

What's fun in EE

臺大電機系科普系列

電腦音樂：歷史沿革與研究近況

鄭士康／臺大電機系電信所、網媒所 & 資工系 教授

一、引言

筆者於 2001 年曾為《台大電機之友》撰寫「電腦音樂漫談」[1]，其時電腦音樂之研究國內外均尚未十分普及。現匆匆十餘年已過，電腦音樂研究及成果已在多媒體應用¹、機器學習²、音樂機器人³等領域占有相當地位，國內外研究人員及有關公司亦如雨後春筍快速增加。主要原因當然是音樂壓縮解壓縮技術進步，使有線無線網路上快速傳送音樂成為可能。因而超大型網路音樂乃至多媒體資料庫，例如國內的 KK Box [2] 及國外蘋果電腦的 iTunes [3]、著名音樂推薦及廣播網站 last.fm [4] 等崛起，甚至視訊網站 YouTube [5] 中也有大量音樂成分。這使如何讓音樂聆聽者於動輒數十萬乃至數百萬首樂曲中，快速找到想聽或購買的音樂變成重要的研究課題。乘勢而起的尚有許多結合音樂⁴、影音、

1. 台大電機系與「多媒體訊號處理」直接相關的課程是大三、大四系訂選修「網路與多媒體實驗」、選修課「多媒體訊號處理導論」；預修課為大二下的必修有大二必修「訊號與系統」，間接有關的課為大三、大四選修「數位訊號處理概論」和「數位語音處理概論」。研究所階段的課程與研究領域相關老師，則多半在電信研究所、電機所計算機組、資訊工程研究所、資訊網路與多媒體研究所。各項課程資訊請參看台大電機系 (http://www.ee.ntu.edu.tw/course_relation.php) 與資工系網站 (http://www.csie.ntu.edu.tw/stu/super_pages.php?ID=stucourse) 及有關研究所網站中的課程介紹。資工系在多媒體選修課程也相當完整，而上面提到的研究所開設課程大多也開放電機系大學部高年級學生選修。以下提到的課程，有關資訊均請比照參閱上述網站。相關的高中課程，依部訂「普通高級中學課程綱要總綱」，為國文、英文、數學、音樂、藝術生活、資訊科技概論、生活科技、科技與資訊類選修、藝術人文類選修，以及基礎物理中的聲學和基礎生物中的人類聽覺系統。
2. 「機器學習」(Machine Learning) 為人工智慧的一支，藉助各式各樣的學習程式，以足夠資料(例如手寫數字)訓練電腦，之後電腦即使遇到沒碰過的類似資料也能正確辨識到某一程度。除電腦音樂外，在許多領域如網路交易分析等有很多的應用，是電腦軟體的重要技術之一。目前此一課程僅有資工系開設，但電機系很快亦將開設相似選修課。本校生機所與數學所也有類似課程，但內容重點也許與本院課程有所出入。
3. 台大電機系相關課程為系訂選修「控制系統」、「自動控制實驗」。相關的研究所為電機所自動控制組 (<http://www.ee.ntu.edu.tw/grad/2010CTRL.pdf>)，機器人研發為該組重點 (<http://www.ee.ntu.edu.tw/graduate/>)。此外，機械系所也有相關課程及研究。
4. 台大設有音樂研究所，且與台師大及台科大聯盟，互相承認所選學分，故可就近於台師大音樂系或到十餘分鐘路程之國立台北教育大學修習如「和聲學」等樂理課程。

訊號處理⁵、人工智慧⁶、聲學⁷、心理學⁸等跨領域軟硬體⁹開發研究，因此電腦音樂已為學界及科技界公認為重要的研究領域。以下列出幾部近年電腦音樂研究成果之 youtube 影片，藉以使讀者觀賞後，對電腦音樂的當前發展略有概念：互動式之數位內容呈現 [6]、虛擬歌手「初音未來」現場演唱會 [7]、虛擬樂團指揮 [8]、音樂機器人 [9,10]、虛擬作曲家 Emmy 作出的音樂 [11]。

接下來，筆者想以音樂由創作到聽眾聆聽的各個階段中，電腦已經扮演的主要或輔助角色，說明各種電腦科技在音樂上的應用與影響。由於音樂一般認為是一種藝術，因此先引用曾任台師大藝術學院院長的陳瓊花教授對「藝術」的定義 [12]：

藝術是一種有意的人為活動及其作品，... 表現出作者的思想與感情，且進而引發接觸這些活動及其作品的人，情感上的共鳴或省思，並提供與增強其知覺的感受性。

從中筆者導出音樂的藝術歷程如圖 1，解說如下：音樂由創作產生其展演之依據，其次由展演者詮釋後，以聲音直接呈現。呈現的聲音，可以由聽眾直接聆聽，「引發情感上的共鳴或省思，並提供與增強其知覺的感受性」；也可以將呈現的聲音收錄，經過處理美化，儲存於適當媒體如早年之黑膠唱片、磁性錄音帶、音樂光碟或 MP3 格式檔案等，提供聽眾於自選時間聆聽。此外，展演者呈現的聲音，也可以在播出前，經過訊號處理如運用電吉他效果器或等化器（Equalizer，一般音響設備均有）強調或減弱高低音成分等，再以揚聲器播放，供聽眾欣賞。此外，聽眾聆聽後，其現場表現及參與也可能與演奏演唱者密切互動：例如維也納每年新年音樂會的壓軸，照例是 Sr. Johan Strausst（老約翰·史特勞斯）所作的 Radetzky-Marsch（拉黛斯基進行曲）；樂團的演奏與聽眾拍掌聲交織，為音樂會畫下完美句點。也有可能創作者亦是展演者，隨聽眾及樂團其他表演者的臨場反應，即興演出，如常見的爵士樂即興演奏。

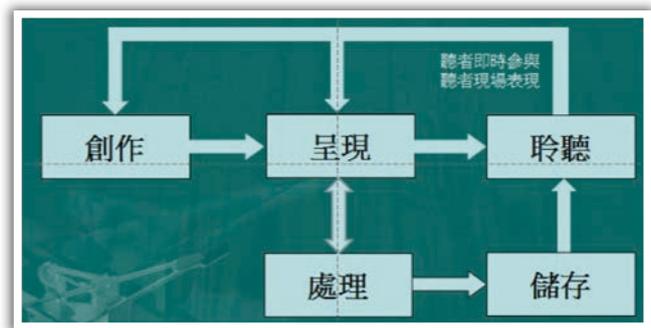


圖 1 筆者提出的音樂藝術歷程

以下筆者即以圖 1 之音樂藝術歷程各階段，略述相關電腦音樂研究的沿革與研究近況。

二、呈現

電腦應用於音樂的第一步便是讓電腦能夠演奏音樂。就手邊資料 [13] 所知，1950 或 1951 年時，澳洲的第一部（世界第三部）數位化，並可儲存機器語言程式的電腦 CSIRAC，由 Geoff Hill 撰寫二進位程式（那時 FORTRAN、BASIC、C++、JAVA 等高階程式語言並不存在），打成由不同小圓洞組合的紙帶（他們發現那時 IBM 電腦使用的打孔卡片，不適合用於 CSIRAC）輸入電腦，由電腦演奏出音樂，且公開演出若干次。

5. 台大電機系大二下必修「信號與系統」為其基礎，只需微積分知識。在電機、資訊乃至機械工程等領域，應用甚廣。

6. 台大電機系課程中，「人工智慧」(Artificial Intelligence, AI) 為大學部高年級及研究所選修。預修課「計算機程式設計」及「計算機概論」，均為大一必修。台大資工系系主任許永真教授是國際著名的 AI 學者，也曾經指導過幾位研究生完成電腦音樂相關的研究。

7. 台大電機系沒有專設的聲學課程，但對電腦音樂而言，大一共同必修的「普通物理」已經夠用。

8. 心理系開設有「普通心理學」及「認知心理學」，但電腦音樂用到的部分不多，自修或旁聽就可以了。

9. 台大電機系高年級必選「網路與多媒體實驗」、「數位電路實驗」、「嵌入式系統實驗」，常有同學以音樂相關應用為實驗主題，包含軟體技術的結合。

筆者 2001 年的短文 [1] 提到重要的電腦音樂先驅 Max Mathew (1926-2011)，於 1957 年在 Bell 實驗室完成 MUSIC 程式庫，流傳普及，且多次改版更新，可讓其他程式設計師方便地讓 IBM 電腦直接合成聲音，也曾用來為歌曲 “Daisy Bell” 配上伴奏 [14]。因此時間雖較澳洲的 Geoff Hill 為晚，但影響極為深遠。

要讓電腦發出的聲音接近樂器音色並不容易，需使用複雜的軟硬體配合完成。早期常用的方法之一為利用 Fourier 轉換 (Fourier Transform)¹⁰，將樂器所發出。隨時間變化的訊號，分析其頻率成分大小比例 (稱為頻譜，Spectrum，其比例關係通常是決定音色的主要因素)。通常樂器聲音頻譜為一系列振幅不同，但與最低頻率 (稱為基頻，Fundamental Frequency，決定音高) 成接近整數倍關係的頻率 (基頻整數倍的頻率，稱為諧波或泛音，Harmonics)。將頻譜儲存下來，需要發聲時，依頻譜產生多個不同振幅之基頻與諧波正弦訊號加總，送入揚聲器發出音色類似原樂器的聲音。這種方法在電腦發展早期相當昂貴，因為當時電腦運算能力及記憶容量有限，分析樂器音頻譜已不容易，更無法即時產生正弦訊號。必須設計複雜的電路，利用多個震盪器電路¹¹ 發出不同頻率的訊號，再適當組合。

如筆者在 [1] 敘述，1973 年 Stanford University 研究生 John M. Chowning 發明使用相對簡單電路即可完成的調頻 (Frequency Modulation, FM) 音樂合成技術。Chowning 雖然是音樂研究所的學生，但數學及物理亦頗有基礎，喜歡到各系所聽課。有次在電機系旁聽通信技術課程，學到調頻正弦訊號的頻譜乃是由一系列整數倍數關係的頻率構成¹²，與一般樂器聲的頻譜相似。於是靈機一動，想到用產生 FM 訊號的電路模擬樂器發聲的方法。此一方法專利於 1975 年由日本山葉 (YAMAHA) 公司購去，經工程師與音樂家合作，調出各種樂器以 FM 合成所需參數，在 1983 年推出 YAMAHA DX-7，為世界第一部商業上最成功的電子琴。合成樂器聲音在前述諧波分析合成及 FM 技術發明前後，另有非常多的方法，請參看 [15]。這些合成技術的成功，搭配 MIDI 標準 [16] 的發展，便可用不同的軟硬體代替樂器，發出所需樂器的聲音來演奏：如名大提琴家馬友友與 MIT Media Lab 合作的 Hypercello [17]、Stanford University 的 Center for Computer Researches on Music and Acoustics (CCRMA) 前主任 Chris Chafe 自製 Celletto [18]、澳洲 Digital Trumpet 公司開發的數位喇叭 [19]、乃至網路上的虛擬鋼琴 [20,21]、空氣吉他¹³ (Air Guitar，自 1996 年至今仍在舉辦世界大賽) [22]、可以在特製的「啞」吉他形體置入 iPhone，使新手能依吉他形體上把位與琴弦燈光的閃爍，直接彈奏出正確曲調的 gTar [23]，等。

目前樂器聲音的合成技術，已能模擬特殊演奏技法下的小提琴與中國古琴音色變化¹⁴，使電腦演奏的音樂更富表現力。成功大學蘇文鈺教授¹⁵ 主持的音樂多媒體系統實驗室 (Scream Lab) [24] 在此方面以及其他電腦音樂有關的研究，與世界兩大電腦音樂研究中心 (法國巴黎的 IRCAM [25] 及美國

10. Fourier 轉換與逆轉換是數理工程領域應用甚多的重要數學觀念，會在台大電機系大二必修「工程數學：微分方程」中介紹。處理數位訊號處理時，相對應的觀念為 Discrete Fourier Transform (DFT) 及其逆轉換 Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)。快速計算 DFT 與 IDFT 的方法稱為 Fast Fourier Transform (FFT)，是「訊號與系統」課程之重要內容。

11. 振盪器電路的相關知識在電機系必修「電子學」中介紹。

12. 調頻觀念在電機系選修課「通信原理」中有完整的分析。

13. 台大楊格，蔡維哲，宋梓平等三位同學，在電機系簡韶逸教授指導下，以「空氣吉他」實作獲亞洲創新大賽 2012 最佳人氣獎 (http://www.innovateasia.com/2012_tw/index.html)。個人所知有限，本文此處及以下行文舉例，難免遺漏國內外先進及其重要貢獻，尚祈海涵。

14. 有關音效合成分析等研究，最專門的國際會議是 1998 年開始，延續至今的 Digital Audio Effects (DAFx, <http://www.dafx.de/>)。蘇教授持續在此會議發表過多篇重要論文。

15. 蘇教授對音樂的熱愛及造詣，至少在台灣理工學者中無人能比：蒐羅滿架古典樂黑膠唱片、自己以紫檀木車製唱盤 (紫檀木較重，播放黑膠唱片時，其旋轉較不受環境振動影響)、辦公室放有美國軍艦拆下之龐大重低音揚聲器、研究室不時有悠揚的樂聲傳出、還每週上台北學彈奏古琴，已持續近十餘年，並曾於國內外發表古琴特殊音色合成，及古琴減字譜自動辨識與產生等，融合中國傳統文化與現代科技的論文。

Stanford University 的 CCRMA [26]) 及多個歐洲著名大學相關實驗室密切合作，斐聲國際。且其博士班學生可至 IRCAM 留學至少一年，畢業即取得成大及法國 IRCAM 雙博士學位。

既然有表現力的樂器聲可由電腦合成，我們自然希望電腦自動演奏音樂能夠跟真人演奏，在樂曲詮釋及情感表達上一較長短；最好還能由機器人表演，如本文引言介紹的音樂機器人¹⁶。國際間自 2002 年起，每一兩年即舉辦一次 Performance Rendering Contest (Rencon, 以鋼琴為主)[27]。據主辦單位的預測，2025 年應會有與真人彈奏無法分辨的系統出現¹⁷，並開始進軍蕭邦鋼琴大賽。2050 年電腦系統會在蕭邦鋼琴大賽奪冠。2052 年的自動演奏系統則可同時於蕭邦鋼琴大賽及柴可夫斯基鋼琴大賽獲勝，並能開始教導真人演奏。此一主題已有專書 [28]，台大電機所碩士班的呂行同學亦於今年完成鋼琴單音旋律半自動演奏系統的初步研發 [29]。呂同學開發的系統需真人手動標註樂句，但這部分可以由使用者發揮其創意及樂曲詮釋能力，可能比全自動系統還有趣得多。

除了自動演奏，也可以真人透過操控樂曲 MIDI 檔案的播放，指揮樂器聲合成器，過擔任交響樂團指揮的乾癮。1999 年筆者訪問 CCRMA，旁聽 Max Mathew 教 C 語言程式設計（授課對象為音樂系所學生）。學期第一節課剛開始，Max Mathew 使用 Radio Baton 精彩地單人指揮演奏貝多芬命運交響曲，不僅學生瘋狂鼓掌¹⁸，我也非常佩服他的創造力、音樂素養，以及雖年事已高，成就非凡，仍如此認真備課的敬業態度。Mathew 示範 Radio Baton 應用的影片可以在 [14] 中看到，片中包含 Radio Baton¹⁹ 的使用方式及設計原理介紹。本系²⁰ 碩士班李務熙同學（畢業後至「世界創新工廠」：MIT Media Lab 攻讀博士，應已獲學位）在 2002 年也完成一個指揮家軟體：以滑鼠當作指揮棒揮舞打拍子，電腦偵測游標來回擺盪的幅度及速度，分別控制音樂音量的大小和進行的速度 [30]。此一指揮家系統，隨後成為由本院網路與多媒體研究所洪一平教授領導，其博士班研究生彭維庭（2010 年畢業）為主力的團隊，與國立台灣師範大學管弦樂團合作，開發本文引言提到的「虛擬樂團指揮」[5] 之基礎，成果於 2007 年發表於國際多媒體重要會議 IEEE International Conference on Multimedia and Expo [31]。之後陸續出現許多類似的系統，如 2010 年中視新聞 [32] 及 2013 年民視新聞 [33] 分別報導：國立台灣交響樂團於台中霧峰園區設立的影音互動館中，遊客能指揮虛擬樂團演奏。2013 年出現的 Xbox 遊戲 Konductor Fantasy，可用雙手指揮螢幕上卡通人物構成的樂團 [34]。

樂器聲之外，歌聲合成²¹ 也是重要的研究課題，其中包含了語音訊號²² 及伴奏音樂的處理，難度頗高。本文在引言提到的虛擬歌手「初音未來」[35]，能將粉絲寄來的創作，以獨特逼真的女聲唱出。

16. 如 [10] 日本早稻田大學網站介紹的一系列，發展近十餘年之各式音樂表演機器人。日本工科學生似乎對機器人研究頗有興趣，筆者的日籍朋友說：可能與二戰後不久出現的系列機器人動漫「原子小金剛」（其中譯本亦是筆者小時候常跑漫畫租書攤的原因之一）有關，顯然漫畫家手塚治蟲作品的影響力極為深遠。

17. 這等於電腦已達成音樂方面的 Turing Test (http://en.wikipedia.org/wiki/Turing_test)。

18. 顯然這門課的開學第一節不會有人翹課。

19. Radio Baton 基本原理與 1920 年代的電子樂器 Theremin 相似：Theremin 以雙手位置改變，影響附近無線電天線接收訊號強弱，用以控制震盪器輸出相當「有科幻感」的聲音頻率與音量大小變化 (<http://en.wikipedia.org/wiki/Theremin>；Theremin 的衍生型設計實作及其與電腦音樂作曲軟體之結合等，則亦為文化大學劉宗慶教授的研究方向)；Radio Baton 使用時，雙手分持頭端有天線的鼓槌棒，隨鼓槌棒高低左右移動，使金屬平板接收到的電波強弱不同，以之控制電腦 MIDI 聲音輸出的快慢與音量改變。

20. 指台大電機系，為筆者所占職缺所在，以下提到的「本系」均是如此。「本院」則指本系所屬的台大電機資訊學院。

21. 就筆者所知，國內也有數位學者研究歌聲合成技術，例如本院資工系張智星教授 (<http://mirlab.org/jang/mir/>)、台科大古鴻炎教授 (<http://guhy.csie.ntust.edu.tw/>) 等。

22. 台大電機系自三十多年前，李琳山教授放棄美國優渥待遇工作。返國創立語音實驗室以來，語音訊號處理的教學與研究蓬勃發展，培養了無數傑出的人才。尤其是早年即開始當時可能全球唯一的華語語音處理研究，成績斐然。近年隨著中國崛起，國際間對華語日漸重視，李老師與其歷代學生輩的研究，倍受矚目。

所以能如此，全靠其背後的 VOCALOID 3 語音合成引擎 [36]：只需輸入音調、歌詞，就能發出人聲，也可以調整抖音、音速等的「感情參數」，支援即時演出。製作完成後，會記錄輸出最後的訊號波形檔案。但引擎本身只可製作出歌唱部分，伴奏需使用其他音樂軟體合成。VOCALOID 為山葉公司研發人員劍持秀紀 (Hideki Kenmochi) ²³ 發想，與西班牙 Pompeu Fabra University (位於 Barcelona) 的名教授 Xavier Serra ²⁴ 領導之 Music Technology Group 合作完成 [37]。

三、處理

演奏或演唱的音樂聲音訊號，通常要經過一些處理再予播放 (Playback)。

音樂呈現有時需要一些特殊的效果，例如電吉他常會搭配吉他效果器，產生各式各樣的音效 (回聲、Overdrive、Flanging 等等) [38]。這些音效現在都可以用數位訊號處理 (Digital Signal Processing, DSP) 來實現：目前已經有效果非常好的手機 APP 來搭配電吉他 ²⁵，在數十餘國音樂類 APP 市場銷售第一；獲得眾多國際名吉他手採用，並發展出對應的 DSP 晶片，用於滿足各種需求的硬體產品。

另外，大型演唱或演奏會也常需要一位音控師，將歌手或樂團隨身麥克風取得的聲音訊號，去除麥克風及環境雜訊、以等化器 ²⁶ 突出或減弱某頻段聲音音量、修飾音色以增加聽覺美感。也因此大型演唱會或劇場的收音與多個揚聲器的擺設方式，成為重要的考量。有許多個人工作室，或如 Yamaha、Dolby 等大公司的有關部門提供這項服務。如果表演在室內進行，或設計音樂廳，還另外需要「建築聲學」(Architectural Acoustics 或稱 Room Acoustics、Building Acoustics) 專家的協助。

錄音間 (Studio) 內之音樂後製作 (Post-processing) 則除上述功能外，還能製造聲效，使「乾」聲音變「濕」(添加回音使聲音聽起來較豐富)、校正音高，調節聲音長短速度、從歌手或樂團同一首歌的多次錄音挑選較佳片段剪接成最滿意的作品、加入人工特效聲音、產生身歷聲 (Stereo) 或環場音效 (Surround Sound) 等效果。這些功能通常均以混音器 (Mixer) 調整疊加輸出來達成。整套處理方式已經有現成電腦軟體如免費的 Audacity ²⁷ 可以應用，在家中即可進行，取代過去昂貴的硬體設備。

聲音訊號處理還有一種特殊的運用，通常稱為「音訊浮水印」(Audio Watermarking) 或「運用聲

23. <http://www.vocaloid.com/about/interview.html>

24. http://en.wikipedia.org/wiki/Xavier_Serra

25. <http://www.positivegrid.com/>

26. 等化器常見於一般音響器材，聽者可以依自己偏好，調整頻譜中各頻帶能量的相對比例。例如：調高低頻帶比重以加強低音號聲音，或者加強高音部分，突出卡拉絲女高音的音量。此種裝置多半使用「濾波器」(Filter) 組合而成。類比訊號的濾波器通常以電路構成 (「電路學」為大二上必修，而「電子學 (一)、(二)、(三)」為二上至三上必修)。而數位濾波器則常藉 DSP 晶片對訊號取樣執行特定演算達成，「訊號與系統」將會介紹此類演算程式之分析與設計。電信所 (尤其是資深的兩位特聘教授貝蘇章與李枝宏老師) 有多位教授在數位濾波器設計技術與理論上均有重大貢獻。一般要幾分鐘內完成下載音樂，乃至影片多媒體至手機內，必須透過高速無線傳輸系統：將數位視聽訊息照標準格式編碼，置入手機頻帶 (約在 0.7 ~ 5GHz 範圍，屬微波範圍。物理上的 G 代表 10^9 ；Hz 是頻率單位，1 GHz 指每秒振動 10^9 次。Hz 作為頻率單位，乃是紀念第一個以實驗證實電磁波存在的科學家 Heinrich R. Hertz (1857 ~ 1894)，參見 http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz)，甚或高到 60GHz (屬毫米波，毫米波指對應此範圍頻率電波的波長為毫米等級，即大於或等於 0.1 公分，而小於 1 公分之長度) 發射的電波中經基地台轉播。若不藉助這種高頻電磁波，天線與電路尺寸必需放到很大，才能有效率地發射或接收電波，完全不實用。基地台轉來的微波、毫米波，經天線接收後，需用濾波器取出所要的微波或毫米波。再以混波器 (Mixer) 把電磁波訊號頻率降低到原數位視聽訊號的頻率範圍，同樣照標準格式規定解碼回復其訊號後，以數位濾波器處理。微波及毫米波範圍的電路必須考慮電磁波在各種導波結構傳播的影響，不能以普通電子電路理論分析設計。本系大學部系訂選修「微波系統導論」及電信所選修課「微波電路」(含實作)，均包含微波乃至更高頻電磁波濾波器之設計。電信所電波領域各面向的研究質量皆領先國際，國內其他大學對微波濾波器設計也有相當研究，所以據傳台灣有「濾波器設計王國」之稱。

27. <http://audacity.sourceforge.net>

音訊號的資料隱藏」(Data Hiding Using Audio Signals)；也就是把某段聲音或資料藏在音樂之中，但是聽者無法察覺，而電腦可以用特殊的程式取出原藏的聲音或資料。本系貝蘇章教授指導的博士班學生許宇鳳(2001年畢業)，即曾發展出將小段鋼琴音樂或語音，秘密放入小提琴音樂中，並討論取出隱藏資訊之正確性受到雜訊、壓縮等干擾時的影響 [39]。過去這種技術主要是為偵測音樂智慧財產權歸屬，但由於盜版太多而不切實用。最近手機普及，有許多情境可應用這技術：例如大賣場某處揚聲器播放的音樂藏有附近商品折扣廣告訊息、網站 QR Code、或電子折價券等，客戶可由手機 APP 接收其中訊息；廣播電台可以把道路路況監視器傳來的影像內容置入所播放之音樂，收聽音樂的駕駛人可以經由不斷取出訊息並顯示影像的系統，真確地了解前方道路情況，電台主持人也就不必中斷音樂來報路況；互動電視的聲音可以包含節目粉絲社群的訊息，讓觀眾可以互相由聲音取出的簡訊，在社群網路中討論；也可以在大型室內環境放設數個揚聲器，播放音樂中隱藏的位置資訊，使手機使用者可因接收位置資訊得知自己位置。本校資工系吳家麟教授及張智星教授分別指導碩士班學生陳柏煒及白博元，運用不同技術，完成可展示隱藏與提取資料於音訊的關鍵核心系統 [40,41]。

四、創作

由於電腦 Synthesizer 能合成模擬的，並不限於現有樂器的聲音；幾乎可說是沒有甚麼限制。因此音樂作曲家能夠跳脫以往音樂創作的若干成規限制，例如：電腦音樂可以沒有調性，產生有點像雜訊的聲音。音樂家也可以照自己樂思，建構具有某些特色的聲音，組合成電子電腦樂器下的音樂；也可以擴充音域、節奏、速度範圍(有人能在 Tempo 為一分鐘 1000 拍之下，快速彈完音域超過鋼琴 88 個鍵的多種音色樂音嗎?)。此外，創作者可以讓電腦演奏時，精準執行她/他所賦予的任務。如果不希望每次的演奏都一成不變，也可以在演奏時，由演奏者依其詮釋操控電腦，達成所需的效果。而且，電腦音樂的創作者從發想到作品完成，甚至公開展演，都可以不假手他人。創作時也能隨時獲得立即回饋，及時修改或發展樂思²⁸。

早在 1900 年代，就有音樂家 Ferruccio Busoni 於 [42] 指出傳統古典音樂作曲「規則」(例如 12 半音(Semitone)之區分、七聲音階的結構、大小調調性、和聲學使用和弦的法則等等)，限制了作曲家表達情緒及對大自然感受的能力。他提到 [42]：

“But all arts, resources and forms ever aim at the one end, namely, the imitation of nature and the interpretation of human feelings.”

“Music is born free; and to win freedom is its destiny.”

此外，Busoni 也嘗試打破成規，將一個八度音程分為十八個 Third-tone²⁹，以「六」線譜表示，而非傳統五線譜所呈現的十二個 Semitone。這種新音階的聲音無法以當時的樂器演奏，但是他注意到 Thaddeus Cahill 當時已發明的電子樂器，可調整電流，產生任何音高的聲音。如此一來 [42]，

“How music may be restored to its primitive, natural essence; let us free it from architectonic, acoustic and esthetic dogmas; let it be pure invention and sentiment, in harmonics, in forms, in tone colors . . . let Music be naught else than Nature mirrored and reflected from the human breast . . . within Man himself as universally and absolutely as in Creation entire; for it can gather together and disperse without losing in intensity.”

28. 此段概念係由交大聲音與音樂創意科技碩士學位學程主任曾毓忠教授傳授筆者。曾教授領導的音樂科技實驗室及其個人電腦音樂專文請參看網頁 <http://smit-mtlab.nctu.edu.tw/> 及 <http://yc-tseng.blogspot.tw/>。

29. Busoni 可能不知道中國的五聲音階，以及印度與南太平洋島嶼土著使用的非十二半音的音階系統。

這樣的音樂美學觀念，開始傳承到電腦音樂的創作上。因此現代音樂家作曲就可脫離音高、和弦、節奏等的考量，以各式各樣的聲音作為素材，運用例如 Granular Synthesis [43] 之類的演算法軟體工具，將素材轉換成自己樂思所需要的聲音。再由原先的發想，將之編輯、組織、排序、混音、記譜、儲存、展演（現場可能還會有傳統樂器樂團或人聲合唱團加入）³⁰。所完成之典型電腦音樂³¹，可以參考台師大音樂系趙菁文教授的作品「鑼鼓運動」[44]（台灣唯一入選 2012 年世界音樂節的作品 [45]）。當然如此的創作，不太可能用傳統五線譜紀錄。交大聲音與音樂創意科技碩士學位學程主任曾毓忠教授³² 在他 Blog 裡的一篇專文 [46]，介紹許多記譜方法，可以參考。不過，正如 Busoni 所說 [42]：

“Only a long and careful series experiments, and a continued training of the ear, can render this unfamiliar material approachable and plastic for the coming generation, and for Art.”

這種電腦音樂的創作需要不斷的實驗修改，還要長期練習自己的聽力。老實說，聽眾也非常需要訓練和專家的指點，因為這樣的音樂與我們自小熟悉的古典及迄今各式流行音樂完全不同³³。

整個創作相當倚賴電腦軟體的協助，就筆者所知：普遍使用且功能強大的是 Max/MSP [47]，由原先在 IRCAM [25] 工作的 Miller Puckette 於 1980 中期所開發，以本文第二節提到的電腦音樂先驅

30. 此一概念亦係交大聲音與音樂創意科技碩士學位學程主任曾毓忠教授傳授筆者。

31. 台灣最早的電腦作曲家為本系系友林二學長（1934 ~ 2011；沒錯，他哥哥就是林一），獲美國西北大學音樂碩士。曾於 1965 年在芝加哥舉辦電腦音樂發表會，被譽為「電腦蕭邦」。1974 年回國，致力整理台灣傳統歌謠及音樂教育，並為台語流行歌《相思海》的作曲者。相關資料參見 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9E%97%E4%BA%8C>。稍後的電腦音樂先驅尚包括馬子民教授與溫隆信教授（http://yc-tseng.blogspot.tw/2011/03/blog-post_19.html），及創立中華民國電腦音樂學會的前師大教授曾興魁先生（http://www.wusanlien.org.tw/02awards/02winners36_d01.htm）等。台灣電腦音樂的早期發展可參考：林曉筠，電子電腦音樂於臺灣發展之研究，國立台北師範學院音樂研究所碩士論文，2005（曾毓忠教授指導）。本校音樂所草創時期，聘有義大利裔阿根廷籍康嘉鐸（Ricardo Canzio）教授，除西藏音樂文化等之教學研究外，曾建立一套電腦音樂作曲環境。他先後有一兩位研究助理後來也申請到 IRCAM 許可，到 IRCAM 攻讀博士。康教授現已離職，但音樂所 103 學年第一學期仍有山內文登教授開設「媒體、機器、音樂」課程，部分內容似與電腦音樂相關（課程大綱請參閱 https://nol.ntu.edu.tw/nol/coursesearch/print_table.php?course_id=144%20U1060&class=&dpt_code=1440&ser_no=11712&semester=103-1&lang=CH）。

32. 曾教授的一位高足黃志方博士，現於元智大學任教（http://www.infocom.yzu.edu.tw/03_teacher/details.asp?username=%B6%C0%A7%D3%A4%E8），兼具工程與藝術背景，在電腦音樂教學研究與創作等方面表現均甚傑出。

33. 這可能有認知神經科學上的解釋：腦中的神經迴路靠許多震盪器維持合作，音階結構下的音高關聯也許和一些震盪器的頻率關係相似，讓我們聽了有娛悅感；頻率為整數比的和弦音如同時出現，則使人感覺和諧（傳說莫札特三歲就在鋼琴上找和弦音；<< 論語 >> 述而篇記載：「子與人歌而善，必使反之，而後和之」。這不知是否相當於現在的二部合唱？如果答案是肯定的，那麼孔子的音樂造詣必然不低；但多年前筆者所知的國樂團還是以齊奏方式演出，近年才有分部和聲演奏出現）。這可能也是世界各大文明，都將八度音程依不同整數比例分割成數個不同音高，構成各種音階的原因：例如，中國為五聲音階（宮、商、角、徵、羽，後來又加入變宮、變徵，也成為七聲音階；另外還傳說由黃帝的樂官伶倫開始，規定使用固定半徑的竹筒，以不同竹筒長度換算的黃鐘、大呂等十二個標準音高）；印度則有包括二十四聲在內的多種音階。以不同音為音階主音（轉調），會得到不同的調性，聽者的感受也不一樣。隨意轉調後要能夠維持音階各音高相對關係，必須依據十二平均律，規定十二個音（相當西洋音階的十二個半音）相鄰兩音之間，較高音頻率為較低音頻率的 $\sqrt[12]{2}$ 倍（明朝王族朱載堉 1584 年即已推算出此一平均律）。西方則要到 1772 年，巴哈才完成十二平均律鋼琴曲集。失去調性的聲音，尤其是隨機作曲法產生的「電腦音樂」，則聽起來接近電子儀器內的雜訊。不過人類的聽覺喜好，似乎與經驗學習有關，所以有一些流行歌曲剛開始覺得難聽，但天天聽廣播電視打歌，漸漸就可以接受了。又如現代音樂開創者之一，史特拉汶斯基（Igor F. Stravinsky, 1882 ~ 19721）的「春之祭禮」（The Rite of Spring），1913 年首演時，顛覆傳統的風格差點引發聽眾的暴動，後來卻成為音樂史上的重要里程碑，現在聽起來也沒甚麼難以接受的感覺。社會文化的步調可能也是一種因素，例如筆者成長過程廣受歡迎的老流行歌，許多年輕一代覺得步調太慢，反而喜好快節奏，但我們聽來像噪音，有時充滿嘶吼發洩的搖滾、重金屬。這可能也是歐美國家的古典音樂會，聽眾年齡層偏高，且人數下滑的原因之一。有些著名的古典音樂團體如柏林愛樂交響樂團，如今也經常到亞洲巡迴演奏。所以學院派作曲家教育我們：他們求新求變的作品，事實上是寄望未來世代的聽眾給予肯定。不過這種思維下，現代名作曲家 John M. Cage Jr.（1912 ~ 1992）於 1952 年創作展演的「四分三十三秒」（'4'33"，<http://en.wikipedia.org/wiki/4%E2%80%B233%E2%80%B3>）好像太過頭：作品發想絕對原創，但大概不可能再被演出了。

Max Mathew 命名。此一軟體是專為音樂及多媒體設計的「視覺化及資料流程式設計語言」(Visual and Dataflow Programming Language)：使用者只要把各種「板塊」(Patch，具備系統提供的特定功能)圖形，「拉」進視窗工作區，再以線條連結，決定同步執行各 Patch 的順序及所需參數，便可完成以流程圖方式呈現的樂曲創作。此外，較熟悉的使用者也可以依需求，自行開發 Patch 來應用。在 Max 官網 [47]，於 community 項下選擇 video 選項，就能看到許多利用 Max 完成作品的過程介紹影片。隨著軟體技術的進步，Miller Puckette 自 1990 年代又開發了功能更為強大的開放原始碼軟體工具 Pure Data [48]，可自網站 [49] 下載應用。

普通音樂創作上，也有一些方便的軟體工具可用。例如：小朋友都能上手，適合中小學音樂教育的 Hyperscore [50] (由 MIT Media Lab，Tod Machover 領導之 Opera of the Future 團隊成員 Morwared Farbood 開發 [51])；以及為音樂作曲者提供協助的一系列軟體 [52]，較著名者為 Finale [53,54]。

電腦不但能幫助作曲家，本身也可以創作樂曲。自動作曲向來被認為是人工智慧研究的領域之一；1960 年蘇俄 R.Kh.Zaripov 研發出世界第一個利用電腦科學演算法作曲的程式 [55]。但在此領域耕耘最久，也極有成就的是 University of California at Santa Cruz 教授 David Cope [56]。自 1981 年起，他最初研發的 Experiments in Music Intelligence (EMI) 程式 [56]，能夠分析許多古典音樂作曲家作品的結構，進而巧妙地組合某個音樂家樂曲的小片段，創作出風格近似 Bach、Mozart、Chopin、Stravinsky、Rachmaninoff 等人的音樂。他的夫人是一位鋼琴家，曾經公開演奏過電腦用這種方法作出的鋼琴曲。Cope 也試過以 Mozart 與姐姐來往的書信內容，讓電腦創作出 Mozart 風格的歌劇，並由真人演唱。到 1990 年代，David Cope 嘗試以「鼓勵」、「不鼓勵」等方式，教導虛擬作曲者 Emily Howell [57,58]，由之前 EMI 產生的音樂資料庫，學習創作樂曲。本文引言提到的虛擬作曲家 Emmy (應該便是 Emily 的暱稱) 所作的樂曲，便是如此創作的。這種電腦利用資料庫，藉由嘗試錯誤 (由真人判定好壞)，以「基因遺傳演算法」(Genetic Algorithm)³⁴ 培養出音樂乃至其他藝術創造力的研究，可以參閱 [59-62] 等書。

五、儲存

音樂家的展演，透過空氣微小的振動抵達我們的耳朵。如果沒有適當的儲存方式，他們的演出就變成我們逐漸淡忘的印象。一般而言，音樂的呈現可以用黑膠唱片、錄音帶、光碟、磁碟等儲存其振動波形，也可以使用符號如樂譜、MIDI 檔、MusicXML 檔³⁵ 等存放音樂的旋律音高、節拍、音量等特徵。儲存波形的好處便是比較可以達到「原音重現」的效果，但是需要容量較大的儲存媒體。看樂譜需要相當的訓練，而且其詮釋會因人而異。MIDI 檔案較小，容易存在電腦裏，但是同一個 MIDI 檔在不同 Sequencer (專門處理 MIDI 檔案的軟硬體系統) 播放的時候，會在不同 Synthesizer，發出同旋律但音色有差別的音樂，不能重現原先音樂。至於 MusicXML 檔，就等於是利用 XML 文件標記語言，在電腦裡記錄樂譜，可印出紙本正規樂譜，或者以光學辨識技術把紙本樂譜轉成 MusicXML 檔。當今的數位音樂，透過麥克風收錄的音樂原音連續訊號，每隔一段極短時間對音量大小取樣 (Sampling) 一次，並將所得聲音樣本的音量強弱以二進位數值記錄，方便電腦儲存及處理。單位時間取得的樣本個數稱為取樣率 (Sampling Rate，指每秒取得的樣本個數)，和一般振動頻率相同，也以 Hz 為單位。

34. 模仿自然界生物演化過程，以交配、突變、天擇等方式，經多個世代進化，取得符合目標結果的演算法；也常常視為機器學習的一種途徑。台大電機研究所開有可供大學部高年級同學選修的此項課程，亦有教授從事相關研究。

35. 參考維基百科說明 <http://en.wikipedia.org/wiki/MusicXML>。

例如：22050Hz 的取樣率，代表每秒擷取 22050 個樣本值。有一個著名的數位訊號處理理論 Sampling Theorem³⁶，證明只要取樣率高過原連續訊號頻譜中最高頻率的兩倍，就能用特定方法，填補樣本間空隙的訊號，而完全回復原先訊號。根據心理聲學 (Psychoacoustics)³⁷ 實驗顯示 (耳鼻喉科醫師就用這種實驗方法，測病人左右耳聽力是否正常)：人耳一般能聽到的聲音頻率上限為 22KHz (即 22,000Hz) 左右，所以取樣率只要超過這個數值的兩倍，就有可能重現原音。基於此一原理，數位錄音製成音樂光碟，取樣率設為 44,100 Hz³⁸。依照其設定，每一聲道一秒鐘的音樂便需要七十萬位元 (位元 Bit，代表 0 或 1) 左右的儲存空間，兩分鐘左右的歌曲便達到約 20MB 大小 (兩千萬位元組，位元組 Byte 由八個位元組成)。Windows 系統內的 .wav 音訊檔。即是以此種方法記錄儲存。檔案如此龐大，顯然不利於複製或由網路下載。

上述的數位音樂檔所以需要如此大的空間，主要是沒考慮人耳聽覺特性，錄下許多冗餘資訊。據心理聲學 (Psychoacoustics) 研究，人耳其實對不同頻率的聲音成分敏感度不同：通常 2~5KHz 左右頻率的聲音最容易聽到；而低至 100Hz 以下或高於 15KHz 頻率的聲音，則需要極強的音量方可聽見³⁹。此外，某一頻率聲音音量夠大時，此頻率附近頻率的聲音便要有比平常更大的音量才能被聽到，這稱為遮蔽效應 (Masking Effect)。日常生活中，假如頭上有噴射機呼嘯而過，此一瞬間我們要提高聲量，別人才聽得到我們講話的聲音，就是這個緣故。因此可將音樂分小段連續求得各小段聲音的頻譜，依照上述的心理聲學理論動態分配描述此一小段聲音各頻率成分強弱的位元數：人耳聽得清楚的頻率成分，以較多位元記錄；不易聽出的頻率成分，就只分到少量的位元或根本省略。最後再搭配一些常見的檔案壓縮技術，將各種數值依照標準格式儲存。解壓縮時，根據壓縮檔的內容，可以相當準確地讓人耳聽到原來的聲音訊號。這便是通稱 MP3 的 MPEG-1 or MPEG-2 Audio Layer III 技術⁴⁰，於 1995 年左右問世。在低失真要求下，一般可將原先音訊檔壓縮十餘倍。這種利用人類感官特性壓縮訊號的技術，同時也用來縮減圖片與影片的數位檔案大小，通稱為 Perceptual Coding⁴¹。

自原音壓縮成的 MP3 檔，由於所需位元數大為減少，很適合由寬頻或無線網路快速下載，乃至由廣播網站即時播放。也因此消費者可跡近免費取得想聽歌曲，也避免了只想聽某首歌，卻需購買包含其他歌曲的音樂 CD 之困擾。2001 年時，蘋果公司推出 iPod 隨身聽，可以播放包括 .wav 及 MP3 等格式的音訊檔；並於 2003 年推出本文引言中提到的網路商場 iTunes，供消費者以每首 1.29 美元的價格，下載由原廠提供的高品質音樂欣賞。同樣在引言述及的 KKBox，則是相似的主要華文音樂線上商店。另一類型的網站則像本文開始時提到的 last.fm，播放並可依使用者喜好推薦適當音樂，另外還接受新創歌曲上傳，供網友欣賞，提高創作者知名度。此種發展使整個音樂產業轉型：不再以音樂 CD 為銷售主力，而改成藉由高知名度歌手與樂團之週邊產品及大型演唱會活動門票收入獲利。一種新科技的出現，在短時間就幾乎摧毀整個原先興盛的產業，這類「破壞性創新」並不多見。

36. 在「訊號與系統」課程中教授。

37. 參考 <http://en.wikipedia.org/wiki/Psychoacoustics>。

38. 常用的取樣率還有多種，例如 48KHz (K 代表 1000)。有些「金耳朵」等級的行家宣稱 44100Hz 取樣率不夠，他們可聽到更高的頻率成分，所以也有以 96KHz 錄製的音樂。然而，仍有人覺得數位音樂聽起來就是不對勁，所以近幾年來先被視為骨董的類比錄音黑膠唱片，又開始在特定族群中流行。

39. 聽見高頻音所需音量與年齡有關：年紀愈大，所需音量愈高。傳說美國超市曾播放聽了難受的高頻聲音，將音量控制在青少年聽得到，而中年人聽不到的範圍；因而得以趕走盤踞店門，妨礙消費主力之中年顧客進門的成群青少年。反過來說，似乎也可開發某種手機 APP，讓青少年學生如想上課聊天，可趁老師不注意時，將語音頻率提高與給另一同學對話，而不讓老師聽到。

40. 有關說明請參閱 <http://en.wikipedia.org/wiki/MP3>。

41. 本校副校長陳良基國家講座教授、本系副系主任簡韶逸教授、故交大劉啟民教授等，在 MPEG 影音壓縮及解壓縮的演算法軟體及晶片 IC 設計研發均有重要貢獻，對國內外相關產業發展居功

六、聆聽

上一節提到的心理聲學，應該是最先出現的聽覺研究。隨著解剖學、神經生理學、認知心理學等學術領域的進展，科學家逐漸能掌握人類聽覺系統的運作機制：聲波由耳廓（Pinna）進入耳道（Canal），振動鼓膜（tympanic membrane），由三小聽骨（鎚骨，malleus；砧骨，incus；鐙骨，stapes）放大振動，經由卵圓窗（oval window）進入耳蝸（cochlea）。傳來的振動在耳蝸構造中的基底膜傳播，各個振動頻率成分振幅達到最大處所需的傳播距離不同，驅動該處與耳蝸連結的纖毛（Hair Cell）⁴²，將振動轉為電脈衝神經訊號傳到大腦聽覺區域⁴³。此一過程中，耳蝸可說是頻率分析器，其原理及初步模型係 Georg von Békésy（1899～1972）發現。他並因此貢獻獲 1961 年 Nobel Prize in Physiology or Medicine⁴⁴。藉由多年的相關研究，神經科學家、醫師、及工程師合作，製出對應各種聽覺缺憾的助聽器，造福許多聽障人士。國內清華大學劉奕汶教授領導的 Acoustics and Hearing Lab，在耳蝸及纖毛的數學模型發展方面，已經有相當成績 [63]。本校音樂研究所的蔡振家教授 [64] 則結合聲學、神經科學、認知心理學各領域的研究，探討音樂對人類及其他動物生理與心理的影響，著有 << 音樂認知心理學 >> [65] 等書。美國的 Daniel J. Levitin 擁有 CCRMA 學位，對音樂與大腦的認知也有深入研究，寫了一本科普讀物 << 迷戀音樂的腦 >> [66]。

絕大部分有關聲學、音響、聽覺系統等研究的優秀論文，都能在歷史悠久的 Acoustics Engineering Society（AES）[67] 主辦之 International AES Convention 及其學術期刊 Journal of the Audio Engineering Society 中發表。另一具有深厚傳統的學會是 1929 年成立的 Acoustic Society of America（ASA）[68]，其 ASA Meeting 及 The Journal of the Acoustical Society of America（JASA）也分別公認為國際上所有有關聲音研究的重要會議與期刊。除此之外，還有於 1972 年至 1993 年稱為 Interface，1994 年迄今定名為 Journal of New Music Research [69]，以及 MIT Press 於 1977 年創刊的 Computer Music Journal [70]，均為電腦音樂著名學術期刊，常登載（甚至包括哲學、美學等領域）重量級學者的優秀論文。

同時，聽覺系統尚有聽聲辨位的功能。筆者在 [1] 已說明其原理及衍生之 3D 音響應用。除了 [1] 提到的虛擬實境外，3D 音響技術可以僅使用兩個揚聲器，模擬出多聲道及環場音效等高級音響效果。就筆者所知，芬蘭的 Aalto University 有一個研究群在與頭部有關的聲效方面，研究相當深入 [71]。

前述的聽覺系統運作，經過簡化，以電腦讓數位聲音訊號轉為頻譜，將頻譜分段交由多個帶通濾波器處理，再做一些轉換，可計算出稱為 MFCC⁴⁵ 的一串數值，常用於「自動語音辨識」⁴⁶（Automatic Speech Recognition, ASR）及音樂分類（Music Classification）。其中的帶通濾波器群，各濾波器通常依照耳蝸的分類特性設計，化約成隨中心頻率改變頻帶寬的不同三角形形狀⁴⁷。因此 MFCC 含有一些像人耳處理的成分，成為可以相當程度代表原來聲音訊號經過人耳後的重要聲音特徵（Feature）。

電腦能算出來的聲音訊號特徵當然不只 MFCC，音訊工程師可以找出來的特徵超過上百種。芬蘭的 University of Jyväskylä 音樂系開發出的軟體 MIRToolbox [72] 經常被用來計算各種音訊特徵。由這些特徵，便可以配合有分類標記的音樂資料庫，利用「機器學習」訓練電腦程式，使其能對即使原先不在資料庫內的音樂，也能判斷其適當的分類。

42. 資料顯示，長期處於大音量聲音環境，會傷害纖毛，進而使聽力受損。所以重金屬之類的樂手或交響樂團指揮，容易有聽力問題。

43. 參見 http://en.wikipedia.org/wiki/Auditory_system

44. 參看 http://en.wikipedia.org/wiki/Georg_von_B%C3%A9k%C3%A9sy

45. 又稱 Mel-frequency cepstrum，參看 http://en.wikipedia.org/wiki/Mel-frequency_cepstrum。

46. 電信所有「數位語音處理」課程，包含此部分內容；大學部高年級學生可選修。

47. 更接近人耳反應，但複雜許多的是 Gammatone filter，請參看 http://en.wikipedia.org/wiki/Gammatone_filter。

本系碩士班學生蘇柏青（California Institute of Technology 博士，現為本系助理教授）遠在 MIRToolbox 出現之前完成的碩士論文 [73]：以頻譜高峰分析、音量大小變化週期分析等方法，直接決定複音音樂的各音符音高、節奏、和弦。另用小波轉換（Wavelet Transform）⁴⁸ 得到另種樂音特徵，透過稱為 Self-Organized Map 的類神經網路（Artificial Neural Network）⁴⁹ 的訓練，辨識出樂器音色。由是將 .wav 檔轉成樂譜呈現。由於內容創新完整，英文寫作架構簡明易懂，獲得 2001 年國科會最佳碩士論文獎。蘇教授完成的整合音樂識譜系統所輸出的樂譜，偶而會出現原譜沒有，另一個相隔八度的音。這是因為較原音高八度的樂音基頻，恰好是原音基頻的兩倍，所以原音頻譜高峰分析時，若其兩倍頻處有不能忽略的峰高，就可能被視為疊加有另一個差八度的樂音基頻，造成兩個音符同時出現在樂譜上的誤差。蘇教授碩士論文中以 Self-Organized Map 分辨音色的方法前所未見，因此得以在國際重要的聲頻與語音訊號處理會議發表 [74]。另一位碩士班學生簡御仁（現就讀本院電信所博士班），針對此種八度音問題提出一種解決方法，在一定條件下，可以解決此一問題至相當程度，成果隔年亦發表於同一會議 [75]。就筆者所知，此種八度音問題迄今尚未有完全解法，是電腦音樂長久以來的重要難題之一。

談到對電腦對音樂的分析，一定要提日本的後藤真孝博士（Masataka Goto，日本產業技術綜合研究所，情報技術研究部門首席研究員，領導 Media Interaction Group）[76]。他研究音樂旋律、音色、節拍，歌聲合成等即時追蹤技術十多年，有很多出色的成果，並且產生許多有趣的應用（例如對初音未來所唱的 PROLOGUE，即時分析音樂結構、階層式的節奏結構、旋律線、和弦等，並且同時在網頁上呈現 [77]；卡拉 OK 影片中歌詞自動與歌聲同步；節奏追蹤用來替音樂遊戲如「太鼓達人」、舞蹈遊戲如「唯舞獨尊」自動標定拍點等）。現今讀者如要進行類似之樂理分析，可以使用以 Python 撰寫的 Music21 [78]。本院電信所碩士班學生陳韋安⁵⁰（已畢業）與網媒所博士班學生林志鴻，首創以社群網路（Social Network）⁵¹ 原理：將樂曲中的音符連結視為社群網路，稱為 Harmony Graph。接著可以把一首樂曲對應的社群網路視覺化，顯示於電腦螢幕；或透過對此種社群網路形態算出網路特徵，分辨不同作曲家風格的樂曲；或模仿其風格，作出相似樂曲 [79]。

另外，美國 Carnegie Mellon University 的 Roger B. Dannenberg 教授 [80] 亦從事電腦音樂研究二十多年，有很多建樹，可在 [81] 瀏覽他一些作品的影片（包括早期為小號、歌聲、樂團所完成的電腦自動伴奏系統，現在看起來還是覺得不可思議）。據悉，Dannenberg 教授最近的研究和音樂與電腦配合的即興演奏有關。在此方面讓電腦參加的爵士樂即興演出，需要電腦程式聽懂領奏者臨時靠靈感演奏的旋律，還能依照一些音樂規則跟進，即時產生呼應音樂，頗有難度。在 Rochester Institute of Technology 任教的 Al Biles 教授 [82]，以基因遺傳演算法研發之 GenJam 系統似乎相當成功，可瀏覽他在 TEDx 的演講及示範 [83]。

48. 小波轉換是一種功效與概念類似 Fourier Transform 的計算方法，它有一些 Fourier Transform 沒有的優點。本系研究所開有「時頻分析和小波轉換」課程，大三、大四同學可選。

49. 類神經網路模仿人腦神經結構，以訓練資料調整其中參數，使沒用來訓練的資料也能被正確分類，是機器學習的一種方法。本系研究所開有此一課程，大學部高年級學生可以選修。Self-Organized Map 是種特別的類神經網路，訓練資料不必加上分類標記，它自己會依照訓練資料特徵組成適當架構，對另外輸入的資料分類。這種學習方式稱為 Unsupervised Learning。如訓練資料附有標記，電腦會根據輸出分類與資料上的分類標記比較，以其對錯調整參數，稱為 Supervised Learning。

50. 陳同學修台師大音樂系「和聲學」課程時，作業繳兩份：一份為自己完成，另一份寫一個電腦程式，照和聲規則完成。結果不知情的老師，給電腦完成的作業較高的評分。

51. 如臉書用戶群組、科技論文作者彼此間的合作關係等，均為社群網路的實例（參看 http://en.wikipedia.org/wiki/Social_network 介紹）。此一領域最為人所知的重要研究為「小世界實驗」（Small-World Experiment），實驗結果歸納出了 Six Degrees of Separation 原理；即世界上任兩人之間，透過最多六個「朋友的朋友」關係，便能連接起來（參考 http://en.wikipedia.org/wiki/Small-world_experiment 及 http://en.wikipedia.org/wiki/Six_degrees_of_separation），本院資工所及網媒所開有「社群網路分析」課程。

既然電腦可以「聽」得出旋律，那麼唱卡拉 OK 選歌時，就可以不必翻閱厚重的點歌本找代碼：即使想不起歌名，只要對麥克風哼一段想唱的歌曲片段，讓電腦到歌曲資料庫裡搜尋，便可快速找到對應的音樂。學術上這種技術稱為「哼唱選歌」(Query by Humming/Singing)。本院資工系張智星教授早在 2000 年代，即開發完成此種軟體，以旋律每個音與前一個音相比：音高上升，就記 U，下降就記 D，並且把前後音音高的差距也記錄下來。因此一段旋律就以一系列 U 和 D 組合的字串，加上音高差距表示，做為代表旋律的特徵。此種特徵在比對尋找對應歌曲時，顯然較檢查旋律中每個音高的直覺做法要快得多。張教授研究團隊因此獲得多項國際程式設計比賽冠軍，並曾商業化為「超級點歌王·卡拉迷」產品。目前此一軟體已可免費於一些網路商店如 [84] 下載，並可於張教授領導之 mirlab 實驗室網站 [85] 體驗。

電腦取得許多樂曲特徵之後，配合機器學習技術及人工分類標記的音樂資料庫，可以將大量的音樂分類，以便如 Amazon 網路商店般，依愛樂者檢索方式，列出依照符合條件程度高低排列之推薦歌曲清單 (Recommendation List)，從中挑選聆賞。這方面的研究稱為「音樂資訊檢索」(Music Information Retrieval, MIR)⁵²，前述的「哼唱選歌」便是其中的一個重要分支。音樂分類的類別，可以人耳聽覺的主觀感受區分。例如樂種 (Genre) 分類：最早的論文由 George Tzanetakis 與 Perry Cook 在 2002 年發表 [86]，他們研發的系統能由三十秒的音訊，分辨古典、爵士等十種音樂，正確率約為 61%，接近人類表現，開創此類 MIR 研究的先河。

電腦也可分辨聽者認知音樂所表現的情緒，或自身聆聽感受到的情緒。心理學上對情緒的量化研究有相當長的歷史，一般認為最主要的因素為 Valence (正向或負向) 及 Arousal (Active 或 Passive)。二者的大小，配合心理學實驗結果標定的情緒名稱，可大約表示情緒種類。Roddy Cowie 等人於 2000 年發表論文 [87]⁵³，提出稱為 FEELTRACE 的電腦圖形處理系統：在一個單位圓內，橫軸由左向右代表 Valence 由負向至正向，縱軸由下往上表示 Arousal 由 Passive 到 Active；再讓使用者參考圖形上已有的一些情緒文字標示，在圖中決定一點代表受試者的情緒感受。FEELTRACE 顯示圖形於電腦螢幕，並記錄受試者隨時間改變的情緒代表點座標。這種圖示中，第一、二、三、四象限的點大約分別代表快樂、憤怒、沮喪、安寧等情緒。本系博士班學生吳天麟曾播放「梁祝小提琴協奏曲」，讓多位受試者一面聽，一面在 FEELTRACE 圖上標記感受到的情緒。如圖 2 所示：其中兩位受試者的標記軌跡十分相似，他們應該可以說是一對「知音」。

本系特聘教授陳宏銘博士 [88] (所主持的 MPAC 實驗室 [89] 有許多世界級的成就) 與其指導之學士直攻電信所博士班研究生楊奕軒 [90] (已獲學位，現為中央研究院助研究員，迭獲國內外重要榮譽獎項)，乃是音樂情緒自動辨識的先驅；發表相關論文無數，且其中連續數年多篇均發表於 ACM Multimedia

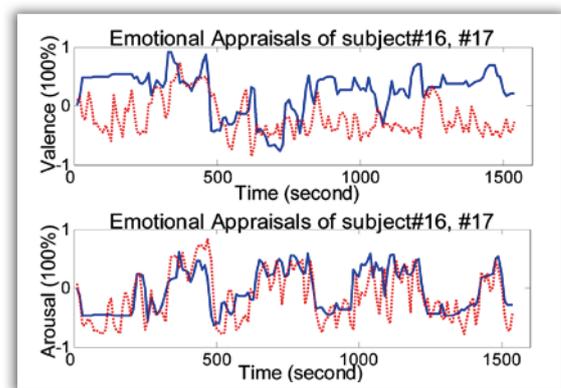


圖 2 兩位受試者聆聽「梁祝小提琴協奏曲」時，在 FEELTRACE 紀錄的情緒表示軌跡

52.「資訊檢索」(Information Retrieval, IR) 研究開始較早，但多以文字搜尋相關文件內容，進而取得所需「知識」為主題。早期的網頁搜尋器，如 Yahoo 與後來居上的 Google 系統，可以看成是當年 IR 的最主要應用。資工系陳信希教授在資工所與網媒所，開有「資訊檢索與擷取」課程。

53. 原文在 <http://www.dfki.de/~schroed/articles/cowieetal2000.pdf> 較易取得。

(ACM MM, 多媒體學術界公認論文接受率最低之重要國際會議, 台灣每年在此會議發表之論文篇數大多為個位數)。例如, 於 2008 年此會議發表的 Mr. Emo 系統: 能依照聽者在類似 FREETRACE 圖形上以滑鼠手繪筆跡曲線, 依序播放資料庫中可表現曲線經過點所代表情緒之樂曲, 構思巧妙, 甚受學界矚目 [91]。本系陳志宏教授 [92] 指導之博士班學生林遠彬 (已畢業, 現在美國博士後研究), 在陳教授領導之 NTUEE Interdisciplinary MRI/MRS Lab [93] 中, 量測受試者聽各種音樂時的腦波訊號, 擷取腦波訊號特徵。同樣以機器學習, 訓練電腦軟體分辨受試者聽音樂時, 產生之情緒感受分類; 此一原創性研究成果發表於國際學界重視的 IEEE 生醫工程期刊 [94]。

本系博士班學生王如江 (已畢業, 在美國博士後研究) 由中央研究院王新民老師 [95]⁵⁴ 與筆者共同指導, 則由音樂標籤 (Tag)⁵⁵ 入手, 導出新的機器學習數學模型, 建立歌曲特徵與音樂標籤之對應。可自動對歌曲加入適當標籤, 一起輸入音樂資料庫, 並將標籤照其相關程度, 以不同顏色及大小的字型顯現於螢幕, 方便使用者以標籤搜尋審視符合條件的樂曲, 其成果亦發表於 ACM MM [96]。此外, 王同學與中研院研究助理駱宏毅合作開發的一套音樂標籤自動辨識系統, 2010 年在世界高手雲集的 Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX 2010) 中, Audio Tag Classification 項目的多種評分方式及綜合總分獲得冠軍 [97]。

MIREX 競賽的項目甚多, 如由古典音樂判斷作曲者 (Classical Composer Identification)、樂曲結構分段 (Structural Segmentation)、翻唱歌曲辨識 (Audio Cover Song Identification) 等與音樂資訊檢索有關的研究均予列入。此一競賽伴隨全世界音樂資訊檢索最重要的專業國際會議 International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR) 舉行。ISMIR 自 2000 年開始舉辦, 筆者曾參加 2004 年會議, 當時參加者估計百人左右, 台灣亦只有交大博士班學生蔡偉和 (已畢業, 現為國立台北科技大學教授 [98], 領導 NTUT Multimedia Signal Processing Lab [99])。在電腦音樂相關研究, 如歌手辨識與模仿、流行音樂中人聲消除⁵⁶、卡拉 OK 歌唱評分方法等, 有很傑出的成果) 兩人參加。然而, 隨著網路音樂服務普及, 對各種以音樂內容意義 (Semantics) 有效存取方法的研究需求日增; 以及語音處理部分技術可以用在 MIR 上, 使許多原先研究語音訊號處理的人員亦相繼投入此一領域, 會議參加人數因此急速攀升。特別今年 (2014) 的 ISMIR 連同 MIREX, 由於張智星教授在歷屆會議中的優異表現 (經常發表重要論文及在 MIREX 各項比賽奪冠或名列前茅) 與熱心投入 (例如提供 MIREX 比賽所需的各種音樂資料庫等), 爭取到在台北市舉行 (十月二十七至三十一日) [100]。全台電腦音樂研究學者均全力配合, 並有不少國內外知名企業及政府單位贊助, 國際頂尖機構研究人員亦將來台分享最新研發成果, 屆時盛況可卜。

此外, 同時將與 ISMIR 2014 合辦國內已連續舉行九年之 International Workshop on Computer Music and Audio Technology (WOCMAT)。此一會議由師大音樂系趙菁文教授、當時在清大的張智星教授、成大資工系蘇文鈺教授及筆者發起, 第一屆於 2005 年在本系博理館舉辦。會議特點是讓國內音樂家與

54. 王老師領導中研院 Speech, Language and Music Processing Lab (SLAM) 多年, 同樣有許多國際級學術成就。

55. 一般音樂網站提供之樂曲, 常有網友加註個人認定之音樂特質, 即是各曲之標籤。例如: 鋼琴、懷舊風、柔和的、爵士、八〇年代、披頭四等, 亦包含有關情緒的標記, 甚難界定其涵括範圍。

56. 歌聲與伴奏分離學術上是 Channel Separation 問題的一種, 類似情況出現在很多領域之中。但因其為所謂的 Ill-posed Problem (解決問題所需的資訊不夠充分, 且可能出現不只一種答案), 一直是訊號處理的難題。目前有一些解法, 但距離實際所需尚有一段距離。成效較好的解決方法多半有條件限制, 或需要增加一些資訊輸入。例如: 假設樂曲是錄音時, 伴奏與歌聲分開錄製, 經後製作混音而成 (當然我們手中是混合後的聲音, 而且拿不到原來分開的錄音), 或者知道樂團主唱與演奏樂器的其他成員之間的相對空間位置等。典型的問題說明可參考影片 <https://www.youtube.com/watch?v=JYO7Fj5BORM>。

電腦工程師共聚一堂，不但有音訊處理及音樂理論論文發表，也有甄選音樂作品的展演，得以讓藝術與工程相關研究者有對話機會。這樣的跨領域研討會在台灣可能尚屬創舉，因此參加人員極為熱絡，筆者亦曾於《台大電機之友》第十八期為文報告會議過程 [101]。第二屆 WOCMAT 由師大主辦，將規模擴充至國際，邀請多位國外傑出的電腦音樂學者參與盛會。之後，交大、開南大學、台南藝術大學等輪流舉辦，會議仍簡稱 WOCMAT，但正式名稱已在 Workshop 前加上「International」，成為常態的國際性會議了。國際上類似會議較重要者為：有四十年歷史，The International Computer Music Association 主辦的 International Computer Music Conference (ICMC)⁵⁷，以及舉行過十一年的 Sound and Music Computing (SMC)⁵⁸。

七、音樂與多媒體藝術

由於影音多媒體訊號處理的快速發展，音樂自然地開始與圖像、影片等相結合，產生新的多媒體藝術及應用。本文引言提到的「互動式之數位內容呈現」，即是推廣音樂情緒辨識技術至圖片⁵⁹（例如依照音樂情緒同時播放相似情緒表現的照片 [102]）、部落格文章等內容，並自動分類標示其情緒；另以生理訊號監測，判斷閱聽者對同時播放之音樂、圖片、部落格文章等是否喜歡（學術上可視為「多種感官訊號感知」（Multi-modal Perception）的一種形式），決定持續或切換成適當對應情緒的視聽內容。此一展示系統為本院前院長李琳山教授主持之「多媒體生活環境的數位內容科學」子計畫（屬本系前系主任，筆者之指導教授，教育部國家講座主持人陳俊雄教授主持，台大執行「國科會大學學術追求卓越發展延續計畫」的兩項總計畫之一）下，由本系博士班學生吳天麟、楊奕軒協調各參與教授指導之研究生依專長組成團隊，發揮創造力，自主完成。其中還用到了資工系吳家麟教授（本院多媒體與網路研究所創所所長）指導之博士班學生朱威達（已畢業，現為國立中央大學副教授）領導其他三位研究生完成的 Tiling Slideshow 系統 [103]（獲得 ACM MM 2006 會議的 Best Full Technical Paper Award），使視聽效果極為動人。計畫結案時，並獲評審委員一致好評，推薦於 ACM MM 2008 會議的 Demonstration Session 發表 [104]。吳教授指導的另一位碩士班學生陳萱瑋，論文主題為「依照電影配樂節奏分割電影及製作摘要的方法」[105]，利用音樂訊號節奏配合「電影文法」及場景變換偵測，將動作電影如李安的成名作「臥虎藏龍」，切割為電影剪輯分析所需的故事片段，並能由節奏高點的片段影片作出電影摘要。與陳同學同年畢業的另一位碩士生黃振修，亦由吳教授指導。將家庭或一群朋友之活動（例如婚禮、旅遊）全程或長時間攝錄的影片，由影片特徵如亮度、色彩分佈、動作方向、人臉等擷取重要片段，配合所選的一首短時間（多半是幾分鐘）音樂；在音樂拍點處，伸縮重要影片片段長度，達成影音內容和諧同步的效果。運用這種技術，電腦自動完成的作品，便可讓觀眾在聽完一首音樂的同時，看完原先錄影的摘要，省去耗時手動剪輯整理長時間影片的麻煩 [106]。吳教授與歐陽明教授、陳文進教授、黃肇雄教授等四位，創立「通訊與多媒體實驗室」（Communication and Multimedia Lab, cml），經二三十年的努力耕耘，早已是國際多媒體研究的重鎮，常有重要貢獻之論文於一流國際會議及期刊發表。其中黃肇雄教授更於 1996 年，與資工系所畢業學生聯合創立訊連科技（CyberLink）⁶⁰，開發出 PowerDVD、PowerDirector 等暢銷全世界之數位多媒體產品，且成為屢獲殊榮的全球性企業。

57. <http://www.icmc14-smc14.net/about/icmc.html>

58. <http://smcnetwork.org/>

59. 事實上前一節提及的 Valence、Arousal 情緒表示法，原本就是將心理學實驗數據，以統計方法得到的主要變項。這類心理學實驗，通常就以一整套表現各種情緒的圖片，激發並量度受試者情緒反應。

60. <http://tw.cyberlink.com/>

另一個多媒體技術與學術的大規模研究機構是微軟海外最大的研究院：微軟亞洲研究院（Microsoft Research Asia, MSRA），於 2000 年由世界著名多媒體專家張亞勤博士⁶¹ 接手其前身微軟中國研究院（李開復博士創立）後，擴充改名。現任院長為本系系友洪小文博士。2000 年 MSRA 即在北京清華大學成立「微軟－清華多媒體實驗室」，目前且將「新一代多媒體」列為五大主要研發領域之一，顯見多媒體研究在 MSRA 的重要性。MSRA 多媒體研究成果斐然，不但經常於頂尖國際會議如 ACM MM 及期刊如 IEEE Transactions on Multimedia 發表創新研究之論文，所研發的技術也大量用於微軟產品，如 Office、Windows、Xbox Kinect 等。

正因音樂與影像結合成為趨勢，使音樂家增添了一個表現的空間。已有許多音樂工作者創作多媒體藝術，而且有許多可以和觀眾互動的藝術呈現方式，在 [107] 可以看到一些頗有創意的作品。本院電信研究所碩士班 2011 年畢業生陳韋安，亦創作了「聲和」(Harmony) [108]，讓漂浮在空間中的網路結構，隨著觀眾彈奏樂器發出的聲音，改變外形與顏色，希望觀眾透過影像遐想音樂背後的規則結構⁶²。此作品並獲 2011 年台北藝術節 K. T. 科藝獎與互動藝術組銀獎，於剝皮寮歷史街區展出。

音樂與多媒體結合後，還可以再加上網路科技。早在 1999 年，筆者訪問 CCRMA 時，便有此構想。回台後有幾位大學部專題研究學生幫忙建立了一個「網路音樂會」雛型系統，讓相隔不算遠的兩位同學試著敲打代表某些音高的電腦按鍵，電腦送出對應的 MIDI 訊號，經過網際網路，兩人大約能夠算是一起演奏。可是距離拉遠之後，網路的延遲便成了問題：人耳對於大約相隔 0.2 秒的聲音就能區分，當時的網路頻寬沒有辦法使遠距離聲音延遲小於 0.2 秒，而且理想上應該能夠傳送也許壓縮過的樂器原音，我們的資源不足以解決這些問題，就沒再進行相關研究了。過幾年聽說 CCRMA 也組織了一個團隊 SoundWIRE Research Group [109]，有一些進展，他們的研究論文還在 ICMC 獲得 2009 Journal of New Music Research Best Paper Award of the conference。但是從網站資料看來，2009 年之後研究似乎便停頓了。還有若干學界與業界也對這個被稱為 Network Music Performance 的研究主題繼續努力，畢竟如要從世界各地找齊整個樂團到同一舞台，所需要的交通食宿費用太高了。根據 [110] 的說明，此一研究的挑戰還不只是網路以及音訊編碼解碼合起來的延遲，還有回音消除、讓分散各地的樂手同步依照指揮演奏，而且要能夠看到感覺到其他合奏者的存在與回饋，使他們有如沉浸 (Immerse) 在同一情境內，因此還需要傳送視訊及其他訊息，使問題更加困難。但是有一個義大利的音樂博物館 The Music Conservatory “Giuseppe Tartini” of Trieste 之下的研究團隊，在義大利的學研高速骨幹 (Backbone) 網路 GARR 上，發展出 LOLA (LOW LATency audio visual streaming system) 系統，似乎得到了不錯的成果 [111,112]。這種高速傳送視聽訊號的技術，還可以有很多其他應用，例如：遠距離即時互動鋼琴教學、遠距戰場或演習實況掌控等。台灣的國家高速網路與計算中心已經架設了一條「高品質學術研究網路」(TWAREN, TaiWan Advanced Research and Education Network) [113]，連接各國高速網路。市面上也有業者提供保證頻寬之快速骨幹網路租用服務，或許國內網路影音串流的研究人員，也能開發出類似系統，那麼分散各地的樂團成員可以同時練習；在美國紐約林肯表演中心的馬友友，與在台北中正紀念堂國家音樂廳的國家交響樂團，一起表演的網路音樂會等就真的可行了。

八、線上學習資源

最適合台灣學生的線上教材為張智星教授編寫的「音訊處理與辨識」(Audio Signal Processing and Recognition)，中英文版可切換，以 MATLAB 程式為範例。網址 <http://mirlab.org/jang/books/audioSignalProcessing/>。

61. 12 歲進大學，23 歲取得美國喬治華盛頓大學博士。

62. 筆者猜想此處的網路與樂音對應結構理論基礎，可能來自於陳同學發表的論文 [78]。

其次為 Stanford University 電腦音樂與聲學研究中心 CCRMA 名教授 Julius O. Smith III 63 撰寫的 Online Books (網址 <https://ccrma.stanford.edu/~jos/>)，分成 Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT)、Introduction to Digital Filters、Physical Audio Signal Processing、Spectral Audio Signal Processing 四部分，內容由淺入深，完整豐富實用，是學習電腦音樂之訊號處理必讀的參考書。

九、結論

筆者 1999 年左右跨足電腦音樂領域，由國科會補助，前往 Stanford University 的 CCRMA 訪問研究，得以結識包括本文先前介紹的 Max Mathew、John Chowning、Julius O. Smith III 等多位傑出電腦音樂學者，及電機、資訊、音樂等領域的 CCRMA 研究生，大致了解此一領域發展歷史及國際研發概況。可能因一般音樂結構與電腦程式接近，所以在 CCRMA 遇到的許多師生，兩方面都是高手。回國後，幸有許多熱愛音樂，音樂造詣又高的同學參與研究，使筆者雖只略具淺薄音樂常識（大約就是國高中時，閱讀音樂課本得到一點樂理與音樂史觀念，喜聽一些入門古典音樂、藝術歌曲、老歌及世界民謠，口琴與吉他自學入門，粗通單旋律簡譜五線譜，會聽單音旋律再於電子琴彈出來，在系合唱團唱男低音，如此而已），仍能從同學們自主的研究中，學習到他們的音樂知識以及非常有創造力的新想法（韓愈，<<師說>>：「弟子不必不如師，師不必賢於弟子，聞道有先後，術業有專攻」）；另外又得國內外各先進指導，方能略窺此一兼顧科技與藝術之領域堂奧，並親歷如本文所述：電腦音樂研究在國內外成長茁壯，優秀人才不斷加入之過程。個人從中亦深感得英才而教、教學相長、良朋切磋之樂。如同筆者在拙文 [1] 所述：「人類的精神生活中，音樂佔有相當重要的地位：通俗樂曲道出社會大眾的心聲，高尚的樂曲淨化人們的心靈。現代工商社會中，人們精神空虛，休閒生活貧乏，更需要音樂的精神食糧，因此音樂的出版與相關科技已發展為世界重要的產業。自電腦發明後，電腦與音樂結合為電腦音樂，更帶領人類的音樂生活進入全新的境界。」個人預期這種兼有人類文明兩大要素：科技與人文藝術的創新跨界研究領域，將隨著計算機科學、多媒體訊號處理之快速進展，與不斷更新的藝術思潮及創作表現，愈來愈受重視。深盼未來能有更多新血加入，提昇台灣乃至全世界電腦音樂創作、研發、欣賞、應用的境界。

參考文獻

1. 鄭士康，「電腦音樂漫談（科技報導專欄）」，台大電機之友，第二期，2001，Available：<http://alumni.ee.ntu.edu.tw/?p=153>，本文完成前最後瀏覽日期：8/17/2014。
2. kkbox Taiwan. Available：<http://www.kkbox.com/tw/tc/index.html>。本文完成前最後瀏覽日期：6/24/2014。
3. iTunes. Available：<https://www.apple.com/itunes/>，本文完成前最後瀏覽日期：6/24/2014。

63. Digital Waveguide 發明人。Digital Waveguide 搭配適當數位濾波器，可以合成更逼真或不可能存在的樂器（如以水銀線為琴弦的吉他）聲音，甚為有趣。YAMAHA 更利用此一技術，開發了一系列音質較前更好的電子琴。Digital Waveguide 結構為一串相連的數位延遲器 (Delay)，數位波形訊號在其上傳播。它的原理相當於將一維波動偏微分方程式 (Partial Differential Equations) 的一般解 D' Alembert Solution 數位化。D' Alembert Solution 也可用來描述電磁理論中的傳輸線 (Transmission Line，例如寬頻網路所用的電纜線便是一種傳輸線) 上的電磁波傳播，與電磁學所稱的 Waveguide (波導)，導波原理大不相同。筆者訪問 CCRMA 時，曾向 Smith 教授澄清二者差別。但因其論文早已被廣泛應用，不易改名，因此 Digital Waveguide 名稱仍繼續沿用。本系大二上「工程數學」課程含有偏微分方程式解法，大二下及大三上的「電磁學 (一) (二)」包含傳輸線及波導之數學模型及應用。亦可參閱拙著《電磁波》(2006 年全華科技圖書公司出版，<http://cc.ee.ntu.edu.tw/~skjeng/ElectromagneticWaveBook.htm>) 之第二章說明。

4. last.fm. Available : <http://www.last.fm/?setlang=en> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 6/24/2014 。
5. youtube. Available : <http://www.youtube.com/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 6/24/2014 。
6. 互動式之數位內容呈現 . Available: <http://www.youtube.com/watch?v=fINyih5m2UI> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/9/2014 。
7. 初音ミクの日感謝祭「03. ワールドイズマイン」. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=CPPehsNfhpc&list=PL84A56B3CD03E72BD> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/9/2014 。
8. Virtual Conductor. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=24I5B0-cOYA> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/9/2014 。
9. A Robots Symphony. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=kO5k3yGXuc8> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/9/2014 。
10. Anthropomorphic Flutist Robot. Available: http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/music/flute/wf_4riv/until_2008_site.htm#movie , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/9/2014 。
11. D. Cope, David Cope Emmy Beethoven 2 beg. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=Cg-G1HipAayU> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014 。
12. 陳瓊花, 藝術概論, 增訂三版, 台北市: 三民書局, 2012 。
13. The Music played by CSIRAC. Available: <http://ww2.csse.unimelb.edu.au/dept/about/csirac/music/music.html> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/13/2014 。
14. synthhead (2011), Max Mathews, Computer Music Pioneer, R.I.P. Available : <http://www.synthtopia.com/content/2011/04/21/max-mathews-computer-music-pioneer-r-i-p/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/13/2014 。
15. Synthesizer. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Synthesizer> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
16. MIDI Manufacturers Association Incorporated. Learn About MIDI. Available : <http://www.midi.org/aboutmidi/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
17. Yo-Yo Ma Playing the Hypercello in 1991. Available: <http://web.media.mit.edu/~joep/SpectrumWeb/captions/Cello.html> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
18. C. Chafe. (1988). Celletto. Available: <https://ccrma.stanford.edu/~cc/shtml/cellettoMusic.shtml> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
19. Marshall Morrison Instruments (2005). Morrison Digital Trumpet. Available: <http://www.digitaltrumpet.com.au/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
20. Virtual Piano. Available : <http://virtualpiano.net/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
21. A. Lorimer. The Virtual Piano. Available : <http://thevirtualpiano.com/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
22. Air Guitar. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Bjorn_Turoque , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
23. gTAR: LEARN TO PLAY GUITAR. Available : <http://www.incidentgtar.com/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/25/2014 。
24. Scream Lab. Available : <http://screamlab-ncku-2008.blogspot.tw/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 。
25. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique. Available: <http://www.ircam.fr/?L=1> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/31/2014 。

26. Center for Computer Research in Music and Acoustics(CCRMA). Available : <https://ccrma.stanford.edu/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/4/2014.
27. Competition of music performance rendering for computer systems. Available : <http://renconmusic.org/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/22/2014 .
28. A. Kirke and E. R. M. (Eds.), Guide to Computing for Expressive Music Performance. London: Springe, 2013.
29. 呂 行 , A Semi-automatic Computer Expressive Music Performance System Using Structural Support Vector Machine (利用結構性支撐向量機的具音樂表現能力之半自動電腦演奏系統) , 國立台灣大學電信研究所碩士論文 , 2014 .
30. 李務熙 (2002) , JCMG 指揮家軟體 demo. Available : <http://www.youtube.com/watch?v=av--ubFke-g> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/24/2014.
31. W. T. Peng, E. W. Huang, W. L. Chang, P. C. Huang, J. Y. Bai, H. R. Chen, S. Y. Chien, S. K. Jeng, Y. P. Hung, L. C. Fu, and L. S. Lee, "Virtual Conduction System with Multi-Resolution Wall Display," presented at the IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Beijing, 2007.
32. 中視新聞 (2010) , 音樂主題旅館 指揮體驗 Wii 搞定 . Available: <http://www.youtube.com/watch?v=-2Ls6PWd37o> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/24/2014.
33. 民視新聞 (2013) , 虛擬演奏廳 : 你也可以是指揮家 . Available: <http://www.youtube.com/watch?v=ghg57a0ub4Y> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/24/2014.
34. Konductor Fantasy. Available : <http://www.youtube.com/watch?v=42m0pn1X8pE> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/24/2014.
35. 初音未來 . Available : <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%88%9D%E9%9F%B3%E6%9C%AA%E4%BE%86> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/23/2014.
36. VOCALOID. Available : <http://zh.wikipedia.org/wiki/VOCALOID> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/23/2014.
37. VOCALOID Website. Available : <http://vocaloid.wikia.com/wiki/VOCALOID> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/23/2014.
38. Effects unit. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Guitar_effects , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/26/2014.
39. 許宇鳳 , 影像與音訊之數位浮水印技術 , 國立台灣大學電信研究所博士論文 , 2001 .
40. 陳柏煒 , 於聲音通道上使用資料隱藏及錯誤控制技術之可靠通訊 , 國立台灣大學資訊網路與多媒體研究所碩士論文 , 2008 .
41. 白博元 , 使用二次離散餘弦變換隱藏資料於音訊之初步研究 , 國立台灣大學資訊工程系碩士論文 , 2014 .
42. F. Busoni, "Sketch of a New Esthetic of Music," in Three Classics in the Aesthetic of Music: Debussy, Monsieur Croche the Dilettante Hater; Ives, Essays Before a Sonata; Busoni, Sketch of a New Esthetic of Music, Anonymous, Ed., Dover edition, 1962 ed., New York: Dover Publication, Inc., 1907.
43. Granular synthesis. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Granular_synthesis , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/31/2014.
44. 鑼鼓運動 Tsang Tse / 趙菁文 Ching-Wen Chao (Conductor: Yun-Hung Chen). Available : <https://www.youtube.com/watch?v=0das-Txo2R8> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 7/31/2014.
45. 林思宇 , 「台灣之光趙菁文揚威世界音樂節」 , in Yahoo 奇摩新聞 , 2012, Available : <https://tw.news>.

- yahoo.com/%E5%8F%B0%E7%81%A3%E4%B9%8B%E5%85%89%E8%B6%99%E8%8F%81%E6%96%87%E6%8F%9A%E5%A8%81%E4%B8%96%E7%95%8C%E9%9F%B3%E6%A8%82%E7%AF%80-114213441.html，本文完成前最後瀏覽日期：8/17/2014.
46. 曾毓忠 . [音樂分析] 電腦音樂、電子音樂分析與記譜 . Available: http://yc-tseng.blogspot.tw/2011/03/blog-post_16.html，本文完成前最後瀏覽日期：7/31/2014.
 47. MAX - Official website. Available : <http://cycling74.com/products/max/>，本文完成前最後瀏覽日期：7/31/2014.
 48. Pure Data. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Pure_Data，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 49. Pure Data Portal. Available : <http://puredata.info/>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 50. Hyperscore: You can compose music. Available: <http://hyperscore.wordpress.com/>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 51. Hyperscore. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperscore>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 52. List of scorewriters. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_scorewriters，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 53. finale. Available : <http://www.finalemusic.com/>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 54. Finale (software). Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Finale_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Finale_(software))，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 55. Music and artificial intelligence. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Music_and_artificial_intelligence，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 56. David Cope. Available : <http://artsites.ucsc.edu/faculty/cope/biography.htm>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 57. Emily Howell Blog. Available : <http://artsites.ucsc.edu/faculty/cope/Emily-howell.htm>，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 58. Emily Howell. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Emily_Howell，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 59. J. McCormack and M. d’Inverno (Eds.), *Computers and creativity*, Berlin: Springer, 2012. Available : http://tulips.ntu.edu.tw/search~S5*cht?/YComputers+and+creativity&searchscope=5&SORT=D/YComputers+and+creativity&searchscope=5&SORT=D&SUBKEY=Computers+and+creativity/1%2C37%2C37%2CB/frameset&FF=YComputers+and+creativity&searchscope=5&SORT=D&1%2C1%2C，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 60. P. J. Bentley and D. W. Corne (Eds.), *Creative evolutionary systems*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2002.
 61. E. R. Miranda and J. Al Biles (Eds.), *Evolutionary Computer Music*, London: Springer, 2007 . Available : http://tulips.ntu.edu.tw/search~S5*cht?/YEvolutionary+Computer+Music&searchscope=5&SORT=D/YEvolutionary+Computer+Music&searchscope=5&SORT=D&SUBKEY=Evolutionary+Computer+Music/1%2C9%2C9%2CB/frameset&FF=YEvolutionary+Computer+Music&searchscope=5&SORT=D&1%2C1%2C，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.
 62. J. Romero and P. Machado (Eds.), *The Art of Artificial Evolution: A Handbook on Evolutionary Art and Music*, London: Springer, 2007. Available: http://tulips.ntu.edu.tw/search*cht/Y?SEARCH=The+Art+of+Artificial+Evolution%3A+A+Handbook+on+Evolutionary+Art+and+Music&searchscope=5，本文完成前最後瀏覽日期：8/1/2014.

63. Yi-Wen Liu: Research. Available : <http://www.ee.nthu.edu.tw/ywliu/research.html> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/7/2014.
64. 蔡振家教授 . Available : <http://140.112.147.205/03faculty/06.htm> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/7/2014.
65. 蔡振家, 音樂認知心理學, 國立臺灣大學出版中心, 2013。
66. D. J. Levitin, *This is Your Brain on Music*, New York, N.Y., USA: Dutton, 2007. 丹尼爾 . 列維廷 (Daniel J. Levitin) 著; 王心瑩譯, 迷戀音樂的腦, 新北市: 大家, 2013.
67. Audio Engineering Society. Available : <http://www.aes.org/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/14/2014.
68. Acoustic Society of America. Available : <http://acousticalsociety.org/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/14/2014.
69. Journal of New Music Research. Available: <http://www.tandfonline.com/toc/nnmr20/current#.U-16wPmSxqV> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/15/2014.
70. Computer Music Journal. Available : <http://www.computermusicjournal.org/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/15/2014.
71. Head-related Acoustics, Communication acoustics: Spatial sound and Psychoacoustics Group, Psychoacoustics Research Group, Department of Signal Processing and Acoustics, Aalto University. Available : http://spa.aalto.fi/en/research/groups/communication_acoustics/head-related_acoustics/ , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
72. MIRtoolbox. Available : <https://www.jyu.fi/hum/laitokset/musiikki/en/research/coe/materials/mirtoolbox> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/8/2014.
73. 蘇柏青, 整合式音樂識譜系統, 國立台灣大學電信工程學研究所碩士論文, 2001.
74. B. Su and S. K. Jeng, "Multi-timber chord classification using wavelet transform and self-organized map neural networks," presented at the 2001 IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, USA, 2001.
75. Y. R. Chien and S. K. Jeng, "An automatic transcription system with octave detection," presented at the 2002 IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2002), Orlando, USA, 2002.
76. 後藤真孝's Home Page. Available : <https://staff.aist.go.jp/m.goto/index-j.html> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/12/2014.
77. Songle - 【初音ミク】PROLOGUE【ばかりす+ぽかうお】by VocaListener (AIST). Available: <http://songle.jp/songs/staff.aist.go.jp%2Ft.nakano%2Fmusic%2FVocaWatcher.Prologue.Miku.mp3> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/12/2014.
78. music21: a tool kit for computer-aided musicology. Available: <http://web.mit.edu/music21/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
79. W. A. Chen, J. H. Lin, and S. K. Jeng, "Harmony Graph, a social-network-like structure and its applications to music corpus visualization, distinguishing, and music generation," *International Journal of Computational Linguistics & Chinese Language Processing*, vol. 15, no. 1, 2010, pp. 1 - 18.
80. Roger Dannenberg's Links to Videos, Available: <http://www.cs.cmu.edu/~rbd/videos.html#research> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/12/2014.
81. Roger B. Dannenberg, Available : <http://www.cs.cmu.edu/~rbd/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.
82. Al Biles. Available : <http://igm.rit.edu/~jabics/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/14/2014.

83. GenJam's Journey: From Tech to Music: Al Biles at TEDxBinghamtonUniversity. Available : <https://www.youtube.com/watch?v=rFBhwQUZGxg> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/14/2014.
84. 軟體王 . Available : http://www.softking.com.tw/soft/download_share.asp?fid3=382 , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/12/2014.
85. Music Search - mirlab. Available : <http://miracle.mirlab.org:8080/miracle/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/12/2014.
86. G. Tzanetakis and P. Cook, "Musical genre classification of audio signals," IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 10, no. 5, 2002, pp. 293 – 302.
87. R. Cowie, R. Cowie, S. Savvidou, E. McMahon, M. Sawey, and M. Schröder, "FEELTRACE": An instrument for recording perceived emotion in real time," presented at the ISCA Workshop on Speech and Emotion, 2000.
88. 陳宏銘 Homer H. Chen. Available : <http://www.ee.ntu.edu.tw/profile?id=60> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
89. MPAC Lab. Available : <http://mpac.ee.ntu.edu.tw/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
90. 助研究員 | 楊奕軒 . Available: http://www.citi.sinica.edu.tw/pages/yang/index_zh.html , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
91. Y.-H. Yang, Y.-C. Lin, H.-T. Cheng, and H.-H. Chen, "Mr. Emo: Music retrieval in the emotion plane," presented at the ACM Multimedia, 2008.
92. 陳志宏 Jyh-Horng Chen. Available: <http://www.ee.ntu.edu.tw/profile?id=50> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.
93. NTUEE Interdisciplinary MRI/MRS Lab. Available: <http://mr.ee.ntu.edu.tw/doku.php> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/14/2014.
94. Y.-P. Lin, C.-H. Wang, T.-P. Jung, T.-L. Wu, S.-K. Jeng, J.-R. Duann, and J. -H. Chen, "EEG-based Emotion Recognition in Music Listening," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 57, no. 7, 2010, pp. 1798-1806.
95. 研究員 | 王新民 . Available: http://www.iis.sinica.edu.tw/pages/whm/index_zh.html , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.
96. J. C. Wang, Y. C. Shih, M. S. Wu, H. M. Wang, and S. K. Jeng, "Colorizing tags in tag cloud: A novel query-by-tag music search system," presented at the ACM International Conference on Multimedia (ACM MM 2011), Scottsdale, Arizona, USA, 2011.
97. J. C. Wang, H. Y. Lo, S. K. Jeng, and H. M. Wang, "MIREX 2010: Audio classification using semantic transformation and classifier ensemble," presented at the Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX 2010) in 11th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2011), Utrecht, Netherlands, 2010.
98. Wei-Ho Tsai. Available : <http://www.cc.ntut.edu.tw/~whtsai/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.
99. NTUT Multimedia Signal Processing Lab. Available : <http://www.cc.ntut.edu.tw/~whtsai/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.
100. ISMIR 2014. Available : <http://www.terasoft.com.tw/conf/ismir2014/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/13/2014.
101. 鄭士康, 『「2005 電腦音樂與音訊技術研討會」主辦報告』, 台大電機之友, 第十八期, 2007 , Available : <http://alumni.ee.ntu.edu.tw/?p=308> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/17/2014.

102. C. H. Chen, M. F. Weng, S. K. Jeng, and Y. Y. Chuang, "Emotion-Based Music Visualization Using Photos," presented at the 14th International Multimedia Conference (MMM 2008), Kyoto, Japan, 2008.
103. J.-C. Chen, W.-T. Chu, J.-H. Kuo, and C.-Y. Weng, "Tiling Slideshow," presented at the the 14th annual ACM international conference on Multimedia (ACM MM 2006), 2006.
104. T. L. Wu, H. K. Wang, C. C. Ho, Y. P. Lin, T. T. Hu, M. F. Weng, L. W. Chan, C. H. Yang, Y. P. Hung, Y. Y. Chuang, H. H. Chen, J. H. Chen, S. K. Jeng, "Interactive content presentation based on expressed emotion and physiological feedback," presented at the the 16th ACM international conference on Multimedia (ACM MM 2008), Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
105. 陳萱瑋，以節奏分析為基礎的動作電影分割與摘要，國立台灣大學資訊工程研究所碩士論文，2004。
106. 黃振修，應用內容知覺機制於音樂導向的視訊摘要系統，國立台灣大學資訊工程研究所碩士論文，2004。
107. C. Tso, 多媒體藝術 . Available : <https://www.youtube.com/playlist?list=PL3304CD38F1714AB1> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/16/2014.
108. 陳韋安 (2011) , 《聲和》 Harmony Graph, the Installation 作品介紹 . Available : https://www.youtube.com/watch?v=P0ru7_kAfHU , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/16/2014.
109. soundWIRE Group at CCRMA, Available : <https://ccrma.stanford.edu/groups/soundwire/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/21/2014.
110. Networked music performance, Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Networked_music_performance , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/21/2014.
111. Introducing LOLA, Available : <http://www.conts.it/artistica/lola-project/introducing-lola-workshop/lola-claudio-allocchio.pdf> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/21/2014.
112. LOLA – Preview by Claudio Allocchio, Available : <http://www.garr.tv/home/viewvideo/678/lola-preview-by-claudio-allocchio> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/21/2014.
113. NARLABS 國家實驗研究院：國家高速網路與計算中心 . Available: <http://www.twaren.net/> , 本文完成前最後瀏覽日期 : 8/25/2014.