

漫談數位音樂

■ b88 羅子峻

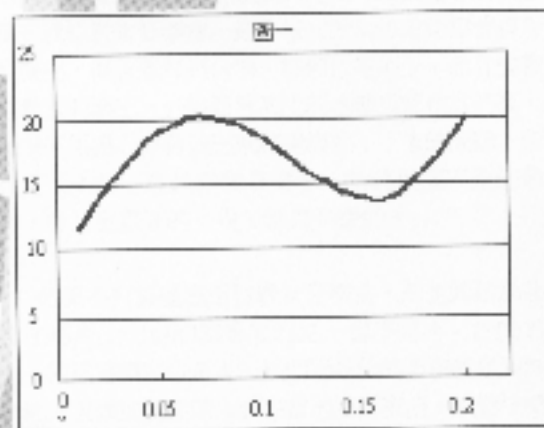
數位化是人類文明以後不可迴避的潮流，也是二十世紀人類文明的的重大年分，影響現代生活的各個層面，反映在音樂方面，最明顯的產物就是CD。自音樂CD成為主流音樂儲存媒體之後，數位音樂已對你的生活密不可分，本篇文章希望以深入淺出的方式，帶領讀者探索各種數位音樂的儲存格式與處理技巧。

何謂數位化？

從字面上來說，數位化(Digital)就是以數字來表示，例如用數字去紀錄一張桌子的長寬尺寸，若木料切的長度，這就是一種數位化。跟數位常常一被提到的字是類比(Analog/Analogue)，類比的意思就是用一種相似的東西去表達，例如將桌子用傳統相機將三度空間拍下來，就是一種類比的紀錄方式。

音樂如何數位化？

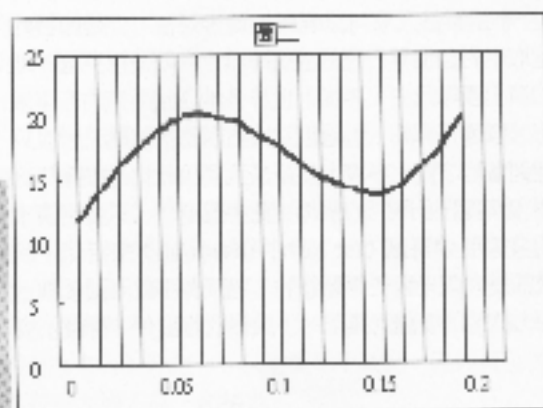
將音樂數位化，其實就是將聲音數位化。將音訊數位化的方式有很多，最常見的方式是透過PCM(Pulse Code Modulation)。音樂CD即是紀錄此種格式的數位訊號，運作原理如下，首先我們將聲音經過麥克風，轉換成一連串隨時間變化的訊號，如圖一所示。這個訊號的頻率極高，頻率極高代表大小，要將這樣的訊號轉為PCM格式的方法，是先以等時間分割。我們假設用每0.01秒分割，則得到圖二。



我們把分割點與訊號圖形交叉處的座標位置紀錄下來，可以得到如下資料：(0.01,11.65)、(0.02,14.30)、(0.03,16.00)、(0.04,17.74)、...、(0.18,15.94)、(0.19,13.7)、(0.20,20)。好了，我們現在已經把這個波形以數字記錄下來了。由於我們已經知道時間間隔是固定的0.01秒，因此我們只要把座標紀錄下來就可以了，得到的結果就是11.65 14.30 16.00 17.74 19.00 19.89 20.34 20.07 19.44 18.59 17.47 16.31 15.23 14.43 13.89 13.71 14.49 15.94 17.70 20.00這一串數字就是將以上訊號數位化的結果。看吧，我們確實用數字記錄了事物。在以上的範例中，我們的取樣頻率是100Hz(1/0.01秒)，其實電腦中的WAV檔的內容就是類似這個樣子，檔頭紀錄了取樣頻率和可容許最大紀錄振幅，後面就是一連串表示振幅大小的數字，有正有負。前面提到音樂CD是以PCM格式紀錄，而它的取樣頻率(Sample Rate)是44100Hz，振幅紀錄精度是16Bits，也就是說振幅最小可達-32768(-2¹⁶)，最大可達32767(2¹⁶-1)。在這裡我們可以發現無論使用多麼高的紀錄精度，紀錄的數字跟實際的訊號大小總是有誤差，因此數位化無法完全紀錄原始訊號，我們用這個數位化造成失真稱為量化失真。

為什麼要數位化？

數位化的最大好處是資料簡單與保存的不易失真。紀錄的資料只要數字大小不改變，紀錄的資料內容就不會改變。如果我們用傳統類比的方式紀錄以上



劃裝，例如使用LP表面的凹凸起伏或是錄音帶表面的磁粉厚度來表達訊號大小，我們在複製資料時，無論電路經過多層掩蓋，總是無法避免雜訊的介入。這些雜訊會變成複製後資料的一部分，造成失真，且複製多次訊號的訊號大小與雜訊大小的比值會越來越低，資料的品質也就越來越差，如果讀者曾經複製過錄音帶或是錄影帶，對以上的現象應該不陌生。在數位化的世界裡，聲音訊號轉換成二進位，以電腦的高低來判斷1與0，還可以加上各種檢索碼，使得出錯機率很低，因此在一般的情況下無論複製多少次，資料的內容都是相同，達到不失真的目的。

或許讀者會問，既然CD是數位化的儲存媒體，為什麼利用掃描機複製的唱片裝到CD Player中會常常比原版片來得差呢？不是都是數位化的複製不會失真嗎？這個問題我們留到後面再解答。

那麼，數位化的聲音如何轉換成原來的音樂訊號呢？這時候我們需要一種裝置叫做DAC(Digital to Analog Converter)，中文叫做數類轉換器。DAC的功能如其名是把數位訊號轉換回類比訊號，在我們的CD Player、音效卡中都有這裝置，而在許多電路中也經常被用到，例如顯示卡的RAMDAC。我們可以把CD Player中的DAC想像成16個小电阻，各個电阻值是以二的指數增大。當DAC接受到來自CD讀取機傳的二進位PCM訊號，遇到0時相對應的電阻就閉路，遇到1相對應的電阻不作用，如此每一批16bit數位訊號都可以轉換回相對應的電壓大小。我們可以想像這個電壓大小看起來似乎會像階梯一樣一格一格，跟原來平滑的訊號有些差異，因此再輸出前還要經過一個低通濾波器，將高次諧波濾除，這樣聲音就會變得比較平滑了。在音響的術語中，我們將讀取CD上輸出類比音訊的器材叫做CD唱盤，單純讀出CD資料輸出數位訊號的器材叫做CD轉盤，我們可以把CD唱盤當作CD轉盤+DAC，在Hi-Fi音響的領域大部分傾向將CD讀取分成轉盤+DAC，值得一提的是，雖然CD轉盤+DAC所傳送的是數位訊號，但是我們往往可以發現兩片之間的線材採用規格S/PDIF為開源為取碼的三種線路或是Firelink組

線光纖)，卻可以影響音質，這部分的問題我們留到後面再說明。

細說音樂CD(Compact Disc Digital Audio)

關於音樂CD實在是有太多可以說了，這從1982年由Sony和Philips共同制定紅皮書的儲存規格，便於儲存音樂又比錄音帶好，流行至今這個趨勢，關於它的規矩有許多有趣的故事，例如每一片片標準長度的CD是74分鐘？話說這是因為設計者想要把貝多芬第九號交響曲存進一片CD中，於是先給估計CD的直徑，另一套說法是著名指揮家Herbert von Karajan這樣要求，也有人說是Sony公司當時老闆的太太這樣要求，另一套說法是Sony當時的Mr. Ogasaki決定的，另外要補充的是Herbert von Karajan指揮的貝多芬第九號交響曲總長度大概有68分鐘左右，一般的版本大概在65-74分中間分布。

CD是以螺旋狀由內到外儲存資料，在一片標準74分鐘的CD中，從內圈到外圈共有22188圈，把它們全部伸展開來長達3.7km，CD讀取的方式是等速速度(CAV)，每秒有1.2m長的資料經過雷射頭，雷射在真空中波長為780nm，與傳統CD表面的凹點變化對應訊號，表面的凹點叫做Pit，深度為0.11um(約為780nm雷射在塑膠材料內波長的1/3)，長度為0.8到3.1um，Pit是以凹凹變化和由凹變凹定義1，平坦的部分為0，所以改變刻蝕的長度可以改變資料內容。

音樂CD的規格為什麼是44.1kHz、16Bit呢？關於44.1kHz這個數字的緣起分做兩個層面。首先我們知道人耳的聆聽範圍是20Hz到20kHz，根據Nyquist Functions，理論上我們只要取40kHz以上的取樣率就可以完整記錄20kHz以下的訊號。那麼為什麼要用44.1kHz取這個數字呢？那是因為在CD發行之前提設備限制，所以主要數位音訊儲存媒體是錄影帶，是黑白來記錄0與1，而當時的錄影帶格式為每秒30張，而每張圖又可以分為480個條，每一條條又可以

取樣點，而為了研發的方便，CD也繼承了這個規格，這就是44.1kHz的由來。

我們可以發現一張制模累累的CD放到CD Player中往往聽起來似乎沒有什麼問題。這又是什麼原因呢？這是一個非常複雜的問題，我們必須從CD的數據儲存格式說起。首先要引入的名詞是block，CD每秒鐘的資料被分成 7350 個block，每個block內有588bits的資料，可是這588bits無法全部用來儲存有意義的資料，因為過高密集的山凸變化會造成硬體設計難度的增加，因此每14個bits中只有8個bits是有意義的，這就是所謂四對八調制(Fourteen-Modulation)的目的。扣除掉8bits無意義的資料，每個block剩下 $588 \times 8 = 4704$ bits，再扣除掉同步與合併(margin)資料，剩下264bits，等於 $264/8 = 33$ bytes。在這33個data bytes中，有1個sub-code byte，12個odd-audio bytes，4個Q-redundancy bytes，12個even-audio bytes和4個P-redundancy bytes。其中最有意義的就是那12+12=24個音訊bytes，每個block共有 $24 \times 8 = 192$ bits，我們知道CD以16bits紀錄資料大小，因此我們得知每個block有6個16bit的取樣點資料($6 \times 16 = 192$)。好嘛，還記得前面說過每秒鐘有7500個block嗎？我們由此可以得之而知秒鐘有 $6 \times 7500 = 44100$ 個立體聲取樣點！沒錯，就是這個數字，正帶一提的是每98個block組成一個frame，每秒有75個frame($98 \times 75 = 7350$)，好了，我們還沒講到重點，為什麼有經驗老道的CD聽起來還是很正常呢？

答案就在於32bits的音訊資料，並非直接按照實際順序儲存在單一的Block中，而是打散順序分散分布在接下來106個Block中，因此若有刮痕造成一部分的資料無法正確讀出，可以藉由前面提到的P-redundancy bytes與Q-redundancy bytes作同位元交錯保護資料正確性，進而可修資料。碟片利用聲音連續變化的特性，由取樣資料的前後取樣點來互相恢復資料，實際編碼時，是先將12bytes的over-samples重新排列然後經由C2編碼計算出4 bytes的Q-redundancy得到13bytes的資料，然後由這28bytes的資料來決定這32bytes的音訊要如何分佈在0到15KHz Block中，再

來將這28 Bytes的資料經過C1編碼，我們就得到4bytes的P-redundancy，P-redundancy另外的用途是能保護取樣點都為0時這block中的32bits仍不都為零，另外每個block還有一個sub-code byte，其用途非常廣泛，在lead-in的區域sub-code紀錄了這張CD有幾軌、總長度多少；在音軌的部分則記錄了從這軌開始已經經過了多少時間，從第一軌開始又經過了多少時間，這音軌是二聲道還是四聲道(不過從來沒有過四聲道的CD)、是否允許複製，以及該音軌是否有經過Pre-emphasis處理還有一些儀器資訊，另外sub-code也可以用來記錄該CD的UPC(Universal Product Code)號碼與該音軌的ISRC(International Standard Recording Code)號碼。ISRC由唱片廠一發放，前面兩碼英文是廠名，再來三碼英文為發行名，最後五碼是數字。

我們常在古典音樂CD上看到DDD，ADD，AAD字樣，又代表了什麼意思呢？這三個英文其實是Digital或Analog的縮寫，第一個英文代表錄音時的母帶為數位或是類比格式，第二的英文代表錄音及轉檔時母帶使用數位或是類比格式，最後一個英文字代表最終的Master母帶是數位還是類比格式儲存。由於音樂CD的母帶一定是數位化的，因此最後一個英文字都是D。

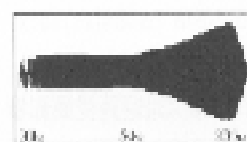
接下來想要介紹一些CD的衍生物如HD CD，xrcd等，但是不可就元素提到一些數位錄音專業術語，因此我們先解釋一下這些術語。

數位音訊處理名詞解釋

Pre-emphasis

Pre-emphasis就是在錄音的時候將高頻訊號放大，發音時再把訊號用同樣的倍率縮小以還原波形(De-emphasis)，在類比錄音時代，這個技術的主要用途是作為提高訊噪比，例如廣播發送時將頻率1000Hz至2000Hz以上收發及收音6dB的信噪提高訊號，或是LP唱片(LP在錄音時的RIAA(美國唱片工業協會)等化曲線)不經過曲線的制定目的主要與LP

的結構有關，且放大點點（不高頻而已），以及錄音帶用的杜比降噪系統，都是使用同樣的原理。在數位領域，Pre-emphasis 也主要用在降低量化失真，因為一般的音樂訊號高頻成分振幅比較小，而且越高的頻率振幅越小，所以從 PCM 取樣的原理中我們可以發現這些小振幅高頻被分配到較少數的 bit 來記錄，這樣有效數位表示的數字就變小了，那麼波型的誤差就變大了，因此我們使用 Pre-emphasis 的技巧先增加高頻振幅再取樣來降低高頻量化失真，使用這種技巧的音樂 CD 非常少見，推測是因為 Pre-emphasis 和 De-emphasis 這一來一回的計算，反而造成了更大的失真。就筆者目前所見之各原聲帶便沒有用到 Pre-emphasis 的效果，而之前提到的 tape 磁頭也有經過這種資訊。



本圖平直的頻率響應曲線必須 Pre-emphasis 的修正

Supersampling (Oversampling)

Supersampling 字面上的解釋叫做超取樣，原來是從已有的數位訊號經過內插等補間得到取樣間隔的訊號大小，但把把 44.1kHz 的訊號轉成 88.2kHz 的訊號，超取樣並不能幫我們把更多的細節從量化失真中找回來，它的主要用意是幫助我們獲得更正確的訊號，怎麼說是更正確的呢？從之前關於 PCM 取樣的介紹我們知道越高頻的訊號被取樣的次數就會越少，想像一個 20kHz 的正弦波經過 44.1kHz 的取樣，一個週期分不到三個取樣點，要從這三個取樣點算出原來的正弦波理論上是可以做到的，問題是對於實際上的數位電路這樣的計算是非常繁雜的，因此發展出來了各種技巧的方式希望能夠由較簡單的計算得到接近超取樣的結果，超取樣算是其中的一種方法，用意是為了重建高頻訊號，我們通常會聽到幾倍超取樣的字眼，所謂的幾倍就是原來取樣率的幾倍，一般最常聽到的是八倍超取樣。

Dynamic range

中文叫做動態範圍，也是聲音訊號源本身大與小

最小值的比佳，例如 16bits 是靜音度的音樂 CD 其動態範圍最大就是 20192 (5916.6) - 96 x 13，用越多 bit 記錄，我們就可以得到越大的動態範圍。如果能夠錄取最大的動態範圍，我們就能記錄更多的細節，並且更精確保存聲音等聲音來源的波形，當動態範圍不足時，為了不造成錄音，我們只好降低錄音音量，可是小範圍的聲音變化可以分配的 bit 就減少了，因此會造成量化失真與失真。

Peak Level

我們把一段波型的最大振幅叫做 Peak，Peak level 則是這最大振幅與最大可容許振幅的比值，在 16bit 的例子中，最大振幅就是 32767，20bits 的例子中就是 524287，在之前提及取樣原理的介紹，我們可以發現更大的振幅可以分配到越多的 bit 去記錄，因此同樣的一段波型只要 Peak level 不超過（超過可能會爆音），則音量輸入記錄的波型被精準。

Normalize

Normalize 就是將一段波型音量放大，放大的目的是讓原波型的最大振幅 (peak) 等於最大可容許振幅，我們常常會聽到錄音軟體錄集 CD 試一首音量太大，下一首音量又太小，這時將聲音都經過 Normalize 處理可以改變這個問題，不過由於數位大過後的振幅大小可能不是整數，最後不可避免要回到四舍五入的技巧，因此處理過的波型和原波型造成非線性放大產生失真，再度導致量化失真，所以為了保留音色的相位的正確性，在數位音樂的處理中我們盡量避免 Normalize。

Dither

Dither 是數位音樂中非常神奇的技巧，它的目的是用少數的 bit 達到與較多 bit 記錄波形同樣的聽覺效果，方法是在最後一個 bit (LSB) 加 Significant Bit 數半值，例如用 16bits 記錄喇叭的好信 20bits 的資料，聽到用原先 16bits 無法記錄的微小資訊，舉例來說，今天沒有 16 位元的取樣資料，我現在想把它轉成 10 位元儲存，所以我必須要把 20bits 轉成 16bits，最精確的處理使用的方式就是直接把後面的四位 8bits

接去掉，但是這樣就失去用20Bits錄音／演奏的意義了。比較技術性的方法是在第17~20Bits中加入一些噪音，設置噪音就叫做dither，這些噪音加入後，可能會進位而改變第16個bit的資料，然後我們再把最後四個bit削掉，這個過程我們稱做redithering，用意是讓後面四個bits的資料線性地反映在第16個bit上。由於人耳具有容易將噪音與聲音分離的能力，所以雖然我們加入了噪音，實際上我們卻聽到了更多音樂的細節。

關於dither有種比喻是說我們透過手指尖的觸感只能看到眼前部份的圓形，但是如果我們前後移動手掌，我們就可以看到不同時刻看到的各個圓形的一小部份，在腦中縫合成完整的圓形資訊，這是大腦神奇的地方，不是簡單的理論就可以說得通的，在此我提供一個網址，該網頁內有經過dither和沒有經過dither的wav檔可以供您下載，內容是一個固定頻率的聲音以等比例逐漸降低音量，我們可以發現經過dither處理過的聲音聽起來持續比較久，也就是可以讓我們聽到更小的音量的細節，該網頁還附有dither前後的波型圖示，網址如下：<http://www.mtsoundlab.com/learn/rn42/reading/m420/index.html>。在眾多的dither技術中，Sony公司的SRM(Super Bit Mapping)，LIVE STUDIO RECORDING'S的ULTRA MATRIX PROCESSING，都是專攻20bits轉16bits的技術。Duke在數位音訊處理用途非常廣泛，舉凡車震效果的相加、技術的釋放、Normalize都會用到，現在的錄音室已經進展到24bits錄音，在CD還是主流儲存媒體的年代，dither還是非常重要的技術。順道一提，在影像處理領域，將24bits的全彩圖形以16bits的高彩畫面顯示也會用到dither的技術。

Jitter

Jitter一般來講伴隨著延遲，是數位音訊在數位化的殺手，Jitters造成聲音的改變可是成因卻非常科學的錯誤，而是資料傳輸間隙所伴隨了。在之前數位化的過程中我們知道，16位元的數位音訊在時間上所讀資料，但Jitter造成原因沒有在準確的時間讀出資料，因此造成波形失真。在普通的CD Player中，本

於讀取機構是由資料流量來判斷轉速是否合適，而記錄的工作時機又是以讀取的一連串數位讀取的多少來決定，因此當轉速不穩定時，每秒讀出的資料數量就有誤差，而實際工作時機就受到影響，由實際工作時間所決定的各個取樣點的出現時間與實際的時間就產生偏差，這就是Jitter的成因，認為很多影響工作時機的原因都可能造成Jitter，例如CD的質量與厚度是否均有影響轉動穩定性，反射面的材質，CD轉盤到DAC之間的連接線，都會造成Jitter而影響音質。要避免Jitter發生最直接的方法就是re-clock，將接收的數位訊號先存到緩衝記憶體中，然後用一個精確的時鐘重新排列這些數位訊號，並且讓後續的數位電路都以這個時鐘為運作基準。有些Hi-End器材使用不可於一般S/PDIF的單線數位傳輸介面，加入包含時鐘訊號的雙線用意即在此。

或許讀者們對於此面資料感到只是音質受到影響感到疑惑，為了讓讀者對Jitter有更深刻的認識在此提出一個實驗結果，先準備一張音樂CD，然後複製成另外一張，並用抓音軟體讀取這兩張CD的資料內容是相同的，可是放到CD Player中聆聽，卻發現兩張CD的音質有很大差異，我們透過CD Player的讀取機制和電腦光碟機轉接，因此準備了專業用音效卡CacDsluxe來做數位錄音，將CD Player的數位輸出(S/PDIF Out)接至音效卡上，經過多次的比對，我們發現數位錄音的結果與直接抓音取的資料內容相同，也就是說CD Player讀取並沒有問題，影響音質的主要原因是Jitter，單位時間資料流量不穩定的變動造成Jitter，但這些資料內容本身並沒有出錯，因此不能單從數位錄音的資料發現錯誤。一般來說，數位設計上有所謂，Jitter造成對資料內容上錯誤是不可怕的。

音樂CD的衍生物與兼容產品

HD CD(High Definition Compatible Digital)

自從這個產品名稱被創造了，HD CD本質上還是CD，放到一般的CD Player中播放完全沒有問題，HD CD是Pacific Microsonics創辦人 Keith Johnson 和 Philad Pilauer於1990年提出規格，其技術本身也

包含從 20Bits 的原始訊號 dither 至 16Bits 的技術，在其獨特地方在於比 dither 更有效利用 CD 的第 16 個 Bits(LSB)，它不但用 dither 技術處理 LSB，使得音質比一般 CD 好，甚至將 LSB 以固定的數字排列，當作是一種指令，這種指令在一般的 CD Player 對於聽覺沒有影響，可是在搭載 HDCD 解碼晶片的 CD Player 上，這些特殊的指令就可以改變聲音的特性，例如增加某段聲音的音量，提昇聲音動態範圍，或是音場展寬，這些附加功能使得聲音聽起來細節更多，定位更加精準，這正是 HDCD 的特色。常見的 CD 刻錄器發的幾張專輯都經過 HDCD 處理過，HDCD 的技術並非限於音樂 CD，在 DVD-Audio 上也有發揮的空間。

xr-d(extended resolution compact disc)

Xr-d 也是不同於別的音樂 CD，由 JVC 所提出，Xr-d 的特色是以 DIGITAL DUC 技術製作，這種技術不光是以 20Bits 128 倍超取樣將類比訊號轉為數位訊號，也不單只是另一套 20Bits 轉 16bits 的 dither 技術，而是將 CD 製作過程的每一個步驟最佳化！不但非常注重各個器材的供電品質，器材的連接線材，配線系統，且為了降低 jitter 對音質的影響，所有的數位訊號

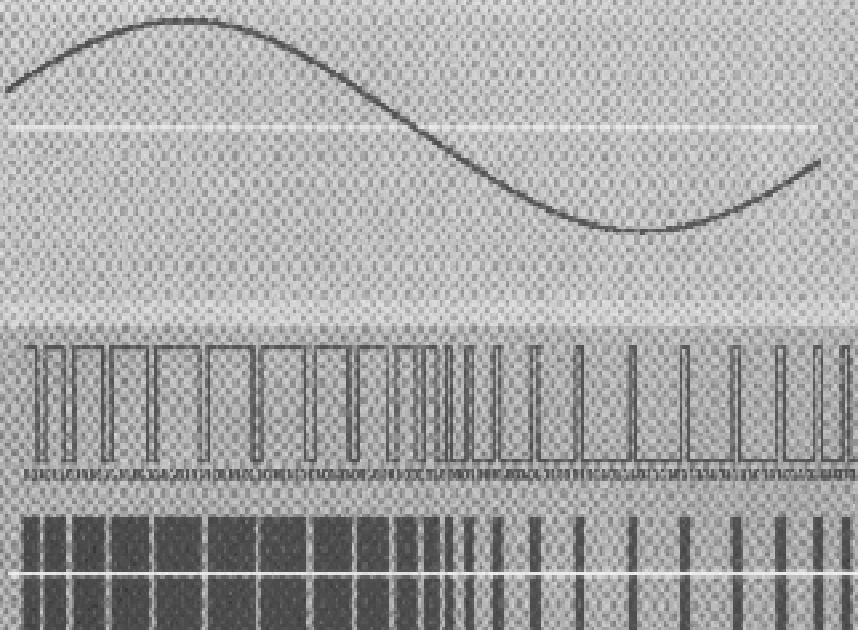
都改用 SDF 的傳輸，在別的一般所使用的 SDF/ESU 工業標準，並對控制訊號的工作有複雜特別的修正，而最後的 CD 母帶資料儲存於 Sony PCM19300 MO，這三位於日本橫濱全世界唯一一條生產線製作，Xr-d 另外一個特色是以超微晶反射面供一般 CD 相同，DVC 宣稱是只要使用鈦可以達到比較好的 jitter，Xr-d 價值相當高，實價一打二百元以上是習以為常的事，但是音質對音場表現的確有其獨到之處，因此佔有其市場。

DVD-Audio

DVD-Audio 是以 DVD 作為媒介儲存聲音訊號，於 1999 年三月提出，取樣方式為 DVC (Digital Pulse Code Modulation)，可選擇性採用 MLP (Meridian Lossless Packing) 變換失真率技術減少龐大的資料容量，DVD-Audio 的取樣率有 44.1kHz、48kHz、88.2kHz、96kHz、176.4kHz、192kHz 等，可以 16Bits、20Bits、24Bits 取樣，使用立體聲錄製時最大資料流量可達 19.2kHz 24Bits，採用 5.1 聲道 (前置二聲道，前置重低音，後置重低音，超低音) 組合聲道錄製時最大取樣率可達 96kHz，DVD-Audio 在播放時可以有畫面配合音樂輸出，DVD-Audio 如此高質的

Analog
input signal

DSD
output signal



樣率最大的好處在於不經冗太複雜的演算法就可以得到比較平滑的音訊波型，能取樣的數值極低，另一個好處是jitter對於音質的影響隨之減少。DVD-Audio目前的價位為一千來百元以上。

SACD(Super Audio Compact Disc)

SACD是Sony公司所提出的以DVD為儲存媒體的下一代音樂儲存規格。SACD的最大特色在於摒棄PCM的取樣方式，改用Delta-Sigma Modulation，屬於PWM(Pulse Width Modulation)的一種，其實Delta-Sigma Modulation是非常常見的技术，平價的CD Player，末用音響，CD隨身聽，音效卡，都是先將PCM訊號先經過Delta-Sigma Modulation，然後再轉為類比訊號。Delta-Sigma Modulation之所以受歡迎是因為可以用較低的成本，比較少的數位週波率得到較高品質的聲音水準，因此大受歡迎。Sony將其改良的Delta-Sigma Modulation技術命名為DSD(Direct Stream Digital)。PWM不同於PCM取樣以訊號大小為主，而是取樣紀錄目前資料最值人的或是小於前一個資料，是個相當複雜的技術，我們簡略地以前圖表示(前頁圖取自SONY的SACD廣告文件)。

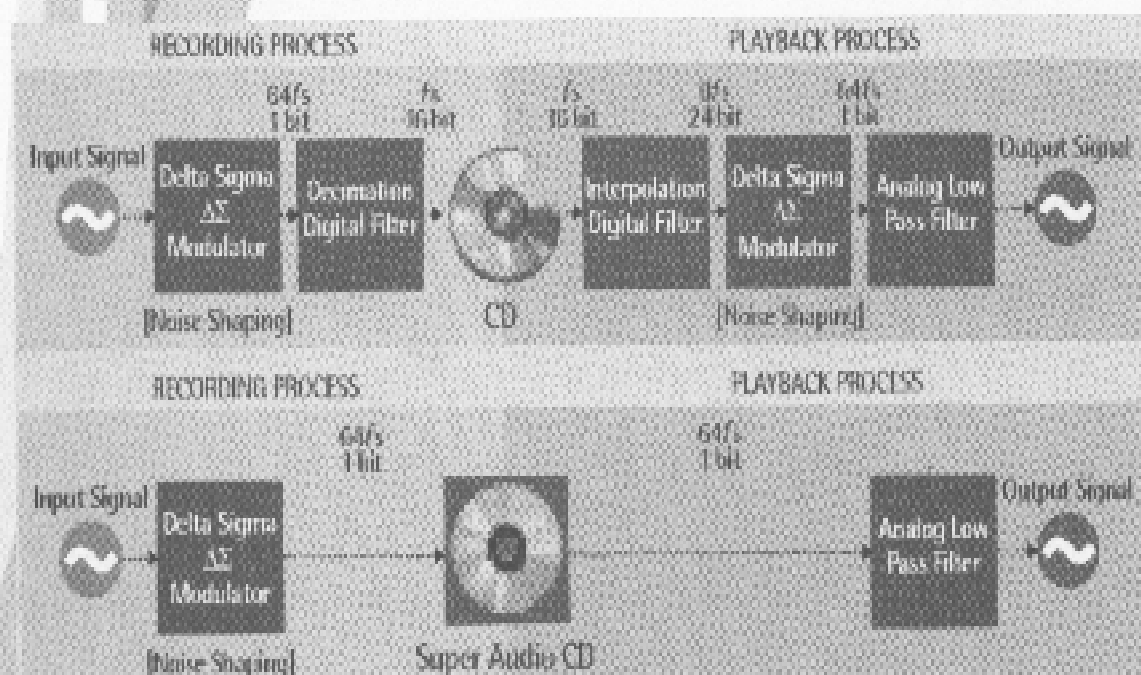
SACD所以使用DSD的最大好處是從錄音到播

放全部都以Delta-Sigma Modulation處理數位訊號，不用在錄音時先用PWM取樣再轉回PCM儲存，收音時又要把PCM經過PWM處理再用DAC轉回類比音訊的看看手續(聽起來很笨，可是絕大部分的CD都是這樣運作的)，因此可以降低失真，下圖是運作圖示：(取自SONY的SACD廣告文件)

SACD同樣也有立體聲和5.1聲道的規格。由於SACD並非PCM編碼，所以沒有用多少bits儲存脈幅的規格，只要一個bit就夠了，但使用高達2822400Hz的取樣率，SACD如同DVD-Audio有單面單層和單面雙層的規格，比較特殊的是混合光碟(Hybrid Disc)，這種格式第一層資料與普通CD相同，可以放到CD Player上播放，第二層則是存放傳統的DSD訊號，供SACD專用Player播放。Delta-Sigma Modulation是相當專業的技術，如果想要進一步認識請參考以下文件，內容取自高傳真233期P.65，作者為黃克強先生。

http://thehomepage.mountain.com.tw/Thisistacacncthop_hosts/Hotarticle0406

dds CD



Dis CD其實其格式與一般CD相同，都是16bit，44.1kHz，可是記錄的資料內容並非PCM取樣訊號，而是經過dts(Digital Theater Systems)編碼後的5.1聲道訊號。Dis CD聆賞時必須將CD轉盤的數位輸出接至支援dts的解碼器以獲得5.1聲道喇叭訊號，由於Dis CD格式與普通CD相同，因此與DCC、acd一樣都可以用普通的方法複製。

音樂 CD 複製技術

音樂CD的複製，嚴格目標是音質與來源CD相同，要達到這個目標要分為兩個層面討論，首先是資料的正確性，再來是降低Jitter。

音樂CD的主要纠错機制在於CIRC2 編碼和subcode，雖然沒有CD-ROM的ECC/EDC纠错碼，但只要是經製的副碟，總是能重建完整的資料。在複製音樂CD時，最好的辦法是先将音樂資料抓到硬碟裡，然後再從硬碟寫碟。因為對燒的壞處在於當燒碟機發現資料有問題時，沒有充裕的時間可以多讀幾次確定資料內容，因此很容易燒出爆音，而且前段太嚴重時，後多無法讀出的資料甚至會造成燒錄中斷，變成杯盤一損。

抓音軌時光碟機的品質與读取模式對資料的正確性影響甚大，有些光碟機抓音軌的速度很慢，也有些光碟機抓得很快卻爆音連連。當光碟機读取的資料量超過本身cache 負荷時，光碟機必須暫停讀取，等cache有空閒了才能繼續。有些光碟機在經歷這暫停再讀取的過程，再次讀取的位置會跟停止的位置不同，造成資料的斷層，也就是爆音的由起，這就是抓音軌不宜一味求快的主因。要有優良的抓音軌能力，光碟機必須要具備Accurate Stream的功能，這樣就能避免以上緩衝區滿載重播出錯的普遍發生，更準確的功能是雙倍速資料讀取功能，也就是當光碟機再抓音軌時會同時偵測ECC碼，如果出錯的話會立即重新讀取，沒有錯的則是繼續往下讀，從數據的正確性與速度有顯著幫助。綜合以上要素，筆者推薦TRAC和Plexter Tech的CDROM作為抓音軌的設備。

尤其是Plexter的機種，這跟檢測出錯，另外在抓音軌時很多人喜歡用Burst Mode來抓音軌快，但是這種雙眼力試是只讀一次不重讀的，如果片子有缺少的話是不會出什麼問題，如果有利損的話就難保不會爆音連連，何況當遇到ECC錯誤時保護常常需要重讀，總之又加速，反覆加速嚴重都會影響光碟機壽命，因此實在不建議使用Burst Mode。

除此之外，我們可以發現將抓好的片子中的音軌抓出來跟從來源片的音軌做比較，來自源片的audio音質資料前面總是多出一些微秒的offset，這是系統總長安排沒有改變，我們經過音軌分析得知offset，這些0的來源有兩個，分別是抓音軌的光碟機和Read Offset和寫碟機的Write Offset，之所以會有Read Offset是因為光碟機認為不認為自己所在的位置跟實際資料出現的位置有誤差，而這個誤差是固定值，因此當資料抓出來時，總是依照是資料產生位移，於檔案開頭多值幾位0或是少了幾個0以是來調整這CD每一軌之間都是對齊的都會，而在這些0之後的資料又跟原始抓出來的相同，同樣寫碟機的 Write Offset成因也是一樣，這些Offset並不會影響音質，只是資料本來就有了一些微秒的差異，但大部分音軌都是相同的，目前能夠完整檢測出這些音軌數值和寫碟軟體非常少見，個人推薦使用免費軟體Exact Audio Copy網頁<http://www.exactaud.ccopy.de/>，不但可以單獨設定各光碟機與寫碟機的offset，還有保持抓音軌方式Secure Mode將每個frame至少重覆讀取兩次，如果資料不同會重覆讀取到最多幾次直到抓來資料內容，以確保資料的正確性，因此將EAC可以按片無論任何軟體抓音軌內容都跟來源片完全一樣不燒片，將其替為寫碟音樂CD資料而產生的第一條解決方案並不為過。

接下來要解決的是Jitter的問題，影響Jitter層面很多，資料源頭的穩定，資料的材質，系統總的電源等都會影響，筆者參考日本的聲片視聽網站<http://www.mypass.net/~media/meda.html>從聲片引入來影片Jitter的測試，影片最大，影片不同的編碼會有Jitter最低的時候記錄，為了降低Jitter我們經過調查日本Toshiba影片或是三友牌影片目前都標榜低Jitter求最

最佳狀況，而且聲音開著Jas-Link或是Burn-Freed以保證或備補漏洞。很可惜的是雖然經過這一連串的努力，所錄出來的片子跟原版CD還是有些差異，所以為了尊重著作權與音質表現，請大家還是支持原裝CD。不過台灣很多盜版音樂CD的inner圈大小跟原音質跟原碟片有很大的差異，我們發現用以上的方法燒出來的片子聲音還比較好。這也告訴我們 ite 是可以有事後處理能力以改善的。

有一點要留意的只是有些磁碟或是抓音軌軟體上會有Jitter Correction的選項，但是我們從上面的文章可以知道inner圈大小不會影響資料的正確性，也就是說Jitter大小並不會改變所抓出來的音軌資料內容。這些軟體所謂的Jitter Correction其實是指光碟發音經由反接讀取此對資料正確性資料內容的正確性，主要是用來對付有阻礙或是壓壞等有問題的CD，這個Jitter Correction的處理層面跟上述數位音軌的 Jitter 不同，個人隨意就稱為Jitter Correction。

講了半天都在講 CD，數位音樂並不只包含 CD，接下來就來介紹其他的數位音樂格式，就從我們所看的VCD和前一輩子應該會台作搞大學生的音圖格式MP3開始吧。

MPBG 與 MP3 的壓縮方式

MP3 是當前最流行的音訊壓縮格式，全名為 MPEG Audio Layer 3，與 MPEG Moving Pictures Expert Coding 這兩種標準和影像壓縮格式同時開發的音訊壓縮格式。舉例一般 VCD 影像壓縮所使用的 MPBG，各片所使用的 MP2 編碼，以及 DVD-Video 影像壓縮所使用的 MPEG2 編碼都是這個同門的徒弟。所以無論是影像或是音訊的編碼都是要失去其連續性壓縮。相較於 CD 和 DMI 的音質，受到經音影響和音訊資料容量是非常龐大的，想像一片音樂 CD 本來只可以儲存 74 分鐘的音高其實超過 74 分鐘的音樂 CD 也很多啦，超過 74 分鐘的小是算不到，在 VCD 中不但要儲存差不多長度的音樂還有畫面，可見壓縮率必須要相當高，而且當然要能收付的。

DVD-Video 的聲音格式常用的有 LPCM，Dolby Digital，ds，其中 LPCM 通常是 16Bits，48kHz 立體聲訊號，與 Dolby Digital 同屬於 DVD 標準音訊格式。Dolby Digital 如同 MP2，MP3 也是一種緩慢的壓縮編碼，特色是將訊號從立體聲降到 5.1 頻道（頻道的資料是 63 頻道都有，壓縮流量最大可達 48kbps 480 bits per second），將這串數字乘以三對喇叭的的資料。我們可以算出每對喇叭（前置或後置）可以分到的流量約為 49.3kbps，相較下流行的 128kbps MP3 大不了多少，因此其實大家不用到 DVD-Video 的 Dolby Digital 聲音品質會有太大的落差，其實流量只比普通的 MP3 大一點點而已，何況 48kbps 只是最大流量，很多 DVD-Video 根本沒有用到這麼大的流量。

DVD-Video 的畫面音軌前面提到的 ds CD 使用同樣的編碼方式，最大流量與立體聲 LPCM 相同，也就是每秒 $48000 \times 16 \times 2 = 1536000\text{bps} = 1536\text{kbps}$ ，遠比 Dolby Digital 所提供的 48kbps 來得大，也就是說緩慢性壓縮的失真較少，因此我們可以想見 ds 碟片的音質一定比 Dolby Digital 來得好，這也就是為什麼市面上經過此編碼的 DVD 總是賣得比較貴，售價高人一等的因素。一般支援 ds 的 DVD-Video 為了在不支援 ds 的設備上也可以播放所以通常會同時搭載二種道的 Dolby Digital 編碼音軌。

扯了半天還是沒有講到什麼 MP3 的容量可以那麼小，音樂 CD 的容量每秒 $44100 \times 16 \times 2 = 1411200\text{bps} = 1411.2\text{kbps}$ ，而我們常用的 MP3 流量只有 128kbps，壓縮後的容量小於原來的十分之一，而音樂家也並沒有差到哪去。MP3 壓縮時運用到很多重要的技巧，分別是音小於最低可聽度(The minimal audiot threshold)，遮蔽(Masking effect)，位元儲存桶(The reservoir of bytes)，The Joint Stereo，和 Huffman 編碼。

最低可聽度將制定是一個減少音量的手段，因為人耳對不同頻率的聲音聽到的音量反應不是平直的，因此我們可以將大部份的音量集中在人耳最靈敏的 2000 到 5000Hz，其餘頻率分配比較少的容量紀錄。

這種效應也是聽覺心理學模型(Psychoacoustic model)的一種，在視覺上呈現的效果就是在大音量下，你比較難看到天空中的飛鳥，聽覺上的意義就是當有一個音量或音的特別突出的聲音出現，其他細小的聲音就比較難被察覺，就像是當後樂器演奏時我們很難發現有觀眾的掌聲聲，就像是當後樂器演奏時我們很難發現有觀眾的掌聲聲。儘管後樂器的音量與其他聲音時其實是相同的，因此在編碼時我們不需要把所有細小的聲音都記錄進去，而後樂器會比較容易引起注意的聲音。

位元儲存是省很錢的經濟，在解釋前要先說明MP3的幾種屬性CBR和VBR。(CBR是Constant Bitrate的縮寫，也就是說該MP3每秒鐘的資料流量是固定的，常見的MP3都是以CBR編碼，好處是壓縮速度快，相對的VBR是Variable Bitrate的縮寫，每秒鐘的流量是可以變化的，好處是在記錄複雜時用比較多的容量去紀錄，這些簡單時就用比較低的流量，以有效利用空間，CBR的缺點就是每秒鐘的流量都相同，很容易造成空間的浪費，好比有reservoir of bytes的出現，用途就是當波型簡單時就不需要那麼大的流量，把多餘的空間保留下來儲存將來比較複雜的波性資料，維持流量的大小，達到類似VBR的效果，VBR的MP3並不需要reservoir of bytes。

Joint Stereo 是一種立體聲編碼技術，主要分為Intensity Stereo(IS)和MidSide (M/S) stereo兩種，IS的是在比較低流量時使用，利用了人耳對於低頻訊號指向性分辨能力的不足，將左聲道中的低頻訊號出來合成單聲道資料，剩餘的高頻資料則合成另一個單聲道資料，並另外紀錄高頻資料的位置資訊，來重建立體聲的效果，例如鋼琴演奏的錄音就可以利用這種方法在有限的位元流量中減少音場資訊卻又能增加音色資訊。

MidSide (M/S) stereo在左右聲道資料中將大部分資料用L，紀錄方式是將左右的聲音訊號做0-180度的旋轉，紀錄方式則是將左右的聲音訊號做0-180度的旋轉，然後再將這兩軌合併利用上面提到的低頻合併後與波型處理，MidSide (M/S) stereo和IS一樣的是利

用部分低頻的資訊的消失來換掉掉解混合的紀錄資訊，一般的MP3是MidSide stereo和Intensity Stereo交替使用的，未來內容依流量而定，如果是資料流量如128kbs以上的MP3，則可以單獨將立體聲的兩個聲道獨立紀錄，以保存相位資訊。

Huffman編碼(coding)是一種常見的無失真壓縮的方案，當PCM訊號被分成好幾位類段並經過以上的處理之後，最後就是經過一種新發明(Lossless Binary Transform)的變換併成MDCT(Modified Discrete Cosine Transform)，將波型轉換成一連串的系數，這些系數最後就要經過 Huffman 編碼來做最後的取捨，Huffman編碼的原理是將比較常出現的字串用短字和符號表示，壓縮後就得到一串記錄每個字串代表在字串中的高低位以及一連串由各字串組成的資料內容，Huffman編碼可以節省很多位的空間，而因為經過了Huffman編碼，我們可以發現用WinZip、WinRAR之類的壓縮軟體並沒有辦法把MP3縮小多少，原因就是因為這些資料軟體也是利用類似Huffman編碼的技巧，因此壓縮率多有限，以上關於MP3編碼的資料取自<http://www.sony-electronics.com/>。

MP3播放時的運算需求是極低的，只要先經過Huffman解碼再由MDCT的逆變換重建波型就可以了，值得注意的是MP3不同於PCM沒有bits的位元，我們可以自由使用 6bits或是30bits甚至24bits的運算精度來重建波型，一般的MP3 Player都是以16bits運算精度，而Winamp的MP3解碼外掛MAD(作者網頁<http://www.mad.ac/forums/showthread.php?p=1>)或是用24bits運算精度處理，如果使用的音效卡DAC支援24bit-格式的PCM，就可以直接輸出16bits的訊號，一般的娛樂用音效卡都只有 6bit的數位轉換能力，因此訊號送給音效卡前必須要經過re-dithering的過程，我們從之前所介紹的解碼過程的處理可以想到比16bits更多的聲音資訊與動態範圍，因此MAD在一般的音效卡上仍有其利用價值，不管使用MAD與Winamp 2.4內建的MP3 decoder比較，發現MAD的音質的確比較好，聲音更軟，尤其是那些感測器能力與喇叭的總dynamics好很多，因此建議各位聲

MIDI時常能應用。

網絡上有非常多的MIDI連結軟體，有的強調速度很快，有的強調使用介面簡單易用，我個人是以音質作為第一考量，終比較會再次向各位推薦一個免費的MIDI連結程式LAME（下載位置<http://www.lhz.com/~lame/>），這套程式屬於自由軟體，應廣GNU規範，其網絡上很多熱心人士將其體研發而後，目前仍持續更新中，原站網頁為<http://www.mp3dev.org/index/>，前稱之前本軟體已有3.8beta版，3.89alpha版目前正在alpha中，搭配LAME的前導程式是RazorLame，有關此程式的使用說明及其連結參數介紹請參考：網友Tuxeris的LAME使用經驗談。

在從前Internet網路還不大時，MIDI的交流比較少見，一般網頁通常使用MIDI作為背景音樂，MIDI也是數位音樂的一大分支，以下就來介紹MIDI。

MIDI(Musical Instrument Digital Interface)

MIDI是於1982年由世界上各電子樂器廠家共同制定的一種電子樂器通訊介面，藉由電腦各機發出的音信號，各個音符的長短，高低，及強，以及利用效果器的控制與參數，來記錄音樂資訊。在電腦裡應用MIDI格式儲存一首曲子的各音符資料的檔案種類很多，例如mid、midi、rmi、rpm...等，這些檔案由於只儲存音符的資料，而沒有儲存音色樣式的檔案資料，因此容量比起wav，MIDI都相當小，大部分經過Winzip壓縮後都只有十幾kb。

要播放這些MIDI檔案，除了要有MIDI檔和播放軟體外，最重要的是要有MIDI音色和對應的效果器支援，我們可以用MIDI檔視作為樂譜，播放軟體視為樂團的成員，MIDI音檔視為樂器，三者缺一不可。一般來講，要達到作曲家所期望的作響效果，最好是拿譜曲場所，的音檔來播放以至於原音，因此，MIDI的音色質量並不是越大越真實越好，效果器功能也不是越多越好，能夠符合作曲家要求而能夠安分守己是適合的，如果很干，毫無的細節和波

的音感，至少使用該音樂家所同等級產品來播放，才能達到類似的效果。

MIDI音源一般來講可以分成三種，第一種是硬體音源，例如音源器(Sound Module)，音源卡，MIDI鍵盤，還有音源子卡，其中音源器和琴以及許多衍生配備，必須要搭配MIDI介面卡(如從前常見的Roland MPU-401)才能與電腦相連接，達到接收MIDI訊號的功能，許許多多的MIDI檔都是由這些音源MIDI鍵盤所儲存，再經由MIDI Cable把訊號傳至MIDI介面卡由電腦接收下來，音源卡是外接設備，面板上通常有音量調整與基準各軌效果器的按鈕與液晶顯示幕，而音源卡則是將音源器的發聲信號放在電腦介面卡上，屬於內接設備，音源子卡在使用上必須另外搭配音效卡提供音源和MIDI訊號，並且放大音源子卡輸出的數位訊號，音源子卡在1994年以後開始流行，是電腦音效卡的前驅者如Creative所提出的標準，當時有很多音效卡支援音源子卡，例如Creative SB16，SB AWE32，這代的音源卡之寶，和氏璧，春之組Pro，Diamond MX300，Turtle-Beach SantaCruz，Labway X-wave Thunder 3D等。這裡有一些音源子卡與音效卡連接的照片<http://www.diamond.com.tw/SoundCard/M80/Midi.htm>，注意看這些音效卡上都有Open的針腳，正是用來連接音源子卡，還有一些不是音效卡卻可以搭配音源子卡，例如Roland MPU-401本身是MIDI介面卡又可以接音源子卡，KORG NSER本身是音源卡又可內接一張音源子卡。在眾多的音源子卡中，最有名的分別是日本三大MIDI音源器的產品Roland SCD-1S，YAMAHA DB50XG和Korg Regency。

另一種MIDI音源是軟體音源，常見的軟體音源例如YAMAHA S-YXG系列，是以音源卡YAMAHA SCD-1S架構的音源子卡DB50XG和音源卡SW60XG所組成的音源器為模擬對象，相當於GM，XG與GS，Roland VSC系列，是以Roland SC-88Pro作為模擬對象，相當於GS，GM1與GM2；WinGroove則是自作者山口隆夫先前的綜合硬體MIDI音源卡採樣音色，相當於GM與部分GS，軟體音源的缺點是

需要較高的CPU使用率且很難做到即時錄音，想像一下當按下琴鍵後過了0.5秒聲音才發出來是個多麼令人難過的事情。因此在專業作曲的領域通常還是使用硬體音源。

還有一種MIDI音源就是目前娛樂用音效卡所廣泛採用的技術，將MIDI音色存在硬碟中，當使用時再存到主機板上的RAM內，而不同於傳統上的音色資料寫死在音效卡上的ROM中。這種觀念的始作俑者是Gravis UltraSound這個當時風靡MOD界的音效卡（簡單來說MOD是一種包含音色波形的MIDI檔），但是該音效卡是將音色存在卡上的RAM中，而現在的卡是存在主機板上的DRAM中，還是有所不同，但目的都是避免將音色寫在卡上的ROM中以降低成本。目前市面上娛樂用音效卡的聲晶片，以Yamaha的內建音色供效果器支援度最廣，所用的音色制動器和S-YXG100相當類似，支援GM，XG與GS，對於這一種格式製成的MIDI檔有一定的相容性，SB Live!聲晶片，為EMU10K1屬於另外一種典型，它具有強大的採樣音色轉換功能，並且編碼提取能力，可以讓使用者隨時所欲調出各種音色。很可惜的是SB Live!只支援GM，且還不支持GM Reset指令，因此播放USXG規格的MIDI檔，很難達到忠於原味的效果。其餘大部分的市面上的娛樂用音效卡，MIDI音色都很貧弱，與其使用這些音色，不如直接去安裝上述軟體音源。

順道一提，MS Windows 98/Me和2000都有內建軟體音源，只要安裝音效卡的WDM驅動程式即可使用，其音色來源是Roland，只支援GM，不過品質相當差勁，聽過之後實在很難讓人相信是出自Roland的音色。

關於GM，GS，XG這三種常見的MIDI音源規格，以GM最為廣泛，GM(General MIDI)是第一代以音源標準化為主要目的去設計之規格，在GM尚未制定以前，各種MIDI器材之間通訊雖然都遵循MIDI標準，但是各音源對於同樣的訊息反應可能都不一樣，在這台音源器上的第一號樂器是鋼琴，跑到另一台音

源器上可能變成手風琴，這樣子就算有MIDI編曲制式規格，流通性還是大為折扣。為了解決這個問題，在各廠商的協裁下，於1991年10月由位於美國的IMA(International MIDI Association)以及在日本的IMX(Japanese MIDI Standard Committee)，共同協定採用GM規格，作為音源的共通統一規格。GM音源規範了128個樂器以及鼓組的排列順序，共同時發音數至少要達到24，還有Sustain和Chorus這兩個效果器的功能。

在GM尚未制定之前，已經有不少遊戲使用MIDI作為配樂標準，當時Siem公司率先使用音源器Roland MT-32作為發音音源，當時一台台還要買幾十台個人電腦就要賣了，因此能擁有MT-32做為遊戲音源的使用者都是真正的玩家。在GM制定之後，Windows 95上市以前，也有很多DOS下的遊戲都是使用GM音源作為MIDI標準，不過雖然說是支援GM，各大遊戲廠商通常還是使用Roland SC-55作為遊戲曲音源器，當時配樂聽出的遊戲如：Lucasarts X-Wing、The 7th Guest、Ultima的魔獸爭霸II、Gothic長少女初上高中、Wasteland的創魔地中傳說一命運之手等，搭配Roland SC-55簡直可謂綜合模擬三日本國鋼琴。

關於Roland制定的MIDI標準GS可視為GM的補充，其實當GM制定前Roland SC-55已經上市了，GM的128個音色正是SC-55的的128個音色，而後音數，效果器也是盡量訂像，因此當GM制定後出廠的SC-55，都被打上GM字樣，這也是為什麼遊戲廠商紛紛以SC-55作為GM配樂標準的原因。XG是Roland的死對頭YAMAHA後來提出的規格，可視作屬於GM，且YAMAHA支援XG的首領音是具備TG5008 Mode，其實這只是GS Mode，只是YAMAHA打死不願意在自己的木材打上GS字樣，而GM2是1999年提出的GM擴充標準，有著255個音色與更多的效果器，雖然看到Roland就想到GS，想到YAMAHA就會想到XG，但這些常常都是

死的，並沒有制定音色資料庫，因此真正的播放效果還是要看各音源的支援程度規格，並非支援規格定規格的音源就起來就一定是怎樣怎樣，還是要以數音源器的規格與發聲機制為主。

MIDI在日本最為流行，很多業餘的玩家常常把電腦音樂耳及把旋律抓出來再編成MIDI裡，這個過程叫做Copy。一些熱門的遊戲，常常同一個曲子就有幾十種不同版本的MIDI檔，展現各種曲家的創意與技巧。我曾經在Island的網頁看到每年舉辦一次的MIDI作曲大賽，競賽內容包括日本與台灣民謠編曲，參賽者都是一些小學生，可見MIDI在日本有多麼普遍。

結語

拉拉雜雜講了一大堆，從數位化講起CD再講到各種儲存媒介和數位音樂與它密切的關係，希望能讓讀者對於數位音樂有初步的認識。以上這些資料全部取材自網路上，網誌文後附上，希望我這一年來熬了一大堆試編，在各位得到的這些心得對最各位的創作有所幫助。最後要感謝網友Tiberius和James的大力協助，提供了豐富的資料與技術支援，讓這篇文章增色不少。

參考資料

DearHoney數位音樂工作室，<http://www.dearhoney.idv.tw/>

關於CD

Compact Disc: The Inside Story

<http://home.mcom.ca/~gdk/mackcd/guidecd.html#contents>

Nyquist Functions

<http://www.cis.mcm.cu/~cfd/fac/nquist/cd16.html>

CD-Remakeable FAQ

<http://www.shifen.org/faq/C.html>

IEC-908... The 516 picture

<http://www.ec.washington.edu/consul/IEC/iecnorm.html/516/516%20908.htm>

Heard De-Emphasis

<http://www.hatfish.com/gredecmp.html>

The Secrets of Dither

<http://www.digitalsound.com/thesis/ntm/811ToC8>

What is dither?

http://www.mtsu.edu/~csmitche/rim420/reading/rim420_Dither.html

HD-CD - About HD-CD - Our Story

<http://www.hdc.com/about/ourstory.html>

X-CD by TWC

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

DVD-Audio for High Quality Music

<http://www.cds-technics.com/cd/download/44khz/44kpl/Sony%20Super%20Audio%20CD>

Super Audio CD

<http://www.podlingusa.com/scr-40/format.asp>

關於 MP3

MP3 Tech - Overview of the MP3 techniques

<http://www.mp3-tech.org/tech.html>

Huffman Coding

<http://www.csipr.lth.se/research/compression/algorithms/huff/huffman/>

<http://webhome.gorn.ch/~fabIAN/6ap/mode124.html>

Modified Discrete Cosine Transform (MDCT)

<http://www.cornell.edu/~hassan/mj/pubs/13.html>

THE LAME Project

<http://www.mp3dev.org/mp3/>

網友 Tiberius 的 LAME 使用/參數說明

<http://www.dearhoney.idv.tw/MP3/Encoder/TiberiusXX0019/>

MAD Plug-in For Winamp

<http://www.mars.org/~haxx/cefp/cefp/cefp/mad-plugin/>

關於 MIDI

Seaway to Heaven

<http://seawaytoheaven.com/seaway/>

DearHoney 數位音樂工作室 MIDI 博物館

<http://www.dearhoney.com/MIDI/SEUP/midi.htm>

告謬書

<http://p-union.tekmail.com/misic.htm>