

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

虛擬室內環境三度空間音響之研究與實現 3D Sound System for Virtual Indoor Environments

計畫編號：NSC 89-2213-E-002-027

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：鄭士康 教授 助理研究人員：詹志龍 執行機構：台大電信工程學研究所

一、摘要

隨著電腦多媒體時代的來臨，「虛擬實境」(virtual reality, VR)是目前頗為熱門之研究課題。在聲覺效果的研究發展上，3D音響(3D sound)系統乃是目前電腦音樂之新潮流。本研究實作完成「虛擬室內三度空間聲場」(virtual indoor 3D acoustic environment)系統，為簡易3D音響系統加上殘響、迴音等效果；這些效果可由「空間轉移函數」(room transfer function, RTF)或「空間雙耳轉移函數」(binaural room transfer function, BRTF)表示。本研究中，將提出二個架構：一為利用模擬的BRTF配合DSP技巧，一為利用模擬的RTF配合量測的「頭部有關轉移函數」(head-related transfer function, HRTF)及DSP技巧來實作「虛擬室內三度空間聲場」。

Abstract

With the coming of computer multimedia era, "virtual reality" (VR) has become a more and more popular topic. This research has implemented a "virtual indoor 3D acoustic environment", which combines a basic 3D sound system with reverberation and other effects in order to simulate natural acoustic scenes. These effects can be described by "room transfer function" (RTF) or "binaural room transfer function" (BRTF). This research proposes two structures to implement "virtual indoor 3D acoustic

environment system." One is to combine the BRTF simulation and DSP techniques. The other is to use the RTF simulation, the HRTF measurement and DSP techniques.

Keywords: BRTF, RTF, Virtual Indoor Acoustic Environment, HRTF, 3D Sound

二、緣由與目的

近年來，如何透過虛擬的視覺與聽覺效果，使人雖然不在實際的現場，但卻讓人有一種身歷其境的感覺，一直是大家所努力的方向，而這也就是所謂的「虛擬實境」，對於一般的大眾而言，如果能夠透一套聲音再生系統，使得在家中就感覺與在演唱會現場，這就可說是達成聽覺系統的虛擬實境。

在自由聲場中，也就是不考慮環境因素的影響，人判斷聲音的方向是靠雙耳聽到聲音抵達的時間差、聲音的強度差等因素。所有這些因素總和的效果，即是人的左右耳對不同方向之音源有著不同的頻率響應，這也就是一般人所熟知的頭部有關轉移函數[1]-[2]。但光利用頭部有關轉移函數，純粹只能作到聲音定位[3]，並無法擁有空間的感覺，要達到聽覺的虛擬境更必須對於實際空間(如音樂廳)之聲場特性有所了解。由於房間形狀、表面材質等影響，造成聲音於其中有反射、繞射、散射等現象，因此，綜合聲音於空間中傳遞的情形，可由空間轉移函數來表示。利用頭部有關轉移函數加上空間轉移函數，即可達成虛擬室內三度空間聲場的效果。

目前由台大電機系及資訊系已在個人

電腦上發展了一套 Visual C++ 程式 irc2(impulse response code, version 2), 可計算室內反射環境下, 由聲源發出, 抵達聽者左右耳之各頻率聲壓波大小與相位的空間轉移函數及空間雙耳轉移函數[4]。本研究利用此計算出來的轉移函數, 求出空間脈衝響應函數或空間雙耳脈衝響應函數, 並實現虛擬室內三度空間音效系統[5]。

三、結果與討論

本研究提出兩個實現虛擬室內環境三度空間音響的系統架構。首先, 定義圖(一)為虛擬室內三度空間聲場架構 A, 定義圖(二)為虛擬室內三度空間聲場架構 B。以下分別介紹這兩個架構。

■ 架構 A

1. 利用 irc2 程式, 將房間的環境與頭部有關轉移函數一併考慮, 模擬出一套三度空間的雙耳轉移函數。此空間雙耳轉移函數為仰角 θ 與方位角 ϕ 的函數。
2. 如圖(一), 假設聽者頭部裝設感測器, 藉由三度空間位置追蹤儀, 傳回目前頭部所在位置的 θ 角及 ϕ 角, 或利用程式輸入設定 θ 角及 ϕ 角, 於是可找出相對應之空間雙耳轉移函數。聲音輸入經左耳及右耳所對應的空間雙耳轉移函數運算, 即可得到具有室內聲場效果與三度空間特性的聲音輸出。

■ 架構 B

1. 利用 irc2 程式, 只考慮房間的環境而不考慮三度空間特性(即模擬時不載入頭部有關轉移函數), 模擬出空間轉移函數, 作為 RTF 濾波器用。
2. 如圖(二), 系統架構大致可分為兩個部分。①聲音輸入經 RTF 濾波器(即與空間轉移函數運算), 得到具有室內聲場效果的聲音輸出。②將具有室內聲場效果的聲音再經左耳及右耳所對應的頭部有關轉移函數運算, 得到具有室內聲場效果與三度空間特性的聲音輸出。對應於任意時間的頭部位置及

頭部有關轉移函數, 可由三度空間位置追蹤儀或利用程式輸入來決定。

為了實現這兩個架構, 本研究模擬兩個室內空間環境。如圖(三), 為一簡易的長方形空間, 長寬高分別為 $(12m, 10m, 10m)$ 。假設四面牆壁的反射係數均為 Γ , 聲源置於座標 $(2.5m, 5m, 5m)$ 處, 聽者置於座標 $(5m, 5m, 5m)$ 處。以下將利用 irc2 程式, 對 $\Gamma = 0.7 + j0.05$ 及 $\Gamma = 0.99 + j0.05$, 配合頭部有關轉移函數, 分別模擬出空間雙耳轉移函數。

圖(四)-(六), 為當 $\Gamma = 0.7 + j0.05$ 時, 分別表示聲源在正前方、正左方及正右方時雙耳的脈衝響應。當聲源在頭部正前方時, 左右耳的脈衝響應可以說相差不多; 當聲源在頭部正左方或正右方時, 由圖可看出其中一耳的脈衝響應會大於另一耳。圖(七)-(九)為當 $\Gamma = 0.99 + j0.05$ 時, 表示聲源在正前方、正左方及正右方時雙耳的脈衝響應。與 $\Gamma = 0.7 + j0.05$ 時的情況相同, 反射係數較強的環境亦會有相同的效果, 即聲源在頭部正左方或正右方時, 其中一耳的脈衝響應會大於另一耳。但因為空間的反射較強, 殘響也就較久, 由圖(八)與圖(九)可看出, 這樣的效果只發生在直接聲波及較前幾次聲音彈跳的響應上。在 $50ms$ 前, 兩耳的脈衝響應會隨著聲源位置不同而改變, 在 $50ms$ 之後, 殘響效果不會受聲源位置影響。這樣的結果非常合理, 原因是由於殘響是聲音經過好幾次的彈跳反射所產生, 並非聲音對耳朵的直接貢獻。

如圖(十), 為一類似音樂廳的空間環境空間, 假設音源位置為 $(-8m, 0m, 3m)$, 聽者位置為 $(-2m, 0m, 2m)$ 。利用 irc2 程式配合頭部有關轉移函數, 可模擬出空間雙耳轉移函數。圖(十一)為聲源位置在頭部正前方時之空間雙耳脈衝響應函數; 圖(十二)及圖(十三)則分別表示聲源位置在頭部正左方及正右方時之空間雙耳脈衝響應函數。由圖可知假想音樂廳之空間雙耳脈衝響應也有與長方形房間相似的效應。

理論上, 正確虛擬室內三度空間音效系統的架構應為架構 A。原因是: 在考慮室內環境時, 聽者所在位置可能距離某個

反射面較近，再加上聽者的頭部方向相對於反射面位置，使得聲音經反射面到雙耳的強度差及時間差會不同。另外，對於較高頻的聲音，頭部亦有遮蔽的效應。於是影響左右耳的脈衝響應函數必須由頭部所在的位置、方向及反射面共同決定。所以在模擬時引入頭部有關轉移函數而得到的空間雙耳轉移函數，可說是最能表示頭部在室內環境中在某個位置的頻率響應。

對於頭部位置相對於聲源的空間轉移函數，聲音經過其運算後，雖然可以表現出這個空間環境的殘響、迴音等等，但無法清楚描述聲源在空間中的位置。另外，由於頭部有關轉移函數是在自由聲場下量測(即不考慮環境因素之影響)，即以無響室(anechoic chamber)來量測空間中 756 個不同位置的頭部有關轉移函數。因此，架構 B 可以想像成一個具有殘響、迴音效果的聲音源在無迴響空間環境中旋轉 360 度。

根據實作的結果，我們比較兩個架構的聲音輸出：當空間環境的反射係數較強時，架構 A 之三度空間效果並不很明顯，原因是在運算時，由於殘響效果疊加的結果使得直接聲波被抑制，其貢獻無法表現出來；而當空間環境的反射係數降低時，架構 A 之三度空間的效果會明顯的顯現。架構 B 則不論空間環境的反射係數為何，均有不錯的三度空間效果。在聆聽品質方面，我們發現經架構 A 處理後的聲音較具有真實感及臨場感，符合一般真實的空間感受；經架構 B 處理後的聲音則像是一個虛擬的三度空間感受。

四、計畫成果自評

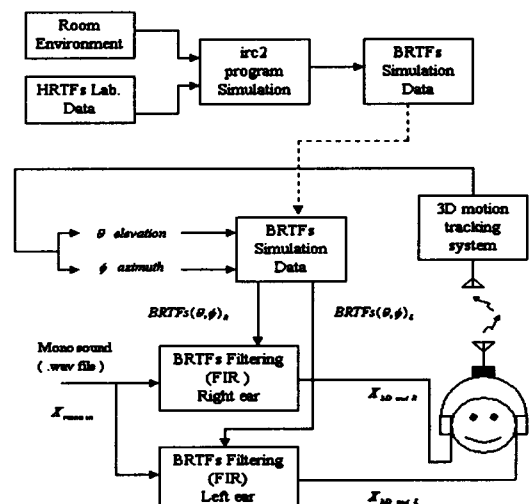
在本研究中，我們已藉由聲場理論所算出的空間轉移函數及空間雙耳轉移函數，利用程式及數位訊號處理的方法，在 Microsoft Windows[®] 作業平台下，發展了一套可以實現虛擬室內三度空間音效系統的軟體：VIAESS(Virtual Indoor Acoustic Environment System Software)。

應用此一系統可先以 irc2 程式模擬出

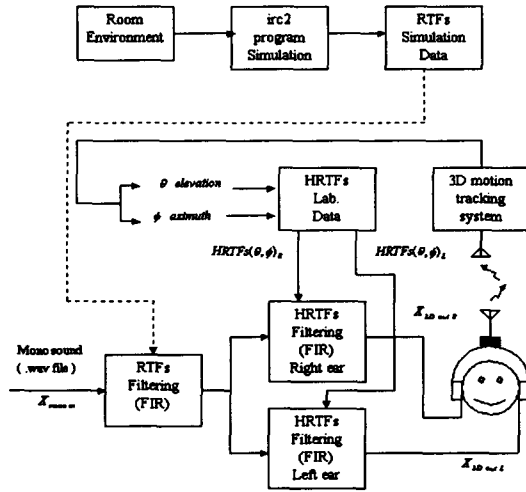
任何可想像之空間環境(如音樂廳、體育館)的脈衝響應，進而利用 VIAESS 聽出這個想像空間中某個位置的聲音效果。由於電腦的運算速度(Pentium[®] II 450MHz)，本研究中所採用的測試聲源之取樣頻率僅為 11025Hz，低於人類聽覺上限，稍嫌美中不足。我們也期待，當電腦速度不斷提升之後，可將聲源的取樣頻率提高，進而透過此套聲音再生系統，達到真正聽覺系統虛擬實境的目的。

五、參考文獻

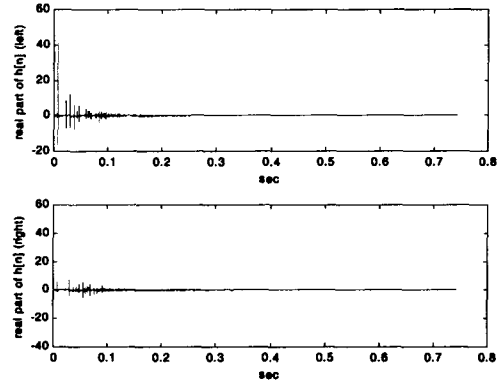
- [1] 清華大學動力機械研究所及工研院電通所，頭部頻率轉移函數及空間聲學特性之量測，1997。
- [2] B. Gardner and K. Martin, HRTF Measurement of a KEMER Dummy-Head Microphone, MIT Media Lab, 1994.
- [3] 鍾永哲，虛擬實境實現-三度空間聲音系統實作，台灣大學電信工程學研究所碩士論文，1999。
- [4] 清華大學動力機械研究所，台灣大學電機工程研究所及工研院電通所，數位音場模擬之研究，1998。
- [5] 詹志龍，虛擬室內三度空間聲場的實現，台灣大學電信工程學研究所碩士論文，2000。



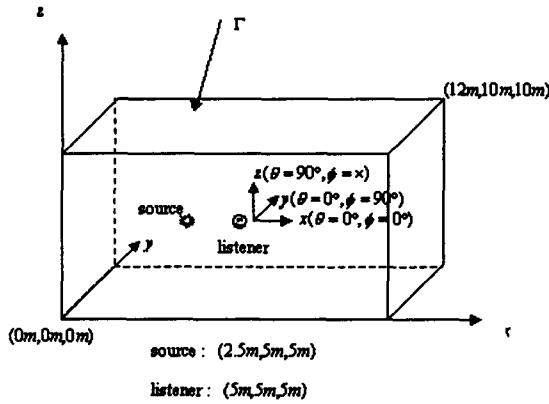
圖(一) 虛擬室內環境三度空間聲場架構 A



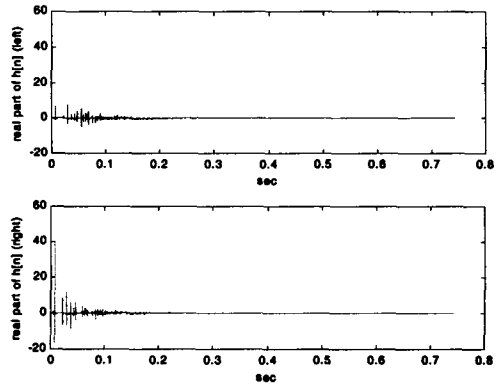
圖(二) 虛擬室內環境三度空間聲場架構 B



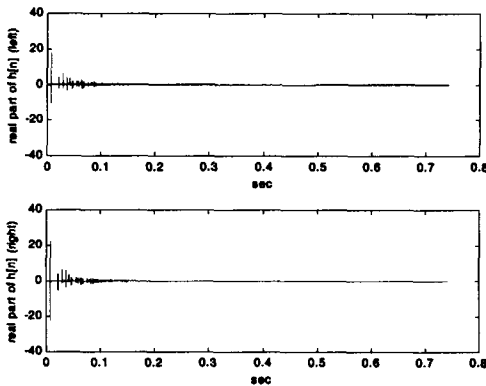
圖(五) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.7 + j0.05$ ，聲音在頭部正左方時的空間雙耳脈衝響應函數



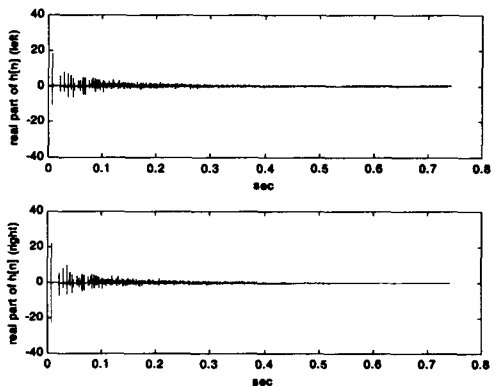
圖(三) 簡易長成形空間環境



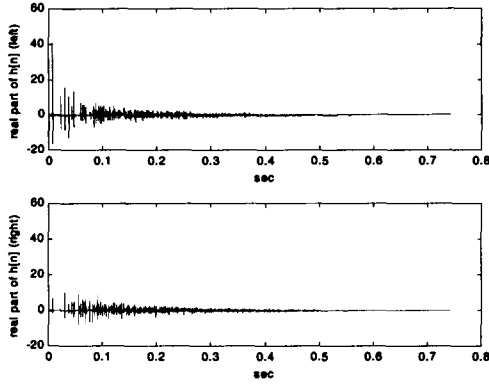
圖(六) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.7 + j0.05$ ，聲音在頭部正右方時的空間雙耳脈衝響應函數



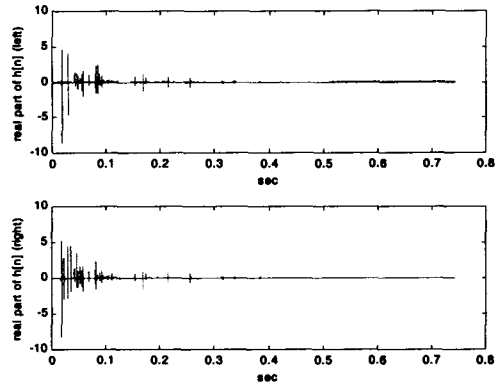
圖(四) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.7 + j0.05$ ，聲音在頭部正前方時的空間雙耳脈衝響應函數



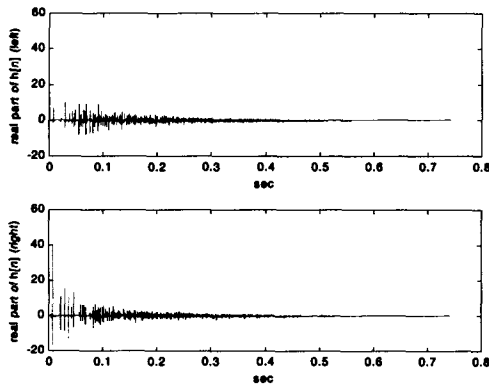
圖(七) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.9 + j0.05$ ，聲音在頭部正前方時的空間雙耳脈衝響應函數



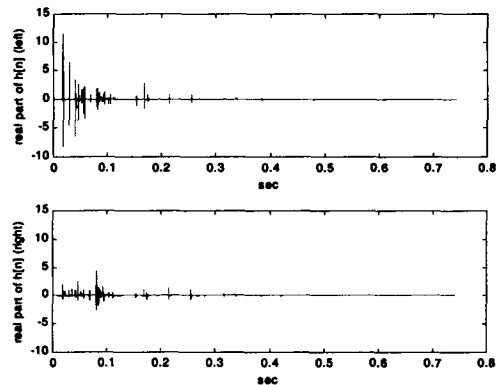
圖(八) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.9 + j0.05$ ，聲音在頭部正左方時的空間雙耳脈衝響應函數



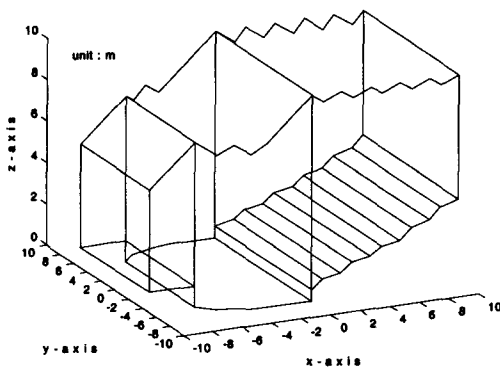
圖(十一) 於圖(十)空間環境中，聽者位置為 $(-2m, 0m, 2m)$ ，頭部方向為 $(\theta = 0^\circ, \phi = 180^\circ)$ 時的空間雙耳脈衝響應函數



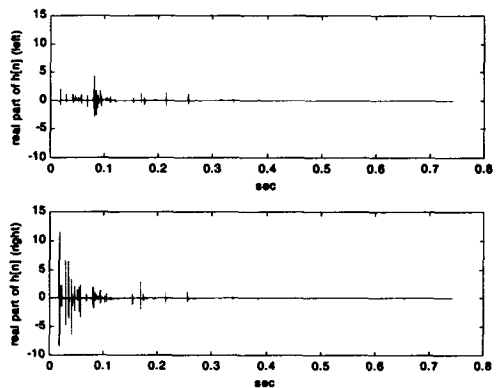
圖(九) 於圖(三)空間環境中， $\Gamma = 0.9 + j0.05$ ，聲音在頭部正右方時的空間雙耳脈衝響應函數



圖(十二) 於圖(十)空間環境中，聽者位置為 $(-2m, 0m, 2m)$ ，頭部方向為 $(\theta = 0^\circ, \phi = 90^\circ)$ 時的空間雙耳脈衝響應函數



圖(十) 假想音樂廳空間



圖(十三) 於圖(十)空間環境中，聽者位置為 $(-2m, 0m, 2m)$ ，頭部方向為 $(\theta = 0^\circ, \phi = 270^\circ)$ 時的空間雙耳脈衝響應函數