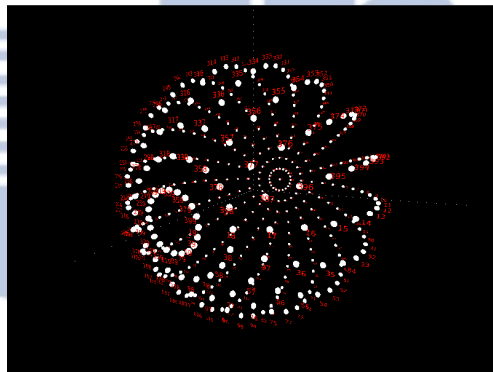


圖 43 θ_i 方向與 φ_i 方向排列

而為了使畫面更直覺、更貼近地理座標表示，因此最後更換了座標軸順序，做了一個以穿過原點的向量 $\vec{r}(1,1,1)$ 為旋轉軸，做 -120° 的座標旋轉。

4.2.2 質點與鏈結算圖機制

物件 *pmpd* 運算機制很快速，但是還是會因為影格率 N 不得不產生一個小延遲 $1000/N$ 毫秒，事實上這個小延遲就是 *pmpd* 內部的一次運算週期，包含了 401 個質點與 800 個鏈結(400 個 θ 鏈結與 400 個 φ 鏈結)。每個物件所夾帶的屬性參數是一個字串，會根據要求訊息的內容而輸出物件 *pmpd* 的內部屬性參數，例如本論文用到的要求訊息只有 *get massesPos*，因此每個物件的屬性參數為：*massesPos*(字串) *ID massesPos*(數字)，用字串過濾的方式篩選 ID 和位置，並確保 ID 與座標變換過後的位置吻合，才能

即時的產生出球缺。此屬性參數同時也傳給聲音合成機制做處理(詳細見 4.3 章)。

4.2.3 物理動態與方程式波域表現

波表在讀取動態變化的過程中，可以自由變換成各種在球面上高低起伏的波域，然而質點彈簧系統就算因為 K 係數與 D 係數的調整可以使得波域緩慢起伏，仍然不能維持固有的外型不變，因此需要轉換各質點所在的 θ 和 φ 座標，藉由不同方程式產生 r 座標值，並且 r 的值在邊界必須為零，不然會發生不連續面。以下將提到文獻裡所討論的幾個重要且滿足基本定義的方程式[8, 20]，對照直角座標下的波域，如圖 44 ~圖 48 所示：

$$z(x, y) = (x - y)(x - 1)(x + 1)(y - 1)(y + 1) \quad (15)$$

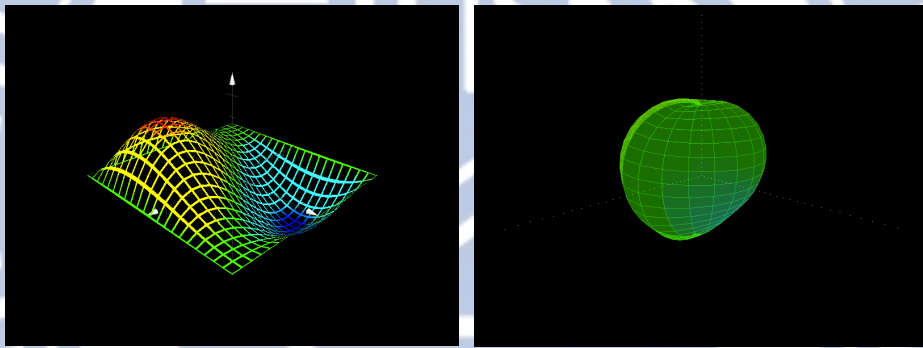


圖 44 方程式(15)在(左)直角座標(右)球座標

$$z(x, y) = \sin(x)\sin(y)(x - y)(x - 1)(x + 1)(y - 1)(y + 1) \quad (16)$$

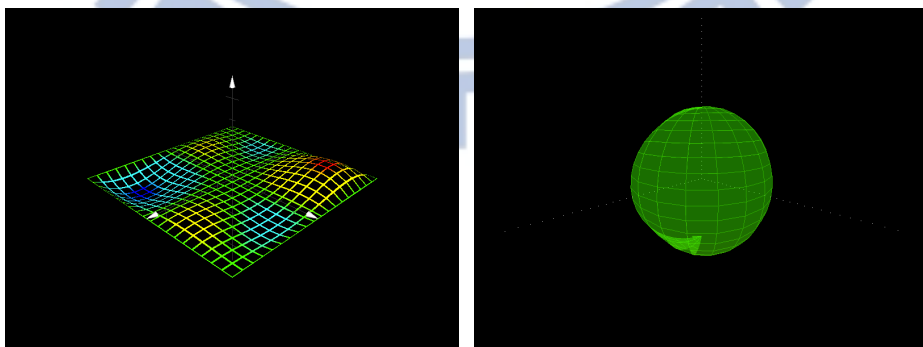


圖 45 方程式(16)在(左)直角座標(右)球座標

$$z(x, y) = \sin(\pi x)\sin(\pi y) \quad (17)$$

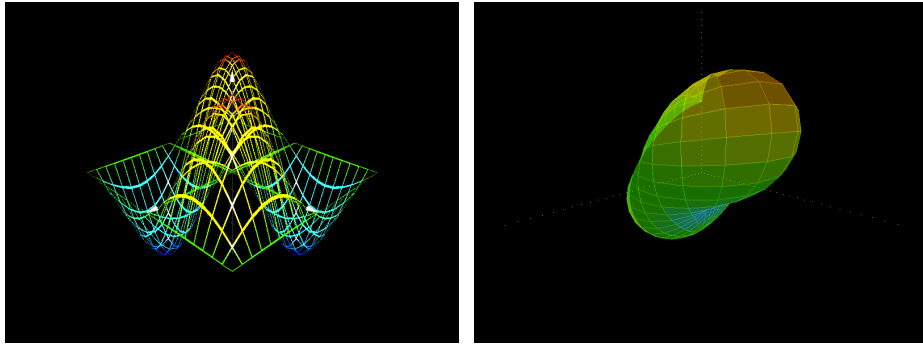


圖 46 方程式(17)在(左)直角座標(右)球座標

$$z(x, y) = \sin(\pi x) \cos(\pi y) \quad (18)$$

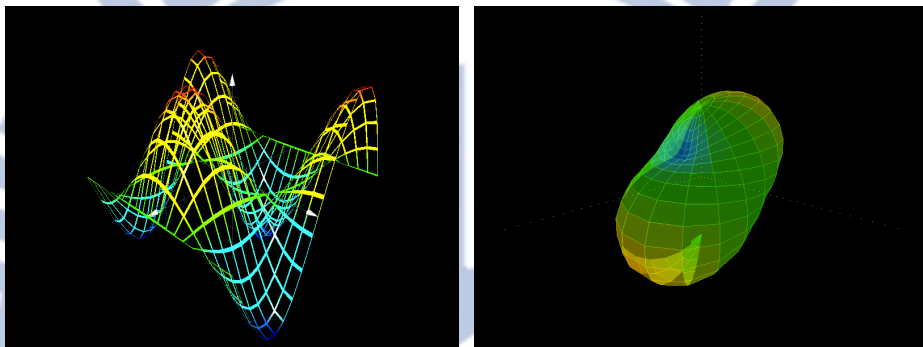


圖 47 方程式(18)在(左)直角座標(右)球座標

$$z(x, y) = \sin(1 - x^2) \sin(1 - y^2) (1 - y^2) x \quad (19)$$

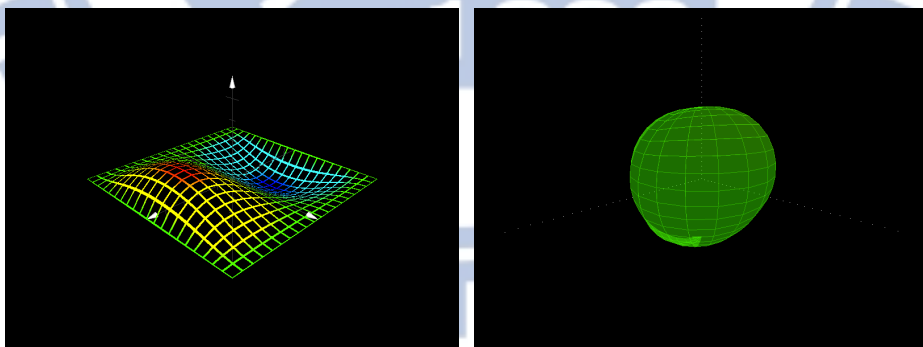


圖 48 方程式(19)在(左)直角座標(右)球座標

以上幾個波域的對照，雖然在球座標的起伏不這麼明顯，但是可以發現，除了滿足邊界值=±1外，都有對稱性，不論是線對稱、點對稱或軸對稱，但更重要的是因著對稱的特性，在球面上的表現是循環的，也就是兩邊的邊界會接起來，沒有斷面。

4.3 聲音合成機制

4.3.1 波表即時動態運算

在 3.4 章時有提到動態波表隨球缺數(n)而改變，實作上就是設一個充滿變數的空矩陣，以 $A\{ \}$ 表示，因為球缺是球體被切的球面，因此端點數會比球缺數多 1，又因為有兩個端點，所以矩陣變成 $A\{(n-1)+2\}$ ，討論到此時，是最理想的狀態，但是在實作上卻不然，以下便以掃描索引物件和動態波表物件兩方向來做討論。

4.3.1.1 掃描索引物件

在掃描索引所用到的物件是 Pure Data 裡一個讀表的物件 *tabread4~*，此物件的特性就是以四點內插的方式讀表，因此讀出來數值間的曲線會圓滑(如圖 49)。而四點內插需要在所處的區間前後各留兩個索引值輔助內插，因此矩陣 A 的前後兩端點需要再各加上兩個索引值，所以此矩陣的長度變成 $A\{[(n-1)+2]+4\}$ 。

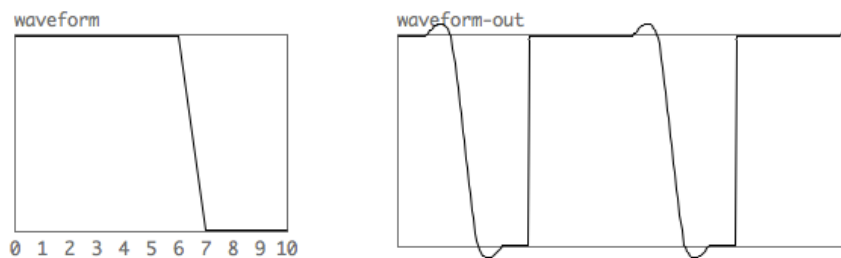


圖 49 *tabread4~* 讀表輸出曲線

4.3.1.2 動態波表物件

動態波表物件是針對本論文研究所寫的副程式 *dynamic_array.pd*，此物件有兩個功能，一是針對動態的讀表的過程中，會因為 *pmpd* 影格率與音訊緩衝的運算時間不足，造成聲音有破音(*clipping*)，因此需要做一點音量上的修飾，作法就是把原本的波表複製成兩個，如圖 50 所示，傳到 *theta(n)a* 和 *theta(n)b* 兩個波表後，快速切換讀表，並且在音量上做交疊(*overlap*)，把波表看做是音框(*frame*)來看，這樣波表的頭尾就會因

為交疊而不致破音。二是透過字串切割與拼貼的方式，讓矩陣不斷寫入變數，隨著球缺與波表類型的轉換，來承接運動中質點即時的位置，存入波表 $theta(n)a$ 和 $theta(n)b$ 內。

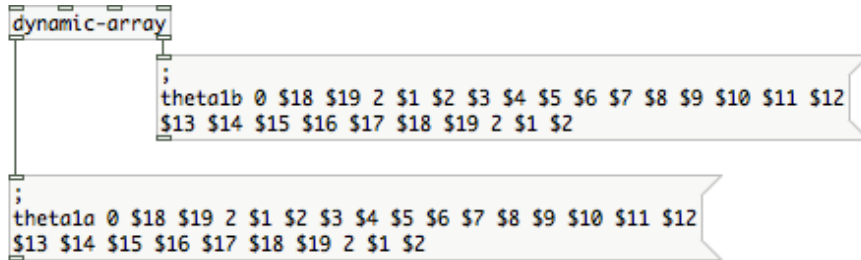


圖 50 動態波表的矩陣運算

4.3.2 掃描波形的對應

掃描波形的對應，有三種波形做切換，分別是鋸齒波、三角波和正弦半波。基礎波形中，唯獨無法用到方波的原因就是因為方波在振幅上的表現只有 1 和 0，即便乘上矩陣的長度，也只能讀到頭和尾，因此無法使用。而正弦波因為是振幅 1 至 -1 的波形，在索引值的列表中沒有負的，因此取絕對值，變成正弦半波。

鋸齒波由物件 *phasor~* 直接產生。如圖 51 所示，給定數值當做頻率。以輸出的振幅範圍 1 至 -1 來看，鋸齒波輸出的是範圍從 0 至 1 的連續訊號。

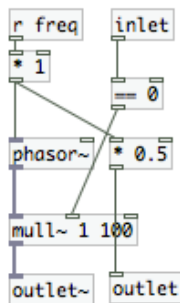


圖 51 鋸齒波實作

三角波是由鋸齒波做簡單的訊號演算，將兩個波形相反的鋸齒波做訊號放大兩倍後，再取最小值就是。因為是鋸齒波改寫，所以震盪範圍是從 0 至 1 而不是 -1 至 1。三

角波輸出的波形是從 0 跑到 1，再從 1 跑回 0，但是因為取完最小值後，週期變成原本鋸齒波的一半，頻率變成兩倍，因此避免掃描頻率不一致，給定的頻率為鋸齒波的一半(圖 52)。

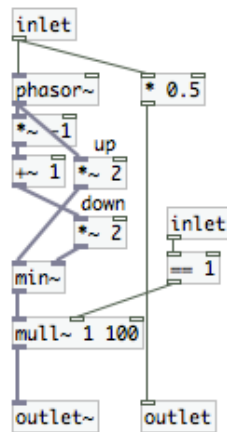


圖 52 三角波實作

正弦半波主要先由物件 *osc~* 產生，以正弦波的一個週期來看，在相位上的變化歷經 4 個 90° ，取絕對值後便出現兩個半波，是三角波的两倍週期，因此避免掃描頻率不一致，給定的頻率為三角波的一半，也就是鋸齒波的四分之一，如圖 53。而跟三角波不一樣的是，三角波在數值上是線性升降，正弦半波則是非線性升降。

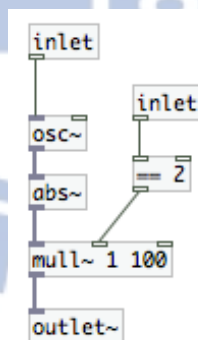


圖 53 正弦半波實作

最後做訊號的加總後，乘上球缺數 n ，加上 2(跳過兩個內插索引值從端點開始掃描讀表)，快速地在兩個波表的音量上做交疊後，加總起來作一個 DC 平移，就是完整的掃描機制(圖 54)。

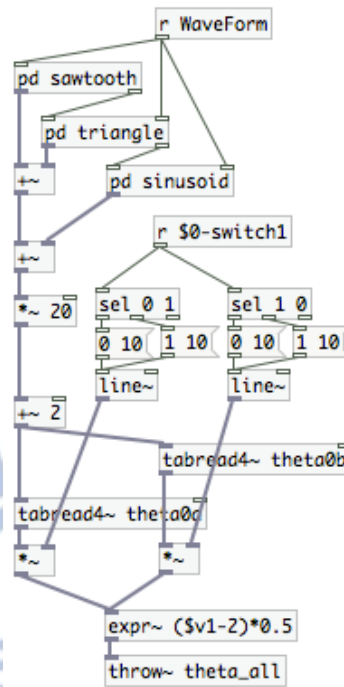


圖 54 掃描波形實作

4.3.3 動態倍頻與對應倍頻

φ 方向的有 20 個球缺面，兩個面夾一條 θ 方向線段，即使用固定且單一頻率掃描每一條 θ 方向線段後產生的波表，還是會因為波形即時動態的變化而不斷消長隱藏在聲音裡的高低頻率，聲音延續得越久，聽覺上動態的程度也越大；反之如果用對應倍頻的話，頻率成分的變動就是靠球面波的震盪程度決定。就頻率成分構成聲音的織度而言，前者需要較長的時間而使聲音細緻，後者時間短即可聽到豐富的音色。更多聲音的特色與特性會在後面第五章做更多的討論。

4.4 使用者介面

本研究實作出一個控制介面，目的是可以即時的操弄音色與監控波形狀態，圖 55 為 SWS 使用者介面與 GEM 視窗的全貌，GEM 視窗可以藉由滑鼠左鍵和右鍵的控制來做到視角的變化。按著左鍵做上下方向移動，可以改變視線的仰角和俯角。按著左鍵做左右方向移動，可以改變視線的方位角。按著右鍵做上下方向移動，可以改變視線的近和遠。

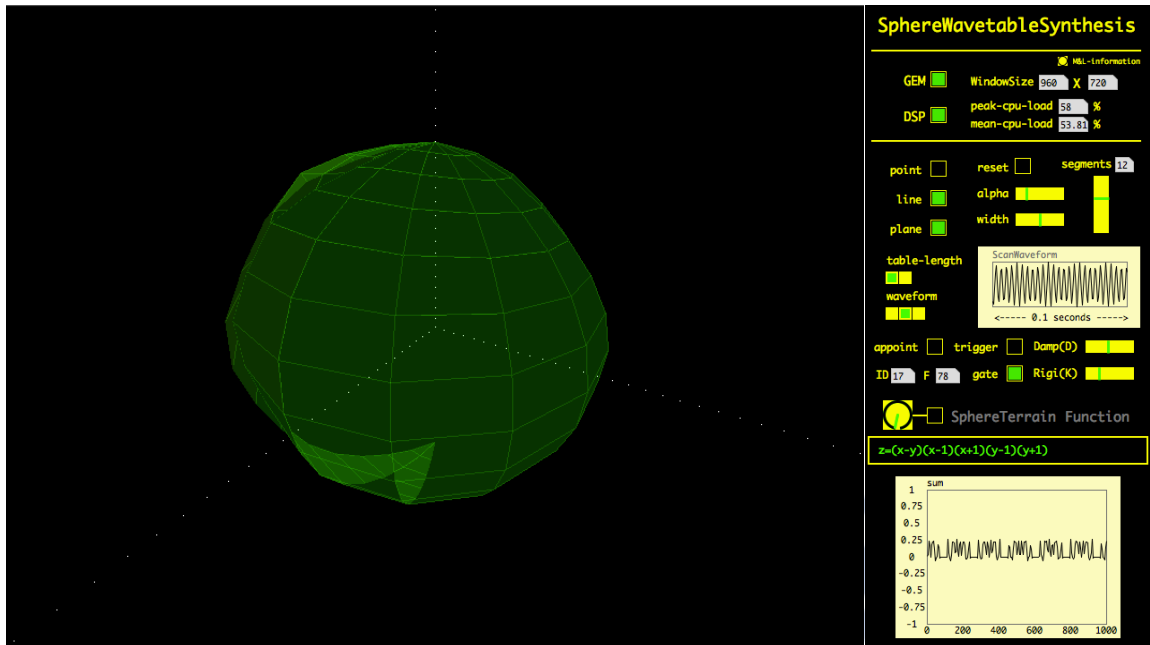


圖 55 SWS 使用者介面與 GEM 視窗全貌

以下將使用者介面分成三個部分來說明：第一部分是系統與音像的開關；第二部分是球面影像與聲音調變參數操控；第三部分是物理動態與方程式波域切換。圖 56 圖 57~圖 58 是把使用者介面拆開看，表 5~表 7 是各項參數的功能列表：

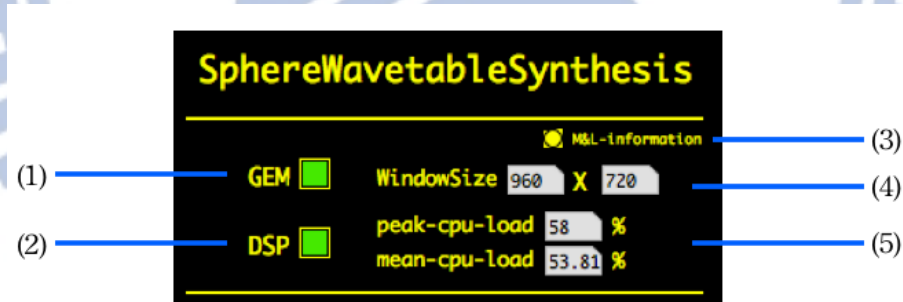


圖 56 SWS 使用者介面(一)

表 5 SWS 使用者介面(一)說明

編號	名稱	功能	編號	名稱	功能
(1)	GEM	開啟 GEM 視窗和物理模型運算	(4)	WindowSize	GEM 視窗尺寸調整
(2)	DSP	聲音開關	(5)	peak-cpu-load	系統耗能(最大值)
(3)	M&L-information	列印質點鏈結資訊		mean-cpu-load	系統耗能(平均值)

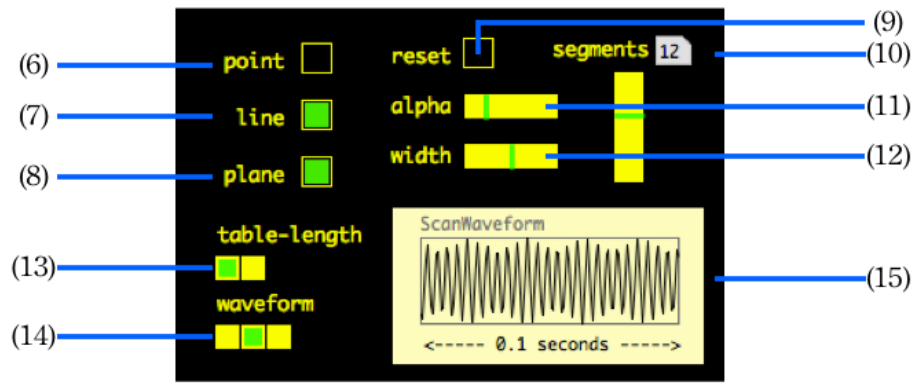


圖 57 SWS 使用者介面(二)

表 6 SWS 使用者介面(二)說明

編號	名稱	功能	編號	名稱	功能
(6)	point	描繪點	(11)	alpha	球面透明度，音量
(7)	line	描繪線，單一倍頻	(12)	width	球面線寬度，掃描頻率
(8)	plane	描繪面，直接倍頻	(13)	Table-length	波表選擇：動態/固定
(9)	reset	重置	(14)	waveform	掃描波形： 鋸齒/三角/正弦半
(10)	segment	球缺數	(15)	ScanWaveform	掃描波形圖

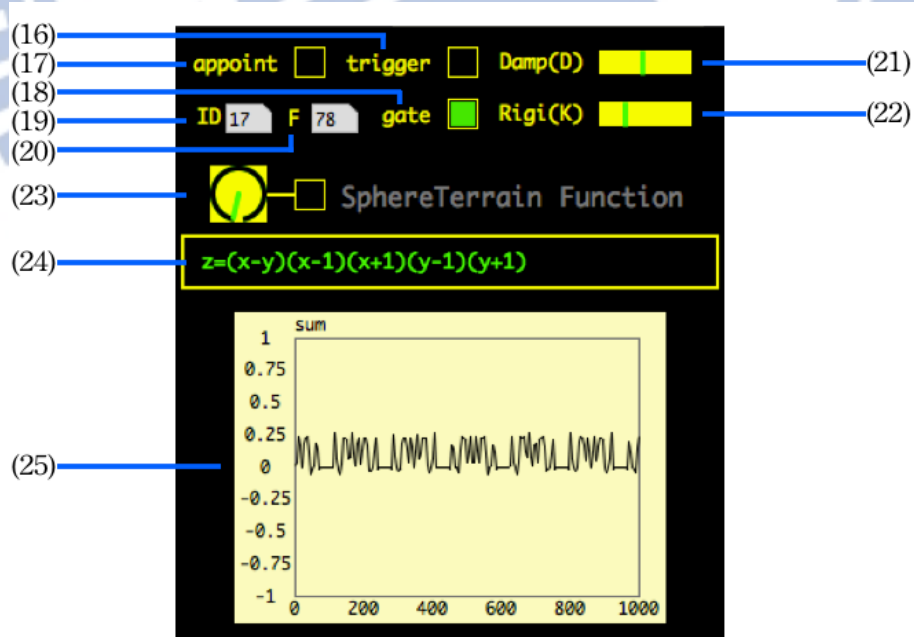
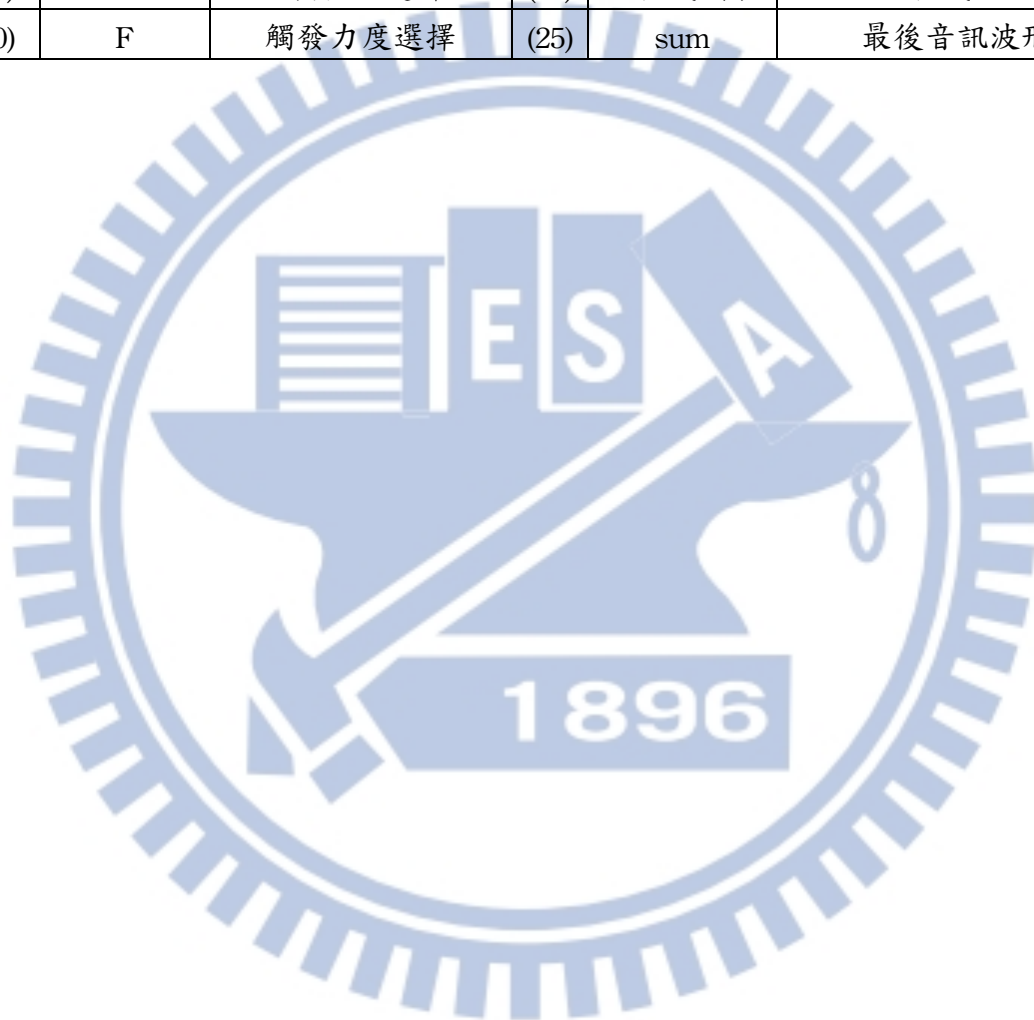


圖 58 SWS 使用者介面(三)

表 7 SWS 使用者介面(三)說明

編號	名稱	功能	編號	名稱	功能
(16)	trigger	隨機 ID 做一次觸發	(21)	Damp(D)	鏈結阻尼值調整
(17)	appoint	指定 ID 做一次觸發	(22)	Rigi(K)	鏈結剛性調整
(18)	gate	隨機 ID 做連續觸發	(23)	旋扭開關	波域選擇： 物理動態/方程式波域
(19)	ID	觸發 ID 選擇	(24)	方程式列表	方程式顯示
(20)	F	觸發力度選擇	(25)	sum	最後音訊波形



五、介面操作與討論

5.1 音像表現控制

使用者介面的第二部分與第三部分分別是控制音像的靜態表現與動態表現，兩部分可以單獨操作，亦可同時操作。以下單就兩種表現的操作來討論。

5.1.1 靜態表現

靜態表現用在聲音的基本特性，例如：音高、音量，可以調變線寬與透明度，如圖 59 所示，線段越細，聲音越細薄；線段越粗，低頻延伸出的倍頻區間使聲音更豐富。

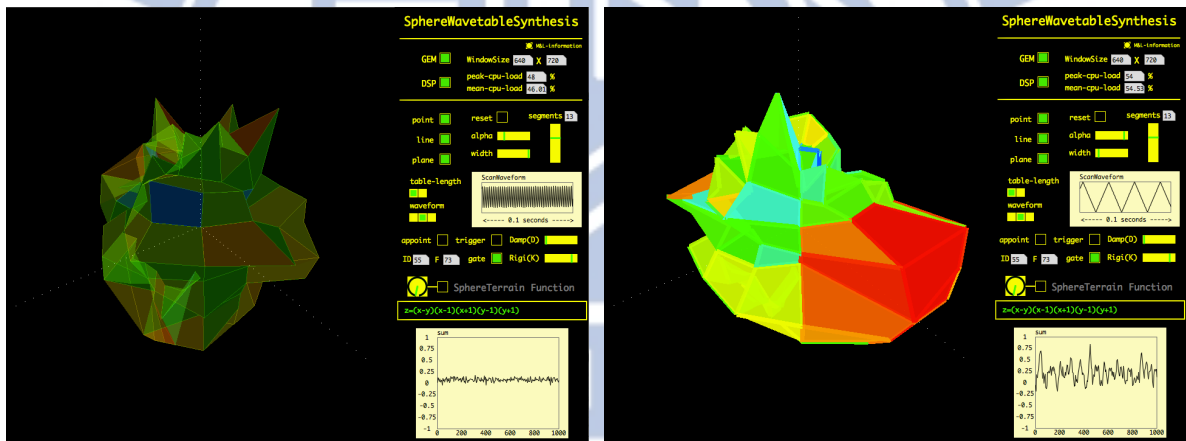


圖 59 高頻且音量小(左)，低頻且音量大(右)

靜態表現用在音色上的複雜度，可以調變球缺。球缺數高，取樣的點越多，質點與鏈結之間的作用力就越旺盛，能量傳遞出的球面波也越顯著，聲音在倍頻之間的相互消長也越明顯；反之，球缺數低，取樣的點少，因此動態倍頻造成的變化就少，對應倍頻的項數也少，能量傳遞變得快速，音色因此單調而穩定(見下圖 60)。再者，也可以調變掃描波形，鋸齒波的波形固定，很直覺的不斷掃描動態的球面；三角波因為來回掃描的緣故，固定週期內各有一次正向與反向的鋸齒波形，比起原本鋸齒波會有低一倍的頻率，再加上反向波形造成頻率分布也不一樣，疊加起來聲音更厚實；正弦半波類似三角波的掃描方式，但是週期內掃描的頻率改變(由快變慢，再由慢變快)，波

形被非線性的擠壓(squeeze)，造成某部分的波形變化劇增，音色也較為明亮。

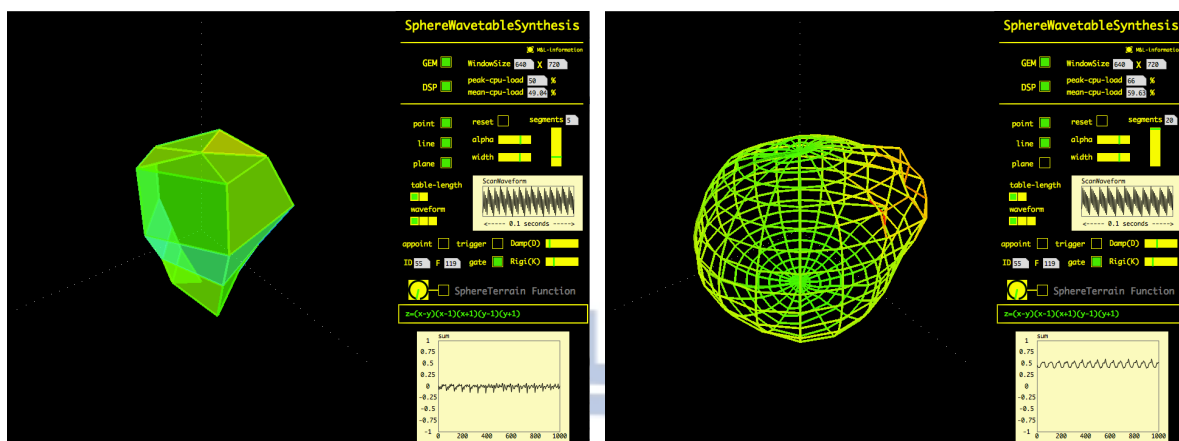


圖 60 波形單調變化短促(左)，波形複雜變化多元(右)

靜態表現用在音色上的柔和度，可以調變波表長度，選擇動態波表或是固定波表。動態波表在週期內連續而聲音飽滿圓滑，使聲音充滿空間感；固定波表則是根據球缺數而決定波形被擠壓的程度，因為已變形的波形在同樣週期內卻只循環一次，在時域上的表現來看就幾近一個脈衝波形，如圖 61，因此聲音顯得些許刺耳不圓滑，連帶頻率也提升。

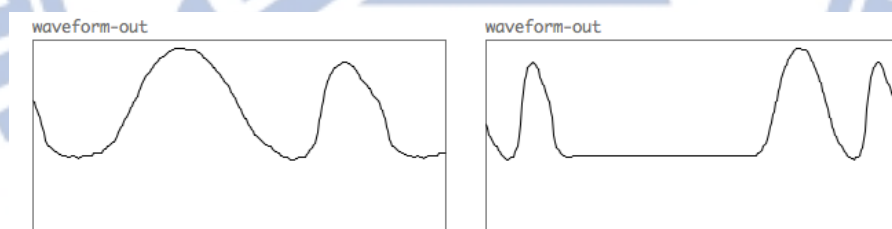


圖 61 動態波表波形(左)固定波表波形(右)

5.1.2 動態表現

最基本卻也是唯一的方法，就是改變質點的位置，或是令它受力後產生形變。介面上可以選擇 ID 以及施力，可以選擇隨機 ID 的施力，還可以選擇連續隨機 ID 的施力。上述這些功能的目的是不斷給球面觸發，但是最重要不僅是如何的擊打球面而已，而是球面的 K 值與 D 值，影響的就是阻力與剛性，此球面在此空間中，隨著時間如何的變化，就是聲音如何在振幅範圍內，隨著時間做到聲音形塑，也就是封包(envelope)。以

下操作皆以球缺數 $n = 20$ 來操作。

當 $K = 0$ ， $D = 0$ 時，視球面完全失去彈性和黏滯力，施予一個力時便無法恢復，形成固定波域，但是球面呈現極端的凸起(如圖 62)，聲音聽起來也很死硬。

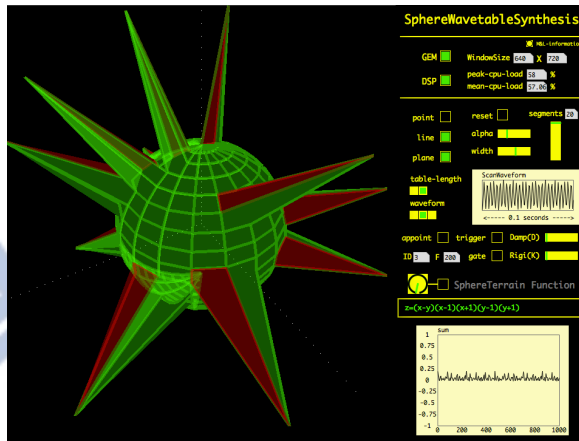


圖 62 $K = 0$ ， $D = 0$

當 $K > 0$ ， $D = 0$ 時，會根據 K 值做很長時間的震盪， K 越小，震盪慢速且延音緩； K 越大，震盪快速且碎音長(如圖 63)。

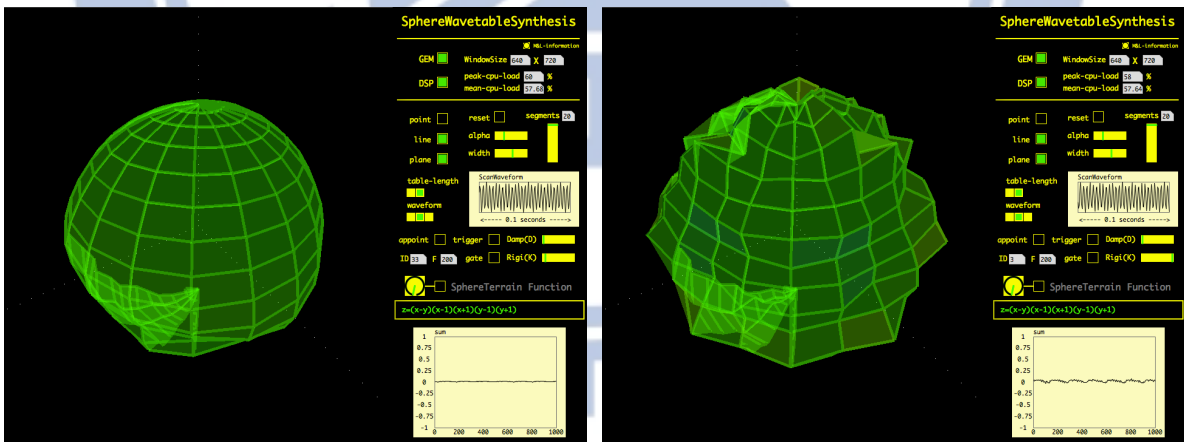


圖 63 $K > 0$ ， $D = 0$ 時， K 值小(左)， K 值大(右)

當 $K = 0$ ， $D > 0$ 時，會呈現一種無剛性狀態，每一次的觸發會將周圍的波域一起帶高，聲音越來越大聲，球面也趨近整顆紅色，給人一種壓迫感(圖 64)。在此情況下還有一種操弄球面的方式，就是 D 值調到最大後，藉由 K 值即時調變大小，造成球面在邊界範圍內做出各種 3D 的幾何圖形(圖 65)，但是在聽覺上沒有特殊的音色，只是很明

顯的感受音量不斷的做變化。

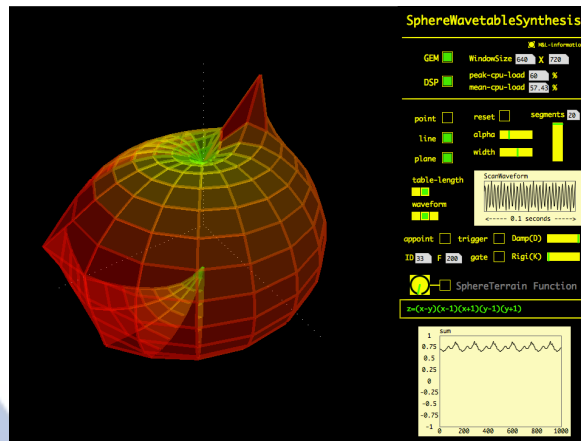


圖 64 $K = 0, D > 0$

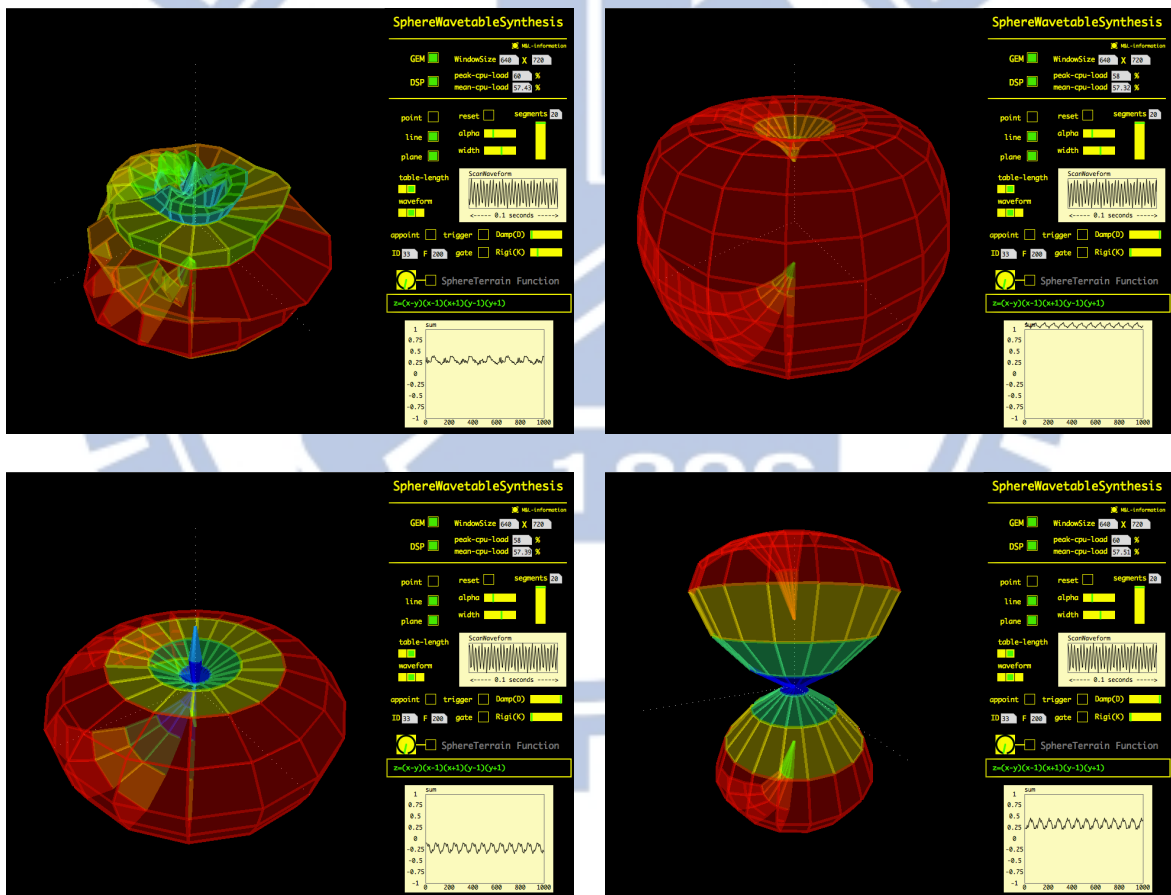


圖 65 $K > 0, D = 20$ 的各樣圖形

當 $K > 0, D > 0$ 時， K 值與 D 值主要表現出來的意義可以稍微歸納一下： D 值影響的是聲音的顆粒感顯著與否，而 K 值影響的是對聲音的延展性。但是當 K 值與 D 值都很大時($K > 15, D > 15$)，會開始處於模型系統崩潰的邊緣(圖 66)，開始發出極高頻

率的震動，也因為此模型有範圍限制，因此崩壞也是快速的在兩個邊界上做來回震盪，聲音上呈現出一種錯誤之美。

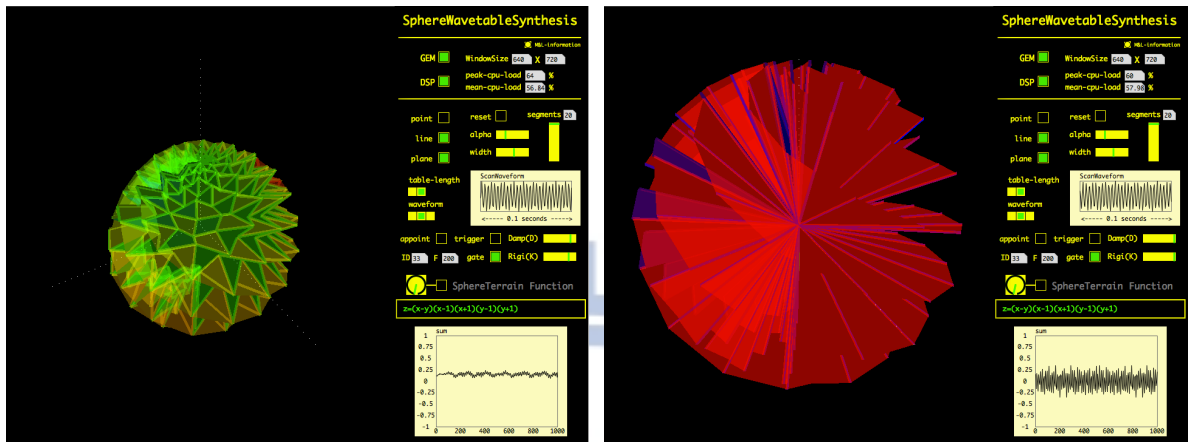


圖 66 模型系統崩壞

5.2 結果討論

實作完成，並透過實際操作，大致上與理想相符合，因此以下便從影像、聲音和系統三個方向來做討論。

影像上，GEM 在繪圖的能力很強，還是有些微的破面，是因為 *pmpd* 的更新率有一定的幾十毫秒，加上構成球面的基本幾何圖形，本論文用的是 Pure Data 內建的繪圖物件 *polygon*，用點座標的方式建構多邊形，自由度還是有相當的限制。未來可以嘗試用 OpenGL 外掛，讓圖像的動態變化更豐富更自由。

聲音上，有各種波表以及掃描變換的機制，可以聽出一個發出來的延音當中，包含了很多的弦外之音；而有效的操弄 *K* 值和 *D* 值，可以改善一個延音，不論是倍頻的豐富性，或是時間上有趣的形塑。結構上，藉由四百個左右的質點當做取樣點，透過排列的方式與規則，有效利用有限點來豐富音色，但是對於波表與波域之間的轉換，還是不太連貫。而且只要在影像上做更多複雜的貼圖與效果，就會讓系統來不及運算而造成破音，解決的辦法除了改寫演算法之外，就是提高延遲(*latency*)，但這卻使得音像不夠同步，改善的方法可以替換物件的使用，例如用 *array* 存值會比 *table* 更耗記憶體，因為 *array* 即時的在程式上秀出圖表。

系統上，由於 Pure Data 是一個即時處理數位類比訊號的程式語言，因此在編譯與執行時可以透過物件模組化的概念快速執行，而且本身是開放原始碼，所以可以自由的改寫，也可以自由的引用別人的技術，但是附上的代價就是極消耗電腦效能，一些運算都在高階的指令上完成，比較低階語言在底層的運算能力還是有段差距，但是不可否認它在即時做互動影音上的高支援度。



六、結論與未來展望

本研究探討的是聲音和影像如何同步化而更有意義，所以選擇用物理動態的方式描繪變化的過程，為了聲音與影像的同步對應關係，而呈現即時數位音像表現。聲音合成上，在數位合成法的抽象與物理建模兩大類中成功找出具有圖像含意的合成法：波表合成法與質點彈簧網絡合成，分別做基礎波形合成與聲音封包的形塑。影像算圖上，將波表實體化，並且結合了球面的想法，透過 *pmpd* 運算表現物理動態，成功延伸波表合成的想法，做到結合波域合成法與掃描合成法來表現聲音波形，完成一個 3D 球面波表合成的模型(SWS model)，並且透過實作出一個控制介面與顯示介面，調變其中音像同步對應的參數，利用質點彈簧系統在球面上的物理參數特性，對球體的外型形塑，亦是操弄出豐富的音色，給予音像創作者一個新型態的創作平台。

雖然成功實作出新介面的想法，但是這個模型算是初步原型，使用上還是有一定的限制，因此未來希望更進一步的發展有幾個方向：

- (1) 更進一步做圖像與聲音在分析後的對應，除了可以加入到控制介面上顯示外，更在未來可以改寫物件 *pmpd* 底層的運算。
- (2) 改善人機控制介面，使之更直覺也更簡易。
- (3) 加入噪音和非諧音成分。
- (4) 發展成可獨立使用，也可當做 VSTi 音訊軟體的外掛音源，或是行動裝置上的 app，透過硬體上支援多點觸控的功能，運用簡單的手勢便能操控球體，在視覺上一樣保持如此動態的繪製。
- (5) 在人機互動上加入科技樂器實作的想法，除了聽覺、視覺之外，加入第三種感官接收：觸覺，並且實作在立體的裝置或樂器上，跳脫表現形式僅止於電腦螢幕或是平板行動裝置上，成為一個真正的三維空間樂器與裝置。

參考文獻

1. 葉謹睿, *數位藝術概論: 電腦時代之美學, 創作及藝術環境* 2005: 藝術家出版.
2. Golan Levin, *Audiovisual Software Art: A Partial History*, May 2009
3. 彭宇薰, “音樂與繪畫類比性之探索—談表現主義之荀白克與孟克”, *美育月刊* 103 期, 民國 88 年 1 月: 1-8
4. Momeni, A. and C. Henry, *Dynamic independent mapping layers for concurrent control of audio and video synthesis*. *Computer Music Journal*, 2006. **30**(1): p. 49-66.
5. Lesbros, V., *From images to sounds, a dual representation*. *Computer Music Journal*, 1996. **20**(3): p. 59-69.
6. Roads, C., *The Computer Music Tutorial* 1996.
7. Puckette, M., *The theory and technique of electronic music* 2007: World Scientific Publishing Company Incorporated.
8. Borgonovo, A. and G. Haus, *Sound synthesis by means of two-variable functions: experimental criteria and results*. *Computer Music Journal*, 1986: p. 57-71.
9. Verplank, B., M. Mathews, and R. Shaw. *Scanned synthesis*. in *International Computer Music Conference*. 2000. Berlin, Germany.
10. Cadoz, C., A. Luciani, and J.L. Florens, *CORDIS-ANIMA: a Modeling and simulation system for sound and image synthesis: the general formalism*. *Computer Music Journal*, 1993. **17**(1): p. 19-29.
11. Henry, C. *PMPD: physical modelling for Pure Data*. 2004.
12. Jean-Michel, C. *A scanned synthesis virtual instrument*. in *Proceedings of the 2002 conference on New interfaces for musical expression*. 2002. National University of Singapore.
13. Tubb, R.H., *The Wablet: An Investigation into Scanned Synthesis and Multi-Touch*, 2011.
14. Overholt, D. *New Musical Mappings for the MATRIX Interface*. in *Proc. 2002 ICMC*. 2002.

15. Sheehan, B. *The Squiggle: a digital musical instrument*. in *Proceedings of the 2004 conference on New interfaces for musical expression*. 2004. National University of Singapore.
16. Dahl, L., N. Whetsell, and J. Van Stoecker. *The WaveSaw: a flexible instrument for direct timbral manipulation*. in *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression*. 2007. ACM.
17. Nagashima, Y. *Controlling Scanned Synthesis by Body Operation*. in *Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics (Mar. 2004)*. 2004.
18. Erlach, B., M. Evans, and M.J. Wilson, *Tüb-Interactive Sonification of Water Waves*. 2011.
19. 吳瑪惻, *點線面*. 台北: 藝術家 1985.
20. James, S.G., *Developing a flexible and expressive realtime polyphonic wave terrain synthesis instrument based on a visual and multidimensional methodology*, 2005.

