

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 99-2221-E-324-031-
執行期間：99年08月01日至100年07月31日
執行單位：朝陽科技大學建築系

計畫主持人：陳炯堯

計畫參與人員：碩士級-專任助理人員：林棋文
碩士級-專任助理人員：劉俊佑

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

公開資訊：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 100 年 11 月 02 日

中文摘要：凡是人群集中的空間須考慮到火警緊急廣播的重要性；如車站、醫院、劇院、電影院……等，必須能夠聽清楚內容是相當重要的。因此，空間語音清晰性能評估法，語音傳輸指標（speech transmission index, STI）就在此被提倡出來。然而空間中聽者之雙耳的聽覺效應與 STI 之影響卻很少有人去探討。Morimoto (2007) 1 曾以噪音跟日語討論聲場的迴響時間與雙耳互函數級數（the magnitude of inter-aural cross-correlation function, IACC）交替影響下，語音可聽程度的影響。發現訊噪比（signal to noise ratio, SN）在 -10 dB ~ 10 dB 的範圍與迴響時間在 0.5s ~ 4.0s 之間改變 IACC 條件下，對於可聽程度沒有太大的影響。只有在 SN 較低的時候（-10 dB 以下），IACC 的改變會影響可聽程度。但研究中 IACC 條件變化範圍僅於 0.5 ~ 1.0 之間。本研究則著眼於增加 IACC 的變化範圍，且同時檢討雙耳互函數的遲延時間（ τ IACC）與空間語音清晰性能的關係；而心理實驗方法以配對比較法來進行，以求得單音節語音之聽取明瞭度與 IACC 之關聯性。研究結果發現：1. 單音節語音之聽取明瞭度會受到迴響時間的影響（ $p < 0.001$ ）；2. 在不同之 IACC 改變下對於單音節語音之聽取明瞭度亦也有顯著差異（ $p < 0.001$ ）。3. 而迴響時間與 IACC 兩因子是相互獨立的（ $p > 0.05$ ）。4. 以雙耳互函數遲延（delay of inter-aural cross-correlation function, τ IACC）來探討空間語音清晰性能，發現 τ IACC 與雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之對應下沒有關聯性影響。

英文摘要：The importance of a fire alarm broadcasting system should be taken into consideration for places where many people would gather such as train stations, hospitals, theaters, cinemas and so on. The same important is that the broadcast content must be able to be clearly heard. For this, a spatial speech intelligibility evaluation method and STI (speech transmission index) were presented. In 1973, the physical indices of MTF (modulation transfer function) and STI were first put forth by Houtagst, Steeneken and Plomp to quantify the quality of speech transmission. However, very few researches have been conducted on listeners' binaural effect and the influence of STI. Morimoto (2007) once used noises and Japanese language to examine the influence of a sound field's

reverberation time and IACC (magnitude of interaural cross-correlation function) on speech intelligibility. It was found that under an IACC condition where SN (signal-to-noise ratio) was between -10dB ~10dB and reverberation time varied between 0.5s ~ 4.0s, no obvious changes were noticed in speech intelligibility, and that only when SN was lower than -10dB, would the change of IACC affect speech intelligibility. However, in Morimoto's research, the scope of IACC change was limited to a scope between 0.5 ~1.0. Accordingly, this study focused on a broadened IACC scope, the delay time of cross correlation function (τ IACC), and adopted a comparison method of pair-based psychological experiment to identify the correlation between speech articulation of monosyllable and IACC. Below are the findings of this study: 1. The speech articulation of monosyllable could be affected by reverberation time ($p < 0.001$), and no significant changes were noticed with the change of IACC ($p > 0.05$) 2. Reverberation time and IACC were two factors that were independent of each other ($p > 0.05$).

室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究

Study of the effects of inter-aural cross-correlation on speech articulation of monosyllable in an indoor sound field

計畫編號：NSC 99-2221-E-324-031

執行期限：99 年 8 月 1 日至 100 年 7 月 31 日

計畫參與人員：林棋文 朝陽科技大學建築及都市設計研究所研究生

劉俊佑 朝陽科技大學建築及都市設計研究所研究生

一、摘要

凡是人群集中的空間須考慮到火警緊急廣播的重要性；如車站、醫院、劇院、電影院……等，必須能夠聽清楚內容是相當重要的。因此，空間語音清晰性能評估法，語音傳輸指標（speech transmission index, STI）就在此被提倡出來。然而空間中聽者之雙耳的聽覺效應與 STI 之影響卻很少有人去探討。Morimoto(2007)¹曾以噪音跟日語討論聲場的迴響時間與雙耳互函數級數（the magnitude of inter-aural cross-correlation function, IACC）交替影響下，語音可聽程度的影響。發現訊噪比（signal to noise ratio, SN）在 -10 dB ~ 10 dB 的範圍與迴響時間在 0.5s ~ 4.0s 之間改變 IACC 條件下，對於可聽程度沒有太大的影響。只有在 SN 較低的時候（-10 dB 以下），IACC 的改變會影響可聽程度。但研究中 IACC 條件變化範圍僅於 0.5 ~ 1.0 之間。本研究則著眼於增加 IACC 的變化範圍，且同時檢討雙耳互函數的遲延時間（ τ_{IACC} ）與空間語音清晰性能的關係；而心理實驗方法以配對比較法來進行，以求得單音節語音之聽取明瞭度與 IACC 之關聯性。研究結果發現：1. 單音節語音之聽取明瞭度會受到迴響時間的影響（ $p < 0.001$ ）；2. 在不同之 IACC 改變下對於單音節語音之聽取明瞭度亦有顯著差異（ $p < 0.001$ ）。3. 而迴響時間與 IACC 兩因子是相互獨立的（ $p > 0.05$ ）。4. 以雙耳互函數遲延（delay of inter-aural cross-correlation function, τ_{IACC} ）來探討空間語音清晰性能，發現 τ_{IACC} 與雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之對應下沒有關聯性影響。

二、前言

以聲音來作為訊息或是情報的傳達，在許多空間是不可或缺的。必須能夠聽清楚其內容是相當重要的，尤其是人群集中的空間須考慮到火警緊急廣播的重要性；如車站、醫院、劇院、電影院...等，所以空間語音清晰性能評估法就在此被提倡出來。以聲音來作為訊息或是情報的傳達，在許多空間是不可或缺的。必須能夠聽清楚其內容是相當重要的，尤其是人群集中的空間須考慮到火警緊急廣播的重要性；如車站、醫院、劇院、電影院……等，所以空間語音清晰性能評估法就在此被提倡出來。Houtgast, Steeneken and Plomp (1973)²首先提出調變轉移函數（modulation transfer

function, MTF) 與語音傳輸指標 (speech transmission index, STI) 等物理指標來量化空間語音訊號傳遞的品質。而空間中聽者之雙耳的聽覺效應與語音清晰性能之影響卻很少有人去探討。Morimoto (2007)¹ 曾以噪音跟日語討論聲場的迴響時間與雙耳互函數級數 (the magnitude of inter-aural cross-correlation function, IACC) 交替影響下, 語音可聽程度的影響。發現訊噪比 (signal to noise ratio, SN) 在 -10 dB ~ 10 dB 的範圍與迴響時間在 0.5s ~ 4.0s 之間改變 IACC 條件下, 對於可聽程度沒有太大的影響。只有在 SN 較低的時候 (-10 dB 以下), IACC 的改變會影響可聽程度。上述結果雖然已考慮雙耳效應條件改變下之語音清晰性能影響, 但研究中 IACC 條件變化範圍僅於 0.5 ~ 1.0 之間。因此要瞭解人的雙耳效應在音場的空間中反應的重要性, 本研究目的則著眼於增加 IACC 的變化範圍 (0.3~1.0) 之間, 且同時探討雙耳互函數的遲延時間 (τ_{IACC}) 與空間語音清晰性能的關係, 而心理實驗方法以配對比較法來進行, 以求得單音節語音之聽取明瞭度與 IACC 之關聯性, 證明時間與空間要素對雙耳的聽覺效應之影響, 以建立客觀之音環境設計基礎。

三、文獻回顧

3-1 聲場之雙耳互函數級數 (the magnitude of interaural cross-correlation function, IACC) 技術應用相關理論研究

在室內聲學研究中, Ando (1983)³ 以雙耳互函數級數 (IACC) 來解釋人耳對聲場之空間印象, 在決定一個聲場主要擴散的聲源等級和水平方向性的感覺。由於聲音傳達路徑之特性在兩耳之個別脈衝響應為 $h_{ml}(t)$ 和 $h_{mr}(t)$, 它們可敘述及轉達人對聲場之主觀聲源定位 (sound localization) 以及空間的印象 (spatial impression), 並且二者為獨立的個體。例如它們在二度空間的平面中, 點音源在任何特定角度上均有一定關係如圖 1 所示。因此, 我們將此二者之關係以一特定之物理計量—雙耳互函數來詮釋聲源與到達人的雙耳之信號 $f_l(t)$ 和 $f_r(t)$ 間的關係, 定義如式 (1)

$$\Phi_{lr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f_l'(t) f_r'(t + \tau) dt \quad |\tau| \leq 1ms \quad \text{式 (1)}$$

$f_l'(t) = f_l(t) * S(t)$ 和 $f_r'(t + \tau_1) = f_{rl}(t) * S(t)$ 均指通過人耳之 A 加權 (A-weighting) 濾波器後的信號, 並對應於耳朵的聽感 $S(t)$ 。

規一化之雙耳互函數, 可由式 (1) 之單耳標準改為雙耳標準成為式 (2)

$$\phi_{lr}(\tau) = \frac{\Phi_{lr}(\tau)}{\sqrt{\Phi_{ll}(0)\Phi_{rr}(0)}} \quad \text{式 (2)}$$

$\Phi_{ll}(0)$ 和 $\Phi_{rr}(0)$ 為當遲延 τ 在原點時 ($\tau = 0$ 時的自函數等於左右兩耳上的平均聲強)

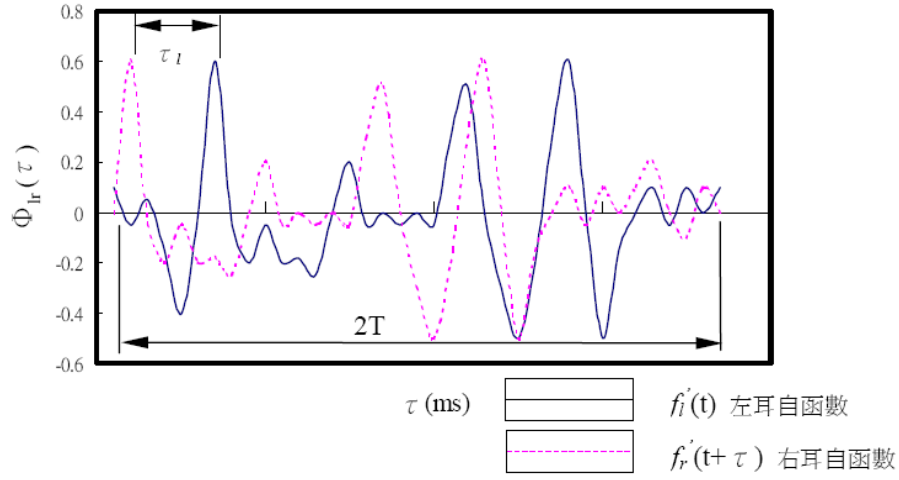


圖 1 時間遲延聲源信號自函數的物理意義關係圖

之單耳的自函數，到達雙耳之能量為式 (3)

$$\sqrt{\Phi_{ll}(0)\Phi_{rr}(0)} \quad \text{式 (3)}$$

然而在實際聲場中根據反射音次數及其強弱，規一化互函數將改寫為式 (4)：

$$\phi_{lr}^{(N)}(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^N An^2 \Phi_{lr}^{(n)}(\tau)}{\sqrt{\sum_{n=0}^N An^2 \Phi_{ll}^{(n)}(0) \sum_{n=0}^N An^2 \Phi_{rr}^{(n)}(0)}} \quad \text{式 (4)}$$

其中 $\Phi_{lr}^{(n)}(\tau)$ 為第 n 個反射在雙耳形成之互函數，因此；雙耳互函數級數定義為式 (5)，而兩耳間信號之最大延遲將限定於 $|\tau| \leq 1\text{ms}$ 。

再者，當點聲源在平面角 ξ (以正面 $\xi=0$ 為標準) 擴散時，若聲源信號為介在低截止頻率 f_l 和高截止頻率 f_2 之間頻寬的噪音時，其雙耳互函數與自函數改寫為式 (6)

$$\Phi_{lr}(\tau) = H_{lr} \left[\frac{2}{\Delta\omega(\tau - \tau_\xi)} \right] \sin \left[\frac{\Delta\omega(\tau - \tau_\xi)}{2} \right] \cos \left[\frac{\Delta\omega(\tau - \tau_\xi)}{2} \right] \quad \text{式 (6)}$$

$$\Phi_{rr}(0) = H_{rr}$$

$$\Phi_{ll}(0) = H_{ll}$$

其中 H 表各函數之功率 (power) 值， τ_ξ 指由於水平角 ξ 所造成左右之遲延，而濾波器之頻率角為 ω 表示如式 (7) 時

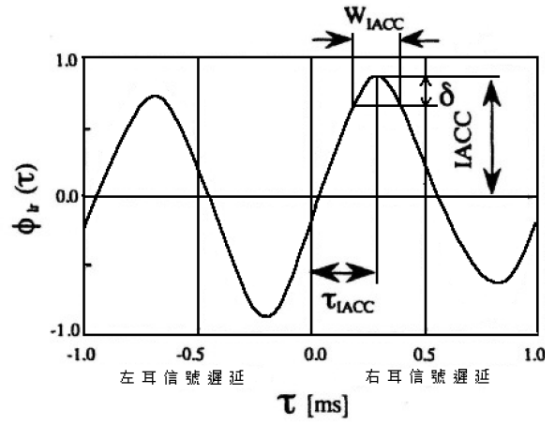


圖 2 雙耳相關函數及各參考因子之相關圖

$$\Delta\omega_c = 2\pi(f_2 + f_1) \quad (\tau_{IACC} = 0 \text{ 時}) \quad \text{式 (7)}$$

經由圖 2 說明雙耳相關函數及各參考因子之相關關係，而互函數之變異寬幅 (W_{IACC}) 在 $\frac{\Delta\omega_c}{2}$ 極小時為式(8)

$$W_{IACC} \approx \frac{\Delta\omega_c}{4} \cos^{-1} \left(1 - \frac{\delta}{IACC} \right) \quad \text{式 (8)}$$

其中 δ 為人耳可判定 IACC 改變之百分比，通常為 0.3 由式 (8) 可知極小之 W_{IACC} 可得到對聲源在水平角 ξ 之極大的方向感度，而當 $IACC < 0.15$ 時，主觀之擴散 (subjective diffuseness) 可被察覺。

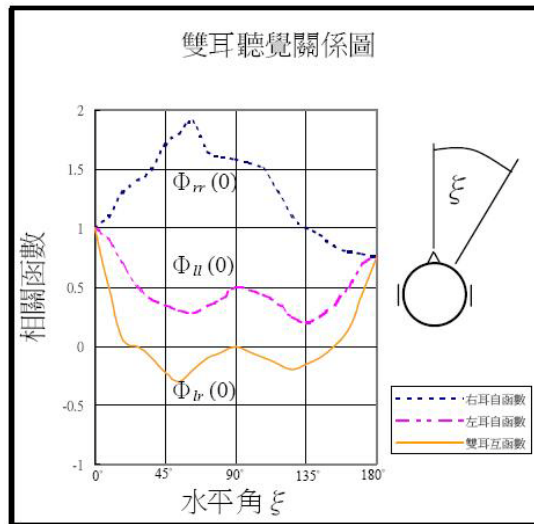


圖 3、雙耳聽覺關係圖。雙耳互函數和左右耳上的自函數與單個音樂信號到達方向 ξ 的關係 $\Phi_{ll}(0)$

和 $\Phi_{rr}(0)$ 分別相當於左耳和右耳上的聲能。

3-2 雙耳互函數與聲場模擬方式之相關文獻

Schroeder et al (1974)⁴留意到聽者是用兩個耳朵聽的，於是計畫用雙耳的測量來評定室內聲場的聲學品質，發現從主觀實驗雙耳互函數級數 ($IACC_t$; $t = 50-140ms$) 是一個聽覺測量和傾聽偏愛有很好的相互關係。Sato 和 Ando (1996)⁵之研究中他們提出雙耳互函數 ($IACC$) 與互函數變異寬幅 (W_{IACC}) 可決定聲源寬廣度 (ASW) 的說法，但由於實驗用音源乃 1/3 倍頻之噪音 (noise)，他們發現 1/3 倍頻程中若加大中心頻率 (125Hz - 2 kHz)，將使得聲源寬廣度 (ASW) 變小。更提出以雙耳互函數中在百分之十之互函數的極大值所輪廓出的時間長，互函數變異寬幅 (W_{IACC}) 可與聲源寬廣度 (ASW) 相呼應。因此；雙耳互函數 ($IACC$) 對於聲場之主觀擴散更增添其實用性。陳炯堯、張淳華 (2000)⁶以兩反射音的聲場以音樂樣本探討雙耳互函數 ($IACC$) 之主觀聽覺感受中，影響最大的是受制於 $IACC$ 與全反射音振幅的大小即迴響的大小有關。Ohnisi⁷ (2006) 在地下鐵車站內來研究聲音傳達性能，結果發現對於噪音的 1/3 倍頻的分析較低，顯示在擴散聲場的 $IACC$ 值隨著頻率也變得比較低；因此聲場的空間特性會受到 $IACC$ 了影響。

Ando (1983)⁸依據聲場物理量的分析得到時間與空間屬性，並提出聲場評價四個相互的獨立因子，第一反射遲延時間 (time delay gap between the direct sound and the first reflection, Δt_1) 及後續迴響時間 (subsequent reverberation time, RT) 此兩者屬於時間之屬性，聲壓級 (level of listening, LL) 及雙耳互函數級數 (magnitude of inter-aural cross-correlation function, $IACC$) 後兩者屬於空間之屬性。而 $IACC$ 更是作為音場空間的物理量指標之一，影響 $IACC$ 數值變動的主要因素為擴散的聲源等級和水平方向性的感覺。

3-3 語音清晰度與有關語音聽取影響之相關文獻回顧

語音清晰度 (speech intelligibility) 主要是評價語音聽取程度的指標，廣泛來說是指在以語音演出為主的音響環境中，聽者能夠清楚的聽清楚話者所說的每一個字音或句子，進而了解述說的內容。室內語音清晰度是聽覺對語言認知程度的量化指標，可藉單音節、單語及短句來進行心理實驗，而以正答率來量化分析是其方法之一。我們通常利用所謂“音表測試” (articulation test) 來進行。此技術發生在發明通訊器材 (如電話) 的年代。用來測試發話器與接收器之通訊品質。但目前，已廣泛被應用於與通訊相關器材之通訊明瞭性測試。

Licklider and Kryter (1944)⁸於貝爾電話實驗室與哈佛大學的心理音響實驗室分別進行了語音清晰度的客觀物理實驗與主觀物理實驗，並建立一套有效的單音節檢測音表 (mono-syllabic test lists)，稱為 Harvard P.B. 50 word score (Phonetically Balanced Word List, PB)。為了避免量測過程中有其它語音訊號的暗示性因子，進而影響語音清晰度的準確度，所以語音的檢測音表是由一系列無意義的單音節所組成。為了使測聽者能更準確的受測，每個音節的輔音 (consonant) 與元音 (vowel) 的聲音都必需為清楚響亮的。目前使用這種單音節檢測音表的心理實驗量測方法很多，如 Diaz and Velazquez (1995)⁹所製定的西班牙語單音節檢測音表與陳炯堯、林葳 (2001)¹⁰所

製定的「台灣地區華語單音節語音檢測表」。為計算測聽者能夠正確的記下所聽到的音節數佔發音者發出的全部音節數的百分比，其可作為語音清晰度的心理評價項目之一。

陳炯堯、林葳(2002)¹¹曾利用台灣地區發音之中華新韻韻母歸納出 108 個實驗語音樣本，並與各國語音明瞭性調查方法比較(圖 1)，製作成六組可用之中文單音節主觀語音明瞭度(articulation score)檢測表(簡稱語表)²。依據此六組語表，我們發現在室內聲場殘響時間低於 1.5 秒環境內之空間 ($<12000 \text{ m}^3$)，STI 之測量結果與主觀語音明瞭度檢測結果吻合，僅於少數空韻單音節之發音有較大的差異。因此，在廳堂內聆聽話語，有過多或過長之反射聲會減弱語音的清晰度。快速語音傳輸指標為目前評價聲場語音清晰度最常使用的客觀工具。但就不同單音節而言發現少數發音個體具獨特差異性(individual difference)。因此室內廳堂語音清晰度的研究中，所考慮的因素不僅包含空間的收聽特性，另一方面也需考慮單音節字音的發音特性。

Licklider (1948)¹²在噪音遮蔽下探討 IACC 對語音了解度(word difficulty)的影響發現；除語音之 SN 比之影響以外，IACC 之下降也相對地改善了語音的了解度。Sato (1996)以主觀感受為評價指標，以容易聽取的程度影響來探討，但發現這個指標有相對值，必須要聽取多少內容才能算是聽取的容易，這點確無法去評價。Sato (2004)在只有直達聲和迴響還有噪音的聲場，以聲音傳達性能來評價可聽程度之影響，提出最適合高齡者和年輕者的聲音等級。

Morimoto (2004)¹³提出可聽程度之影響，聽取的可聽程度是在測試音上使用高親密度的單字，使用規定的單字還不夠，必須從熟悉度高的單字開始。這個指標對於受測者提示的刺激難度是依據受測者中有百分之幾感到可聽程度。根據聽感實驗結果，可聽程度和單字了解度有很高的負相關。但像在公共空間語音傳輸指標比較高的聲場，可聽程度比單字了解度的感度較好，而且能夠嚴格的評價。Morimoto (2007)¹也曾以噪音跟日語討論聲場的迴響時間與 IACC 交替影響下，語音可聽程度的影響。發現訊噪比在 $-10 \text{ dB} \sim 10 \text{ dB}$ 的範圍與迴響時間在 $0.5 \text{ s} \sim 4.0 \text{ s}$ 之間改變 IACC 條件下，對於可聽程度沒有太大的影響。只有在 SN 較低的時候 (-10 dB 以下)，IACC 的改變會影響可聽程度。

3-4 有關語音清晰度與語音了解度之研究回顧

在調查工具單音節檢測音表本身的可靠性中，因中文單音節發音包含了”有義意”與”無義意”兩大類單音節語音，在國際上解決此問題之方式便是以短句來取代單音節語音來進行所謂語音了解度(word difficulty)實驗。但由於短句對於語言表達的完整性各不相同；以及清晰性能不同之單音節語音混合其中，此時要將其用於聲場語音清晰性能的調查時又感到無力。比方說短句可以被聽的很清楚，對於句中之意義又非每位受測者的了解能力盡同。因此，不論是單音節語音或是短句在提供了解度或聲場空間語音清晰性能的調查上是各具優缺點。站在工程觀點而言，對於聲場空間語音清晰性能的調查應該便於以儀器來測量其大小。然而對於測量工具的信賴與否又必須透過心理實驗驗證其正確性與真實性。

因此為了解決這種模糊不清之語言表達性，本研究著眼於語音明瞭性 (word intelligibility)，即可以聽清楚的程度，在主觀心理實驗上我們以配對比較法來進行心理實驗，其原因是避免中文單音節之“有義意”與“無義意”兩大類單音節語音發音不好定義的特性。

3-5 心理實驗理論基礎-配對比較法

Ando (1983)³對於聲場主觀評價優選而言，配對比較方法是一種很有效的方式，因為受測者能夠簡單地判別出他們對於兩個聲場中喜歡聽的哪一個。這種試驗為了避免一些不好定義的性質形容詞，例如清晰、明亮、溫暖、和諧、親切感及融合感等。這些形容詞，在聆賞後不能馬上保留有一致的體認。因此採用配對比較方法去表達受測者就 IACC 發生變化下雙耳聽覺上對於語音的明瞭性，將會簡化受測者的反應與解釋。再運用單一的客觀因素改變，來求取聲場中單一客觀物理量之最佳條件。

首先選取配對之研究對象，對象的個數 (以 k 表示)，可以得到配對的數目 (以 n 表示) $n=k(k-1)/2$ 。配對之方式為研究對象兩兩進行混合配對比較，選擇配對比較中感覺空間語音清晰性能較高的對象較高的心理數值，其數值設定為較高者給予整數 1，較低者給予整數 0 之二進位的統計過程，計算出所有受測者通過一貫性檢定 (有效問卷) 之配對勝率值 (P_{jk})，並篩選剔除 $P_{jk} < 0.05$ 與 $P_{jk} > 0.95$ 之數據，統計出不同之 IACC 對於單音節語音聽取明瞭度的尺度量化值 (scale values, SV)。

3-6 四大物理量理論與聲場模擬技術

在主觀量化過程均採 Thurstone (1927)¹⁴所提案之 Case V 模型。此量化方法均根植於一對一的比較模式，它可適用於任何正常聽力的非音樂從事者，經由此法 Ando 已歸納出聲場模擬的評估計算方式。提出以下聲場評價因子四個相互獨立的物理量。經由物理量可以描述到達雙耳聲信號的時間和空間因子有關，它們可以明確地歸納為以下全面性綜合的實現音樂廳最佳設計的評價標準。

1. 聲壓級(listening level, LL)

聲壓級為音樂廳中評價聲場的基本標準。優選聲壓級與音樂樣本所放送的一段音樂有關。對各種節奏和風格的音樂而言，優選聲壓級之峰值大約介於 79dB(A)。求得最佳之聲場聽取聲壓級：

$$\text{聽取聲壓級: } [LL]_p \approx 79 \rightarrow 80 \text{ dB(A)} \quad \text{式 (10)}$$

2. 早期反射遲延時間 (time gap between direct and the first reflection sound, Δt_1)

在其中一個含有單個反射的聲場的研究中，發現自相關函數、反射的幅度 A 和最佳時延 $[\Delta t_1]_p$ 之間存在近似關係。這種關係可近似地用下列等式表示：

$$\text{第一反射音遲延: } [\Delta t_1]_p \approx (1 - \log_{10} A) \tau_e (\text{ms}) \quad \text{式 (11)}$$

3. 迴響時間 (reverberation time, RT)

在關於最佳迴響時間的早期工作中，Kundsen¹⁵指出最佳迴響時間可以為語言信號增加清晰度。這

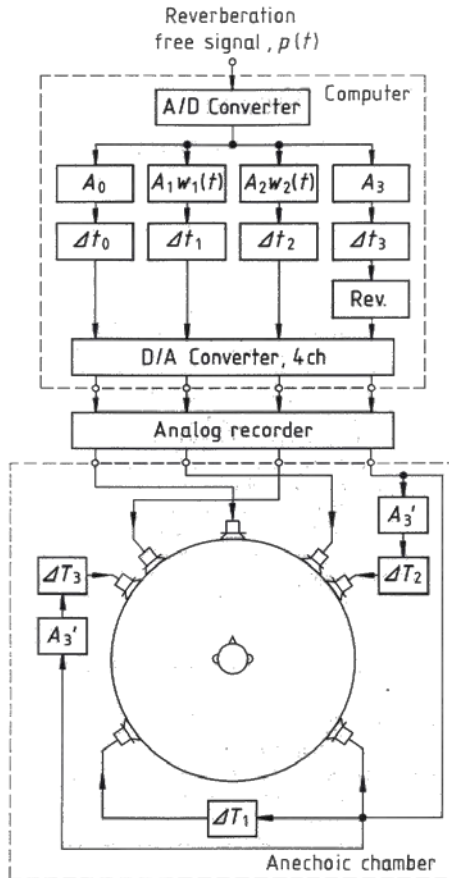
些結果或許可歸因於源信號的自相關函數的有效持續時間而最好地予以解釋。考慮到自相關函數的包絡主要取決於源信號的包絡這一事實，可以為無噪聲時的清晰度指數與語言信號和音樂信號的自相關函數有關。

$$\text{迴響時間： } [RT]_p \approx 23\tau_e(s) \quad \text{式 (12)}$$

4. 雙耳互函數 (the magnitude of the interaural cross-correlation, IACC)

依 Ando (1983)³之研究整理中，IACC 的大小和主觀優選之間存有負相關。由於需要較大的雙耳信號幅度差和合適的雙耳信號時間差，因此，對通常遇到的音樂來說，最佳的角度發現在中心為 55° 的範圍內。

$$\text{雙耳互函數： } [IACC]_p \approx 0 \quad \text{式 (13)}$$



由於主觀評價實驗技術上須要較大之物理動態空間來反應主觀評價，以取得客觀的統計結論。因此，透過電腦數位音響技術可於半無響室中完成所有物理參數之聲場模擬。如圖 4 所示，便是一個用於不同 IACC 值之模擬系統。此系統乃承襲 Damaske 與 Ando (1972)¹⁶ 在 IACC 理論被提出時的模擬設計。它可以提供聲場中直達聲及反射聲能的個別能量假設與時間遲延；並且還可利用 reverberator(迴響處理器)來增加所須之後續迴響聲能，而減少使用揚聲器之數量。

Chen 與 Ando(1996)¹⁷ 也曾利用此系統作為主觀評價實驗求取迴響在人的心理與腦波間的關連性研究工具，使用了三顆揚聲器分別模擬直達聲、初期反射與後續迴響聲能，而達到聲場模擬的目的。而在 Morimoto (2007)¹ 噪音與日語之雙耳互函數對於可聽程度影響之研究中，也使用此系統來模擬。由此可知，本研究在聲場模擬條件上，必須考慮聲場之後續迴響聲能之有無。

圖 4、Ando 用於主觀評價實驗中的模擬系統

四、實驗方法

4-1 客觀物理量測設定與配置

本研究將參考 Ando (1972)¹⁸ 用於主觀評價實驗中的模擬系統如圖 4。為了模擬不同的室內雙耳互函數級數 (IACC) 對於單音節語音聽取之影響，假設有一直接音於測聽者之正前方；第一、第二反射音假設分別於不同角度傳遞至測聽者；為了進一步探討與空間之迴響時間的關係，將後續迴響時間部份能量加在第一、第二反射音進行設定，模擬推導半無響室中之揚聲器之配置示意圖如圖 5 所示。

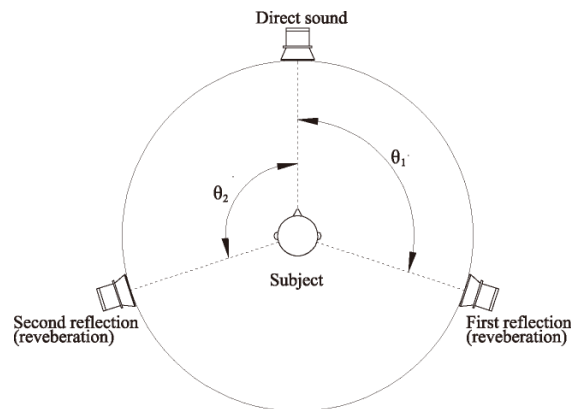


圖 5 聲場模擬示意圖

空間物理量測設定實驗配置之選樣，先以手算數理推導以雙耳互函數級數 (IACC) 之理論進行，在探討語音樣本時，雙耳互相關函數 $\Phi_{lr}(\tau)$ 、左自函數 $\Phi_{ll}(\tau)$ 、右自函數 $\Phi_{rr}(\tau)$ 採用 Ando (1985) 研究的語音樣本，以 IACC 式 (5) 理論進行，分析計算時運用 Excel 進行。然後為了量測各方位個別之揚聲器設定聲壓級(參考陳炯堯，張淳華(2000)⁶之設定值，以方便得到 IACC 之設定值範圍為 0.3~1.0)，在物理量測上選用白色噪音 (white noise) 為聲源，以假人頭來當收訊麥克風量測及紀錄(如圖 6)，由量測系統播放音訊傳送至另一台電腦，再輸入至電腦中應用軟體計算出 IACC，再與手算之數理推導計算之係數值做比較，定出 3 種 IACC 配置示意圖如圖 7 所示。

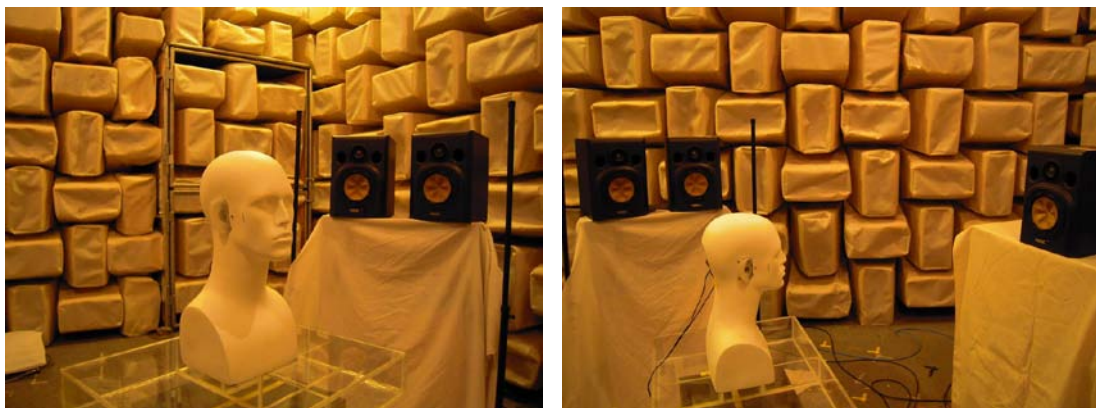


圖 6 以假人頭於半無響室物理量測現場圖

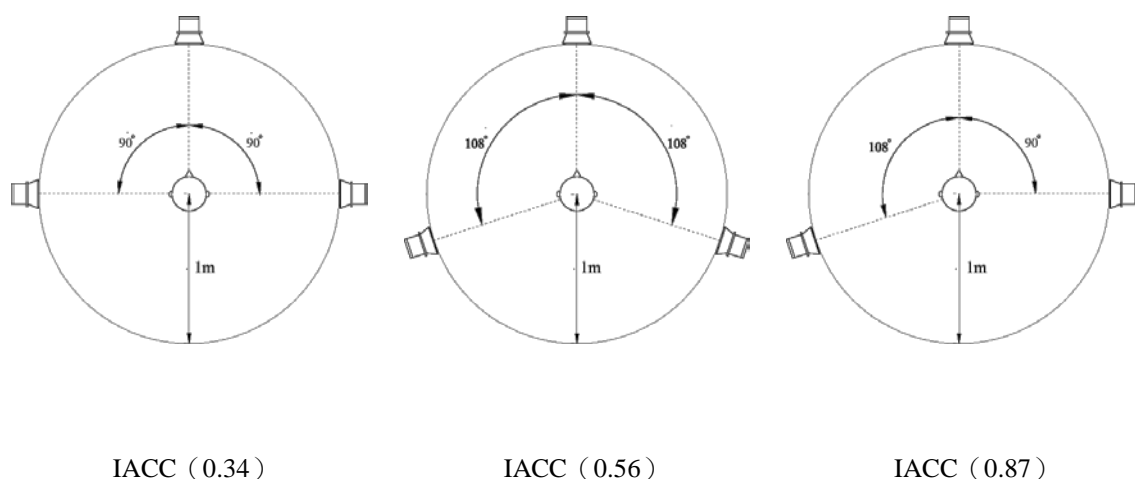


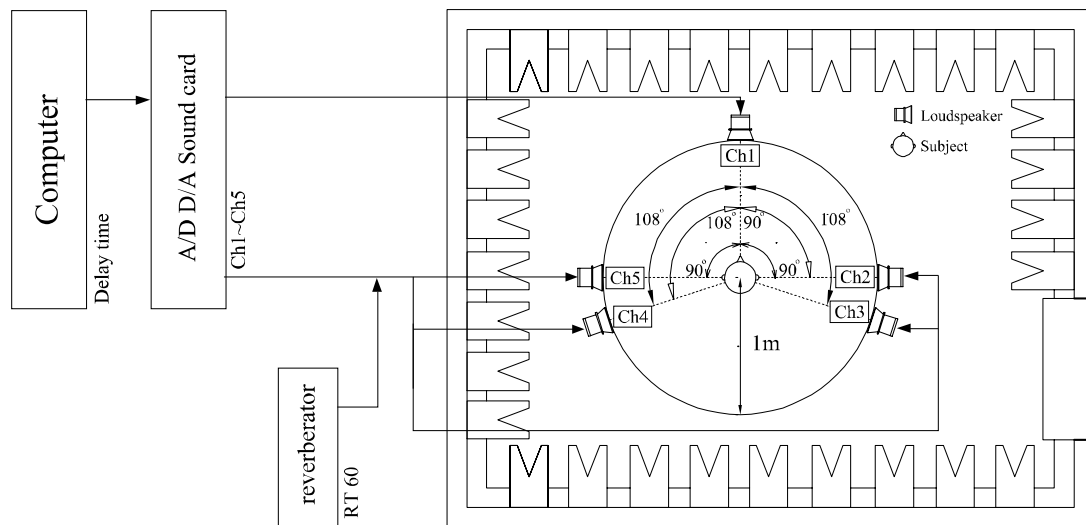
圖 7、三種 IACC 配置示意圖

4-2 主觀心理實驗設定與配置

根據空間物理量測設定下，3 種 IACC (0.34、0.56、0.87) 之模擬配置於半無響室為實驗環境進行，設定上共選 5 個相同揚聲器模擬空間中各個反射音方位，分別為包含直達音 0 度 (Ch1)，第一反射音 90 度 (Ch2)、108 度 (Ch3)、第二反射音 90 度 (Ch4)、108 度 (Ch5)，加入後續迴響時間 (RT=0.5s、2.0s) 模擬 (圖 8) 所示，所有揚聲器皆距離受測者 1 公尺 (高度 1.2 公尺)，總聲壓皆設定 65 dB(A)。表示提示條件一致，模擬相同空間中之聽感情形。初期反射音主要模擬室內空間兩側對稱的牆反射，遲延時間設定與聲場詳細條件設定見表 1。

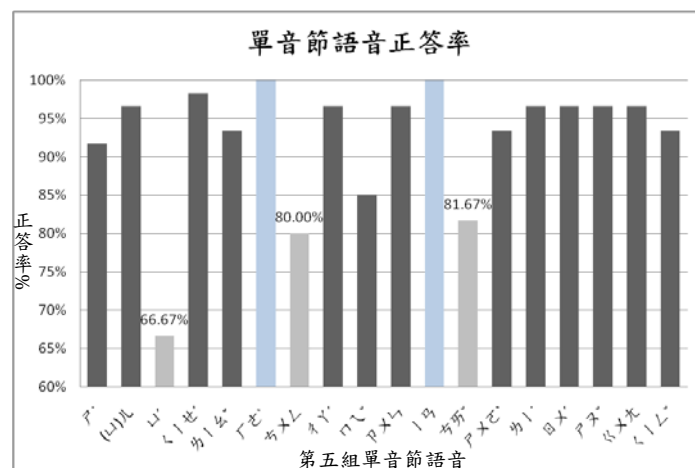
表 1、實驗聲場設定

名稱	實驗條件
揚聲器數量	五個
揚聲器方位	直達音 (Ch1, 0 deg. 系指正前方)，初期反射音 (Ch2, 90 deg、Ch3, 108 deg.)，第二反射音 (Ch4、90 deg.、Ch5, 108 deg.) 及加入後續迴響時間 (Ch2 90 deg.、Ch3, 108 deg.、Ch4, 90 deg.、Ch5, 108 deg.)
揚聲器距離	距離受測者 1 公尺 (高度 1.2 公尺)
總聲壓級 (LL)	固定在 65dB(A)
各個揚聲器聲壓設定與反射遲延時間	IACC(0.34)-直達音為 63.6 dB(A)，初期反射音為 62.7dB(A) delay (9.46ms)，第二反射音 62.7 dB(A) delay (17.04ms) IACC(0.56)-直達音為 62.8 dB(A)，初期反射音為 60.8dB(A) delay (10.84ms)，第二反射音 48.8 dB(A) delay (19.51ms) IACC(0.87)-直達音為 64.6 dB(A)，初期反射音為 53.4dB(A) delay (15.48ms)，第二反射音 53.4 dB(A) delay (27.87ms)
迴響時間 (RT)	0.0 s、0.5 s、2.0 s
雙耳互函數級數 (IACC) (measured)	0.34、0.56、0.87



4-3 聲源樣本之選取

選取此單音節語音是依陳炯堯、陳永祥(2010)¹⁹在空間語音清晰度與大腦皮質上連續腦波之研究，在探討中文語音單音節之主觀辨識度結果裡(圖 9)，ㄈㄊ、一ㄣ、ㄗㄨㄣ 的語音辨識之數值較高；ㄣ、ㄣ 辨識較低，選取 3 個正達率高與 1 個正達率低有差異性之語音來做比對。



4-4 受測者與實驗方式

受測者必須通過純音聽力測驗方可進行實驗，受測者平均年齡為 23±5 歲之朝陽科技大學學生 58 名。為了讓受測人員適應半無響室所附於之聽覺不舒適感，故於測試前，讓受測人員先行進入感受，感受同時，進行必要之解說與指導，以利於實驗進行。受測者於實驗進行階段，為了避免回答之時

間太長，要求受測人員就所感受之結果直接作答，無須思考語音樣本間之相互關係，進而避免其準確性。

進行心理實驗時，先將測聽者引入無響室預定受測位置，接受聽覺刺激實驗，固定受驗者之收聽聲壓級 (LL)，然後依據以假人頭量測出來之 IACC 值，來變換各選定在 IACC 之水平角的變化下之聲場型式，呈現給測聽者如圖 8 所示，並要求其進行問卷作答，進而求得選樣型式之水平角的聲場語音明瞭性(articulation test)之關聯性。另一方面，為了顧及實驗之準確性，受測者須集中精神就座於半無響室中之固定座位上，於實驗受測期間以布幕遮蔽揚聲器，半無響室保持燈光微亮，受測過程中頭部及眼睛面對正前方不得轉動，做完一組休息 15 分鐘，用意是避免連續受測造成對於語音樣本過於熟識，而破壞樣本配對間的比較獨立性 Thurstone (1927)¹⁴，進而避免其準確性。為比較室內雙耳互函數與單音節語音聽取能力之研響研究，並獲得主觀聽取明瞭度心理量化值。使用 Thurstone (1927)¹⁴ 的配對比較法；配對方式以中文單音節語音樣本隨機混合進行配對比較，配對比較實驗時，讓受測者選擇比較兩個樣本間感受空間語音清晰性能較高者來回答。單音節語音樣本提示時間均編輯為 10 秒鐘，每一組中兩個語音樣本時間間距為 2 秒鐘。而配對每組間回答間距為 10 秒鐘 (圖 10)。在全部樣本進行測聽實驗時，總共有 120 組判別組 (RT=0.0s、0.5s、2.0s)，單一迴響時間(15 組)之測聽完成時間約為 5 min(分)，而總測聽時間為 40 min。

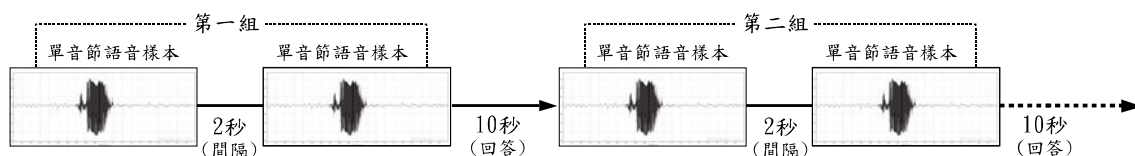


圖 10、配對比較之播音流程

4-5 實驗系統

測聽實驗均在朝陽科技大學的半無響室內完成，將編列完成後由數位化軟體及輸出系統連結半無響室內部之揚聲器完成(圖 8)。步驟是從電腦播放語音樣本經 A/D 轉換至電腦中的應用軟體進行多軌數位處理並調整反射音遲延時間；迴響時間則由專業音效控制器 (reverberator) 調整迴響時間 (0.0 s、0.5 s、2.0 s)；再透過音訊多軌分配介面 D/A 轉換輸出至半無響室中的各個揚聲器所組成的模擬系統，其中聽取聲壓與雙耳互函數均於半無響室中進行測試與調整。

五、實驗結果分析與討論

5-1 雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之影響

1. 配對比較法之主觀聽取明瞭度心理量化法統計檢定

實驗結果將依三種不同的 IACC (0.34、0.56、0.87) 與搭配三種不同的迴響時間 (RT=0.0 s、0.5 s、2.0 s) 分別對於四種單音節語音 (ㄈㄣ、ㄌㄣ、ㄣ、ㄨ) 所聆判語音聽取之明瞭性進行探討，如表 2 所示，統計檢定包括受測者的一貫性 (consistency)、一致性 (agreement) 及量化模式適合度 (goodness of fit)，一貫性是指受測者回答問卷的有效性，而一致性是指 58 位受測者回答的一致程度；這表示實驗設計與目的，即空間聲場之覺反應的一致性。最後量化模式適合度是指在 (Thurstone, 1927)¹⁴ 之心理量化尺度，各種統計假設的正當性。檢定結果為：單音節語音 ㄈㄣ、當迴響時間設定為 RT=0.0 s 時，在 64 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，回答的一貫性符合標準，表示首尾一貫性。在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $120.12 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $357.04 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；當迴響時間設定為 RT=0.5 s 時，在 64 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，回答的一貫性符合標準，表示首尾一貫性。在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $120.12 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $357.04 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；當迴響時間設定為 RT=2.0 s 時，其中 64 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格。在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $265.79 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $1142.52 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下。在表 3 所示單音節語音 ㄌㄣ、當迴響時間設定為 RT=0.0 s 時，其中 64 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $217.79 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $985.92 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；當迴響時間設定為 RT=0.5 s 時，其中 64 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $217.79 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $985.92 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；在迴響時間設定為 RT=2.0 s 時，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $369.92 > (16, 0.05) = 26.296$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $1174.10 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下，因此可斷定實驗與問卷設計具有信度跟效度。

在表 4 所示單音節語音 ㄣ、當迴響時間設定為 RT=0.0 s 時，其中 32 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $250.93 > (17, 0.05) = 27.587$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $603.97 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；當迴響時間設定為 RT=0.5 s 時，其中 32 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $250.93 > (17, 0.05) = 27.587$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $603.97 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；在迴響時間設定為 RT=2.0 s 時，在一致性檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $369.92 > (17, 0.05) = 27.587$ 。在適合度檢定方面 $X^2_{0.05} \geq X^2$ ， $260.00 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下，因此可斷定實驗與問卷設計具有信度跟效度。

表 2、單音節語音厂、配對比較實驗檢定之結果

檢定方式	RT=0.0 s	RT=0.5 s	RT=2.0 s
一貫性檢定	64 次的問卷 (d≤1) 37 次的問卷 (d>1)	64 次的問卷 (d≤1) 37 次的問卷 (d>1)	64 次的問卷 (d≤1) 36 次的問卷 (d>1)
一致性檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 120.12>26.296 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 120.12>26.296 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 265.79>26.296 (OK)
適合度檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 357.04>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 357.04>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 1142.52>18.307 (OK)

表 3、單音節語音口、配對比較實驗檢定之結果

檢定方式	RT=0.0 s	RT=0.5 s	RT=2.0 s
一貫性檢定	64 次的問卷 (d≤1) 52 次的問卷 (d>1)	64 次的問卷 (d≤1) 52 次的問卷 (d>1)	64 次的問卷 (d≤1) 42 次的問卷 (d>1)
一致性檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 217.79>26.296 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 217.79>26.296 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(16) 369.92>26.296 (OK)
適合度檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 985.92>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 985.92>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 1174.10>18.307 (OK)

表 4、單音節語音一、配對比較實驗檢定之結果

檢定方式	RT=0.0 s	RT=0.5 s	RT=2.0 s
一貫性檢定	32 次的問卷 (d≤1) 8 次的問卷 (d>1)	32 次的問卷 (d≤1) 8 次的問卷 (d>1)	32 次的問卷 (d≤1) 7 次的問卷 (d>1)
一致性檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 250.93>27.587 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 250.93>27.587 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 369.92>27.587 (OK)
適合度檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 603.97>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 603.97>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 260.00>18.307 (OK)

表 5、單音節語音ㄇ、配對比較實驗檢定之結果

檢定方式	RT=0.0 s	RT=0.5 s	RT=2.0 s
一貫性檢定	32 次的問卷 (d≤1) 5 次的問卷 (d>1)	32 次的問卷 (d≤1) 5 次的問卷 (d>1)	32 次的問卷 (d≤1) 6 次的問卷 (d>1)
一致性檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 264.53>27.587 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 264.53>27.587 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(17) 238.4>27.587 (OK)
適合度檢定	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 1284.95>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 1284.95>18.307 (OK)	$X^2_{\theta} \geq X^2_{0.05}$, f 自由度(10) 887.23>18.307 (OK)

在表 5 所示單音節語音ㄇ、當迴響時間設定為 RT=0.0 s 時，其中 32 次的問卷 (d≤1) 合格，在一致性檢定方面 $X^2_{\theta} \geq X^2$, 264.53>(17, 0.05)=27.587。在適合度檢定方面 $X^2_{\theta} \geq X^2$, 1284.95

$> (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；當迴響時間設定為 $RT=0.5$ s 時，其中 32 次的問卷 ($d \leq 1$) 合格，在一致性檢定方面 $X^2 \geq X^2_{.05}$ ， $264.53 > (17, 0.05) = 27.587$ 。在適合度檢定方面 $X^2 \geq X^2_{.05}$ ， $1284.95 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下；在迴響時間設定為 $RT=2.0$ s 時，在一致性檢定方面 $X^2 \geq X^2_{.05}$ ， $238.4 > (17, 0.05) = 27.587$ 。在適合度檢定方面 $X^2 \geq X^2_{.05}$ ， $887.23 > (10, 0.05) = 18.307$ ，檢測值之錯誤率在 0.05 之下，因此可斷定實驗與問卷設計具有信度跟效度。

2. 配對比較法之主觀聽取明瞭度心理量化法統計檢定

將受測者配對比較結果根據 Thurstone (1927)¹⁴量化的尺度值，即為雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度心理量化值。單音節語音 (ㄉㄛ、ㄌㄛ、ㄣ、ㄆㄛ) 就 IACC (0.34、0.56、0.87) 變化下之與有無加入續迴響時間之主觀聽取能力心理量化實驗結果 (如圖 11、12、13、14)，當無加入迴響時間之主觀聽取明瞭度心理量化折線趨勢可以看出明顯高於有加入迴響時間，這表示

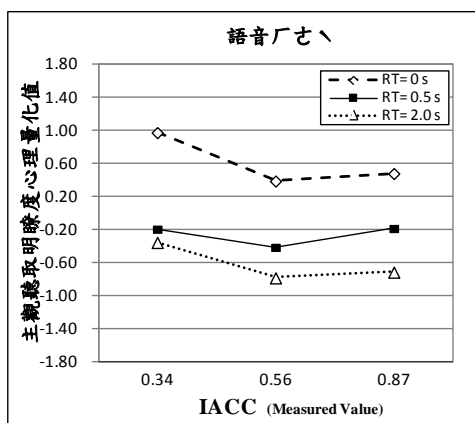


圖 11、語音ㄉㄛ聆判結果

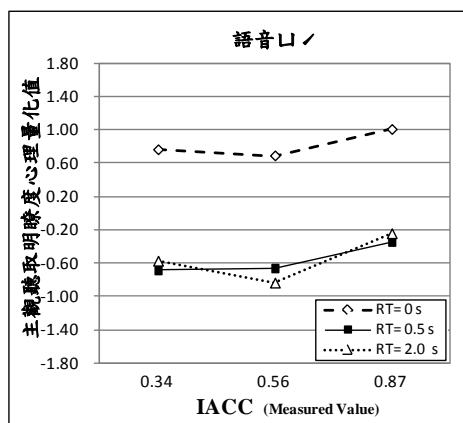


圖 12、語音ㄌㄛ聆判結果

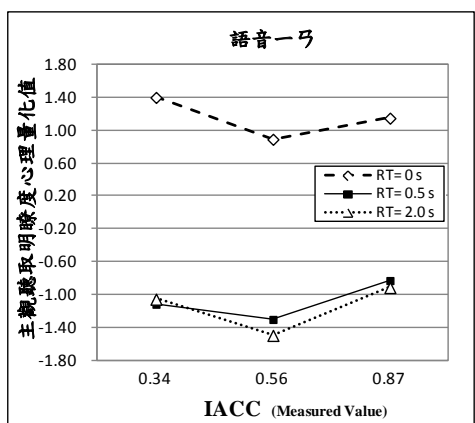


圖 13、語音ㄣ聆判結果

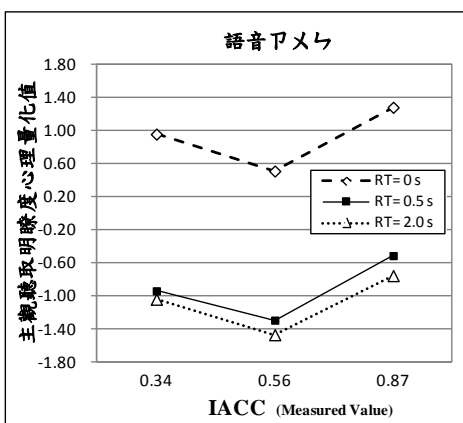


圖 14、語音ㄆㄛ聆判結果

有無迴響因子對於單音節語音聽取明瞭度是有很大的影響性；而不同 IACC 變化下受測者對於單音節語音聽取明瞭度影響的主觀感知大小也有所不同，主觀聽取明瞭度心理量化之折線趨勢四種語音呈現各自一定的趨勢，實驗藉由配對比較法各項檢定方式：單一受測者的一貫性檢定、所有受測者

的一致性檢定和 CASE V 模式適合度檢定。Thurstone Case V 尺度構成法 (Thurstone, 1927)¹⁴ 基本條件則是假設各比較對間相互保持獨立，並假設每一刺激之心理反應為常態分布，令這種分布為一種標準常態分布，最後 CASE V 模式適合度檢定後的尺度值，是可以證實受測者在進行配對比較後的正確率是正確。

5-2 變異數分析單音節語音之明瞭度與雙耳互函數的影響探討

1. 各因子對於主觀聽取明瞭度心理量化值之影響

將實驗條件中雙耳互函數 (IACC) 與迴響時間 (RT) 對於單音節語音聽取之明瞭度的聆判結果經由變異數分析統計結果得知，兩個因子的交互作用對於單音節語音主觀聽取心理量化值的影響不顯著 (two-way ANOVA, $DF=4$, $F=0.25$, $p=0.903$)，即 IACC 與 RT 兩個因子相互獨立。若進一步轉換以圖示來探討兩個因子的交互作用 (圖 15)，三條折線趨勢圖之分佈在 $RT=0.0$ s 時，差異性最大，在 $RT=0.5$ s 時次之，在 $RT=2.0$ s 時為最差；而在不同之 IACC 變化下 (0.34、0.56、0.87)，這三條折線趨勢圖之分佈，整體來說趨勢是一致的，沒有太大的變化性，唯有在 IACC (0.56) 可以看出聽取明瞭度有較低之趨勢。經變異數分析統計結果也證明了與 Ando (1983) 依據聲場物理量分析得到時間與空間之屬性，第一反射遲延時間、後續迴響時間、聲壓級及雙耳互函數級數之四大因子相互獨立的理論是相符的。

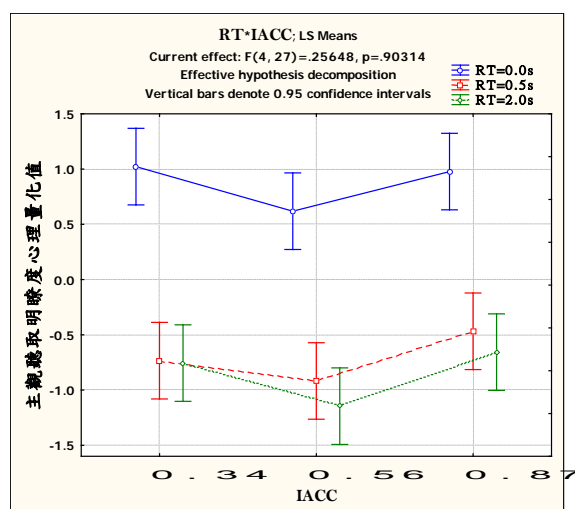


圖 15、雙耳互函數與迴響時間交互作用下之效果圖

2. 從迴響時間對於單音節語音聽取明瞭度交互作用的影響探討

從交互作用下整體 RT 之效果圖來看，本研究三個聲場配置 ($RT=0.0$ s、 0.5 s、 2.0 s) 經由變異數分析統計結果得知，單音節語音之聽取明瞭度會隨著迴響時間的大小而呈現顯著差異結果 (two-way ANOVA, $DF=2$, $F=96.38$, $p<0.001$)。從圖 16 可以明顯看到在 $RT=0.0$ s 到 $RT=0.5$ s 之間有明顯的落差，而在 $RT=0.5$ s 以上到 $RT=2.0$ s 之間雖有差異性，但是變化差異性不大。由於

兩個因子的交互作用下，可知 RT 之因子有顯著性的差異，為了更正確地判斷迴響時間 RT (0.0 s、0.5 s、2.0 s) 對於單音節語音主觀聽取明瞭度感受最有顯著性的效果，進一步做多重平均數比較檢定。

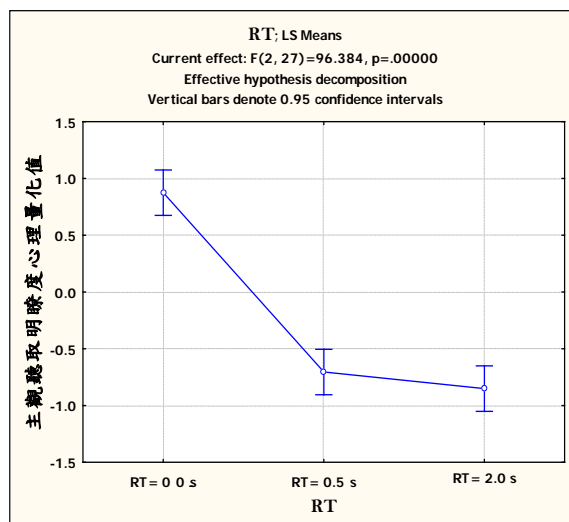


圖 16、迴響時間對於單音節語音聽取明瞭度聆判結果

表 6、RT 之多重平均數比較檢定 Fisher LSD 法

LSD test; variable; Probabilities for Post Hoc Tests. Error: Between MS = .11403, df = 27.00			
RT	{1} 0.872	{2} -0.706	{3} -0.853
0.0 s		0.000*	0.000*
0.5 s	0.000*		0.297
2.0 s	0.000*	0.297	

(* : $p < 0.05$)

根據由 (表 6) 多重平均數比較檢定 Fisher LSD 法之矩陣表中的 p 值可知，在 RT=0.0 s 與 RT=0.5 s 之主觀聽取明瞭度間有顯著性 ($p = 0.000^* < 0.001$)，在 RT=0.5 s 與 RT=2.0 s 之主觀聽取明瞭度間沒有顯著性 ($p = 0.297 > 0.05$)，在 RT=0.0 s 與 RT=2.0 s 之主觀聽取明瞭度間有顯著性 ($p = 0.000^* < 0.001$)。即 RT=0.0 s 之顯著性高於 RT=0.5 s 與 RT=2.0 s，RT=0.5 s 與 RT=2.0 並無顯著性差異。因此，經多重平均數比較檢定可以得知，迴響時間之長短會影響雙耳互函數對於單音節語音聽取能力，而在迴響時間 0.5 s 以下影響會有較大之差異性；在 0.5 s 以上到 2.0 s 沒有差異性之影響性。此結果與 Morimoto (2007) 日語討論聲場的迴響時間與雙耳互函數級數交替影響下，迴響時間在 0.5s ~ 4.0s 之間改變 IACC 條件下，對於語音可聽程度沒有太大的影響之論點相符。

3. 從雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度交互作用的影響探討

從交互作用下整體 IACC 之效果圖來看（圖 17），研究三種 IACC 聲場配置（0.34、0.56、0.87）經由變異數分析統計結果得知，單音節語音之聽取明瞭度會隨著不同 IACC 之變化而呈現顯著差異結果（two-way ANOVA，DF=2，F=5.3428， $p<0.05$ ）。

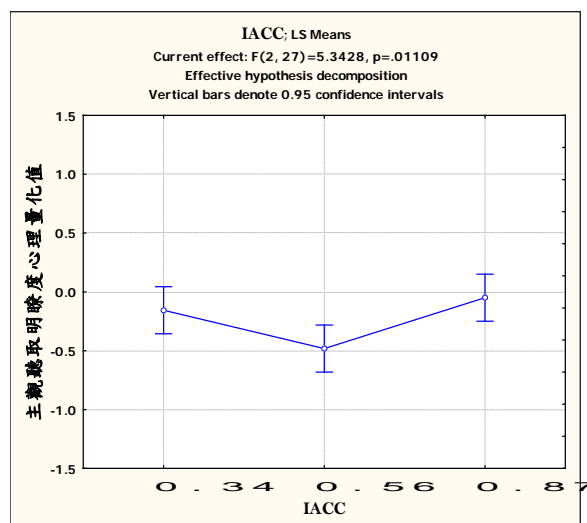


圖 17、雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度聆判結果

表 7、IACC 之多重平均數比較檢定 Fisher LSD 法

LSD test; variable : Probabilities for Post Hoc Tests. Error: Between MS = .11403, df = 27.00			
IACC	{1} -0.155	{2} -0.481	{3} -0.049
0.34		0.025*	0.445
0.56	0.025*		0.004*
0.87	0.445	0.004*	

(*: $p<0.05$)

根據由（表 7）多重平均數比較檢定 Fisher LSD 法之矩陣表中的 p 值可知，在 IACC(0.34)與 IACC(0.56)之主觀聽取明瞭度間有顯著差異 ($p=0.025<0.05$)，在 IACC(0.56)與 IACC(0.87)之主觀聽取明瞭度間亦有顯著差異 ($p=0.004<0.05$)，在 IACC(0.34)與 IACC(0.87)之主觀聽取明瞭度間則無顯著差異 ($p=0.445>0.05$)。即 IACC(0.56)之顯著性高於 IACC(0.34)與 IACC(0.87)，IACC(0.34)與 IACC(0.87)間並無顯著性差異。因此，經多重平均數比較檢定可以得知，雙耳互函數之變化會影響單音節語音聽取明瞭度，在 IACC(0.56)有較大之差異性；而在 IACC(0.34)與 IACC(0.87)間沒有差異性之影響性。

5-3 探討雙耳互函數之物理參量特徵與空間語音清晰性能的關係

為了更深入探討雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之關聯性，在實際量測系統(圖 6)空間物理

量測設定下，3 種 IACC (0.34、0.56、0.87) 之模擬配置，利用一比一假人頭 (dummy head) 雙麥克風接受系統的音訊透過 A/D 轉換器傳送到電腦，利用電腦計算出雙耳互函數規一化互函數與另外兩個物理參量(表 8)，分別是互函數變異寬幅 (the width of the inter-aural cross-correlation function, W_{IACC})、雙耳互函數遲延(delay of inter-aural cross-correlation function, τ_{IACC})，將主觀心理實驗結果與各聲場所量測的雙耳互函數物理量進行分析。Sato 和 Ando (1996)⁵ 研究中他們提出雙耳互函數 (IACC) 與互函數變異寬幅 (W_{IACC}) 可決定聲源寬廣度 (ASW) 的說法，從表 8 來看， W_{IACC} 之物理量測數據上來看沒有太大的變化性。另外從 τ_{IACC} 圖 18、圖 19、圖 20、圖 21 來看， τ_{IACC} 物理量與雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之對應下，四個單音節語音 (厂ㄣ、ㄣ、ㄣ、一ㄣ、ㄣ、ㄣ) 主觀聽取明瞭度之三條折線趨勢似乎看不出有相關的趨勢。經由結果檢討 τ_{IACC} 與 W_{IACC} 得知，雙耳互函數規一化互函數與另外兩個物理量對於聽取明瞭度之對應下沒有關聯性影響。

表 8、IACC 之物理參量

IACC	0.34	0.56	0.87
τ_{IACC}	0.22	0.06	0.09
W_{IACC}	0.19	0.18	0.18

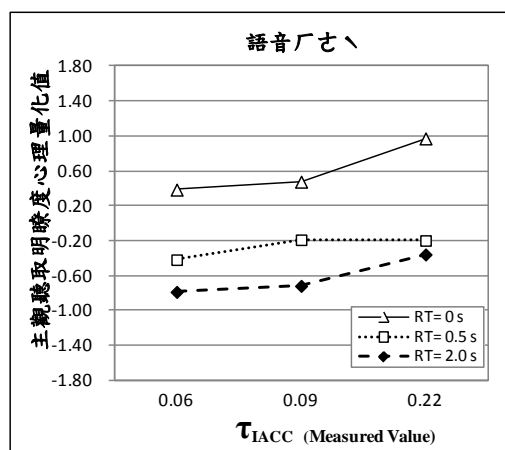


圖 18、語音(厂ㄣ) τ_{IACC} 物理量與主聽觀聽取明瞭度心理量對應圖

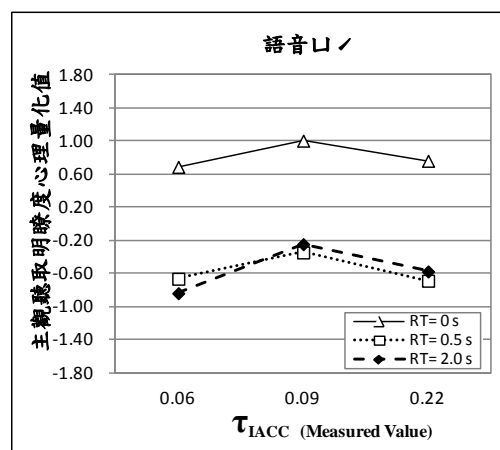


圖 19、語音(ㄣ) τ_{IACC} 物理量與主聽觀聽取明瞭度心理量對應圖

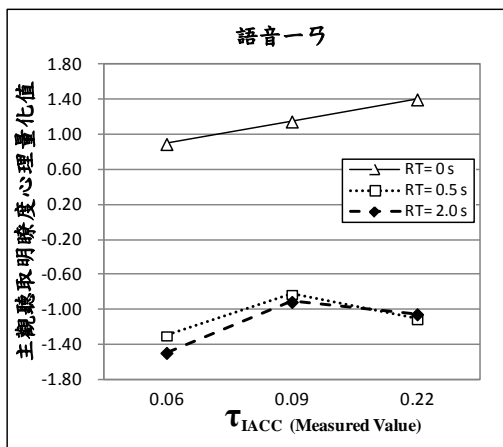


圖 20、語音(一弓) τ_{IACC} 物理量與主聽觀聽取明瞭度心理量對應圖

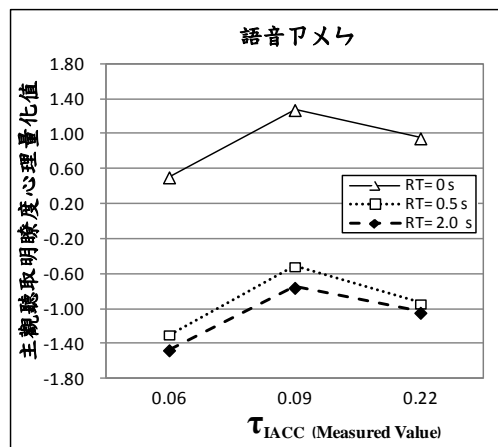


圖 21、語音(ㄇㄨㄣ) τ_{IACC} 物理量與主聽觀聽取明瞭度心理量對應圖

六、結論

6-1 配對比較法聆判雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之影響

配對比較法聆判實驗中，主要依據 Thurstone Case V¹⁴ 獲得語音之主觀聽取明瞭度心理量化值，經實驗結果，有無迴響時間之因子對於單音節語音聽取明瞭度是有影響性；而不同 IACC 變化下受測者對於單音節語音聽取明瞭度影響的主觀感知大小也有所不同，主觀聽取明瞭度心理量化之折線趨勢四種語音呈現各自一定的趨勢。

6-2 變異數分析單音節語音之明瞭度與雙耳互函數的影響探討

- 交互作用下雙耳互函數 (IACC) 與迴響時間 (RT) 對於單音節語音聽取明瞭度心理量化值之聆判結果，經由變異數 (two-way ANOVA) 分析統計結果得知，兩個因子的交互作用對於單音節語音主觀聽取心理量化值的影響不顯著 ($p=0.903$)，即 IACC 與 RT 兩個因子相互獨立。此結果與 Ando (1983)³ 依據聲場物理量分析得到時間與空間之屬性，第一反射遲延時間、後續迴響時間、聲壓級及雙耳互函數級數之四大因子相互獨立的理論是相符的。
- 從迴響時間對於單音節語音聽取明瞭度交互作用經由變異數分析統計結果可得知，雙耳互函數對於單音節語音之聽取明瞭度會隨著迴響時間長短變化有顯著差異結果 ($p<0.001$)。進一步經多重平均數統計比較檢定可以得知，在迴響時間 0.5 s 以下影響會有較大之差異性 ($p<0.001$)；在 0.5 s 以上到 2.0 s 沒有差異性之影響性 ($p>0.05$)。此結果與 Morimoto (2007)¹ 日語討論聲場的迴響時間與雙耳互函數級數交替影響下，迴響時間在 0.5s ~ 4.0s 之間改變 IACC 條件下，對於語音可聽程度沒有太大的影響之論點相符。
- 從雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度交互作用經由變異數分析統計結果可得知，單音節語音之聽取明瞭度會隨著不同 IACC 之變化而呈現顯著差異結果 ($p<0.05$)。進一步經多重平均數統計比較檢定可以得知，在 IACC(0.56) 有較大之差異性 ($p<0.05$)；而在 IACC(0.34) 與 IACC(0.87) 間沒有差異性之影響性 ($p>0.05$)。

6-3 探討雙耳互函數之物理參量特徵與空間語音清晰性能之關聯性

將實驗結果(主觀聽取明瞭度心理量化值)與各聲場所量測的雙耳互函數物理參量特徵進行分析,經由結果檢討 τ_{IACC} 、 W_{IACC} 雙耳互函數對於單音節語音聽取明瞭度之對應下沒有關聯性影響。

七、參考文獻

1. 高岡知康等, 2007, “音声と暗騒音の兩耳間相關度が聞き取りにくさに及ぼす影響”, 日本音響學學誌, 第 63 卷第 9 號, p520-528。
2. Steeneken H. J. M. and Houtgast T. (1973) “The Modulation Transfer Function in Room Coustics as A Predictor of Speech Intelligibility,” *Acoustica* 28, p66-73.
3. Ando Y. (1983) “Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall [J].” *J Acoust Soc Am*, 74: p873-887.
4. Schroeder. M. R., Gottlob. D., and Siebrasse. K .F. (1974) “Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters,” *J. Acoust. Soc. Am*, 56: p1195-1201.
5. Sato S., Mori Y., and Ando Y. (1996) *J. Acoust. Soc. Am.* 100(A), p2592.
6. 陳炯堯、張淳華, 2000, “雙耳互函數與聲源方向感度之探討—以兩反射音模擬聲場為例” 朝陽設計學報, 1, p101-114。
7. Ohnisi Y., Maeda K., Morimoto M. and Sato H.(2006) “Acoustic characteristics of background noise at subway stations ,” *Proc. WESPAC IX*
8. Licklider, J. C. R., and Kryter, K. D.(1944) “Articulation tests of standard and modified interphones conducted during flight at 5000 and 35,000 feet (OSRD Report 1976)” , Cambridge, MA: Harvard University, Psycho-Acoustic Laboratory.
9. Diaz, C., & Velazquez, C. (1995) “A Live Evaluation of the RASTI -Method” , *Applied Acoustics*, No.46, pp.363-372.
10. 陳炯堯、林葳, 2001, “聲場語音清晰度評價測定法之研究-以台灣地區華語為例,” 中華民國建築學會第十三屆年度大會學術研討會, p42.
11. 陳炯堯、林葳, (2002) “台灣地區華語之聲場語音清晰度評價測定法研究”, 中華民國建築學報, 43, p27-36.
12. Licklider J.C.R. (1948) “The influence of inter-aural phase relations upon the masking of speech by white noise,” *J. Acoust. Soc. Am.* 20, p150-159.
13. M.Morimoto, H. Sato and M. Kobayashi (2004), “Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 1607-1613.
14. Thurstone L. L. (1927) “A Law of Comparative Judgment”, *Psychol. Rev.*, 34, p273-289.

15. Knudsen V. O. (1929). "The hearing of speech in auditoriums," *J. Acoust. Soc. Am.* 1, 56–82. doi: 10.1121/1.1901470.
16. Damaske P. and Ando Y. (1972) "Interaural crosscorrelation for multichannel loudspeaker reproduction," *Acoustica*, 27, p232-238.
17. Chen C.Y. and Ando Y. (1996) "On the relationship between the autocorrelation function of the α -waves on the left and right hemispheres and subjective preference for the reverberation time of music sound field," *J. Archi. Plann. Environ. Engng.*, 489, p73-80.
18. Y. Ando, S. Shidara Z. Maekawa and K. Kido (1973) "Some basic studies on the acoustic design of room by computer," *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 29, p151-159.
19. 陳炯堯、陳永祥，2010，「空間語音清晰度與大腦皮質上連續腦波之關聯性」，碩士論文，朝陽科技大學建築及都市設計研究所，台中。

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席國際學術會議報告

100 年 7 月 25 日

附件三

報告人姓名	陳炯堯	系所/職稱	建築系/副教授
時間 會議 地點	民國 100 年 7 月 20 日 時起 民國 100 年 7 月 22 日 時止，合 計 3 天 英國雪菲爾大學	本會核定 補助編號	NSC 99-2221-E-324-031
會議 名稱	(中文) 第五次國際時間設計學會(ISTD5)學術研討會 (英文) 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEMPORAL DESIGN		
發表 論文 題目	(中文) 在引擎消音屋中的時間噪音特性 (英文) Noise Characteristics of Several Full Scale Turbojet Engines at Hush-House		

報告內容應包括下列各項：

一、參加會議經過

100 年 7 月 20 日 18:00 於 Sheffield University 的 ICOS Building 舉行大會開幕儀式。

100 年 7 月 21 08:30 至 100 年 7 月 22 日 16:30 於 ICOS Building 進行各階段發表與討論。

本大會之舉行方式是將個別領域分開至兩個討論室來進行，而開幕及閉幕式則是集中於同一空間(Conference room)進行發表與討論。另增開 Board room 來同時進行。本研討會篇數總共是 38 篇，雖然不多但是在質的提升方面是比前屆升級了不少。參與人士來自 11 個國家及 5 大洲學者。會後並推選優秀學生發表作品獎作為 ENDING。在下於本次研討會並擔任研討會之 Scientific Committee 委員，代表討論整體會議今後進程及學生優秀發表作品獎之推選等。並代表決定下一屆於 2013 年 11 月份將於台中來舉行，代表學校爭取國外國際會議舉辦地主國。

Scientific Committee 委員包括：

Prof. Jian Kang, University of Sheffield, UK, j.kang@sheffield.ac.uk

Professor Yoichi Ando (Kobe University) andoy@cameo.plala.or.jp

Dr. Yuliya Smyrnova, y.smyrnova@sheffield.ac.uk

Yiying Hao, arp10yh@sheffield.ac.uk

Prof. Chiung Yao Chen, Chaoyang University of Technology, Taiwan, chyuchen@cyut.edu.tw

Prof. em. Alessandro Cocchi, University of Bologna, Italy, alessandro.cocchi@unibo.it

Prof. Trevor Cox, University of Salford, UK, T.J.Cox@salford.ac.uk
Dr. George Dodd, University of Auckland, New Zealand,
g.dodd@auckland.ac.nz
Peter Rogers, Cole Jarman, UK, peter.rogers@colejarman.com
Prof. Jan-Yeul Sohn, Hanyang University, Korea, jysohn@hanyang.ac.kr
Prof. Shuoxian Wu, South China University of Technology, China,
arshxwu@scut.edu.cn
Prof. Takashi Yano, Kumamoto University, Japan, yano@gpo.kumamoto-u.ac.jp

[Scientific Topics, including]領域包括:

Architecture acoustics

Building acoustics

Environmental acoustics

Music and musical spaces

Soundscape

Sound quality

Auditory system

Noise and vibration measurement and evaluation

Environmental psychology and physiology

Building environmental design including visual, heat, and indoor air environments

Architectural theory/practice for temporal design

Futurology/Philosophy of architecture

二、與會心得

本次與會人士熱烈討論相關課題，並能增進彼此之視野。並重視對年輕學子的提攜，本會後將整理發表內容作者另外提出全文發表為期刊論文。是個很好的作法。

三、考察參觀活動(無是項活動者省略)

四、建議

在下將承接此學會下次年會之舉辦負責人，因此心情甚為緊張，是否能夠在兩年後順利承辦，便要看學會、學校與同事間的大力支持。

五、攜回資料名稱及內容

1. 大會 PROCEEDING 之 CD 光碟
2. 大會議程表

六、其他

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/31

國科會補助計畫	計畫名稱：室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究		
	計畫主持人：陳炯堯		
	計畫編號：99-2221-E-324-031-		學門領域：建築都市
研發成果名稱	(中文) 室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究		
	(英文) Study of the effects of inter-aural cross-correlation on speech articulation of monosyllable in an indoor sound field		
成果歸屬機構	朝陽科技大學	發明人 (創作人)	陳炯堯, 林威宇
技術說明	(中文) 雙耳互函數是目前聲場設計中非常重要的物理參數，與公共安全有極大關聯之空間語音清晰度是否有關？是聲場設計者關心的議題。就聲學家安藤四一教授發表的四個聲學物理參數中，雙耳互函數只與聲場主觀擴散有關，與語音清晰度之關聯所知甚少，因此本研究成果可以在影響空間語音清晰度的因子上增加雙耳特性與殘響時間特性影響的分別比重。並且，給予音樂廳設計者在雙耳互函數與空間語音清晰度之間的關係有更進一步的認識。		
	(英文) Interaural cross correlation (IACC) in sound field is a very important physical factor for concert design. How to influence the safe warranty in public area by PA system for the sound field designer? This is always a question for our discussion. Professor Ando proposed that there are four physical factors have been concerned for the profits of concert hall. He suggests that the subjective diffuseness is decided independently by IACC. There is few relationship between IACC and the speech intelligibility. Therefore, the results of this study will provide the quantities of influences between IACC and reverberation time (RT) for the speech intelligibility. To give an approach for PA system designer keeping attentions on the IACC factor as they emphasize the speech intelligibility as concerned.		
產業別	顧問服務業；其他工程業		
技術/產品應用範圍	音樂廳規劃，公共工程安全衛生設備		
技術移轉可行性及預期效益	提供未來標準局訂定公共工程安全衛生標準時之依據		

註：本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：陳炯堯			計畫編號：99-2221-E-324-031-				
計畫名稱：室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	50	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
		技術移轉	件數	0	0	100%	件
	權利金		0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	4	4	50%	人次	陳炳言，林威宇，林棋文，劉俊佑
		博士生	1	1	50%		洪國峰
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)	<p>本計畫對於本實驗室所執行之建教合作案有莫大幫助，最近完成規劃之聲場如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 苗北藝文中心新建統包案室內音響品質計劃(2009/3) 2. 嘉義縣議會議事廳迴音音效改善暨內部整修工程音響模擬及測試委託計畫(2011/1) 3. 國立台南歷史博物館展示裝修工程-1F 圓形劇場工程聲場電腦模擬服務(2011/2) 4. 國立臺灣藝術大學演藝廳整修工程」統包案競圖用音響模擬 計畫(2011/5)
--	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與（閱聽）人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒達成目標

☐未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐實驗失敗

☐因故實驗中斷

☐其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☒已發表 ☐未發表之文稿 ☐撰寫中 ☐無

專利：☐已獲得 ☐申請中 ☒無

技轉：☐已技轉 ☐洽談中 ☒無

其他：（以 100 字為限）

本研究已經發表：

室內雙耳互函數對於單音節語音聽取能力之影響研究 - 2011 中華民國建築學會第二十二屆第一次年度大會學術研討會，建築物理與環控。

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

在美國國家標準(ANSI3.5)規定下，凡是人群集中的空間須考慮到火警緊急廣播的重要性；如車站、醫院、劇院、電影院等，須透過 ANSI3.5 中室內語音清晰度(speech transmission index, STI)的相關規定來制定該空間所需的 STI 標準。然而 STI 為依據西方語法來研究提出的計算標準。是否能夠完全為台灣標準中文發音來使用，令人質疑。我們 1-2 曾利用台灣地區發音之中華新韻韻母歸納出 108 個實驗語音樣本，並與各國語音明瞭性調查方法比較，製作成六組可用之中文單音節主觀語音明瞭度(articulation score)檢測表(簡稱語表)²。依據此六組語表，我們發現在室內聲場殘響時間低於 1.5 秒環境內之空間 (<12000 m³)，STI 之測量結果與主觀語音明瞭度檢測結果吻合，僅於少數空韻單音節之發音有較大的差異。換言之，空韻與非空韻語音之基本發音特性不同³⁻⁶，也影響了空間語音清晰度(STI)之量測結果；因此我們進一步比較了各單音節語音在原音樣本(dry source, DS)與空間餘響樣本(reverberant source, RS)之間的異同，利用 Ando⁷ 建議之聲訊號處理技術記錄於真實空間的 84 個測點的 RS，並計算樣本的自函數之有效遲延時間(effective duration of autocorrelation function, 閃 e)作為分析工具。結果發現相同之語表語音置於不同空間內(即不同之 RS)，閃 e 值之長短與同語表語音組在相同空間得到之主觀語音清晰度成正比。說明了自函數對於不論是空韻與非空韻語音，其偵測語音清晰度之有效性是相同的。

此外，在針對空間中的雙耳效應(binaural effects)對於語音清晰性能的影響研究中⁸，我們以便利且實際測試方式就台中屯區藝文中心演藝廳之 1/20 縮尺模型來改變觀眾席上方反射板之幾何特性以探討雙耳互函數級數(IACC)與快速語音清晰指標(Rapid-STI, RASTI)之關聯性得知；當反射板角度改變時，IACC 與 RASTI 之改變並不存在於相同角度內。而且 RASTI 之改變也呈現出只有 0.58 ~ 0.65 的改變範圍，而 IACC 相對的卻有 0.48 ~ 0.86 的改變範圍；這表示在頭部上方之山形反射板與 Ando10 所提供之屋頂傾斜角度引起的 IACC 改變是相同的。因此我們可以推測 IACC 之改變受上方聲能影響將比 RASTI 敏銳。此外於實測部份，我們觀察了國內室型較具變化之空間共 6 個，其中包含東海路思義教堂等有矩形、不整邊形兩種型態。針對空間餘響時間(RT)與 RASTI 來相互比較，結果用於顯示廳堂之 RASTI 均齊度與室形之關係。其結果顯示矩形空間之 RASTI 均齊度較不規則空間高；表示連續之天花反射板及側牆反射板可以提升室內 RASTI 之均齊度。此研究可惜並不能了解室形與 IACC 之關連性。Licklider¹⁶ 在噪音遮蔽下探討 IACC 對語音了解度(word difficulty)的影響發現；除語音之 SN 比之影響以外，IACC 之下降也相對地改善了語音的了解度。

針對以上的兩個問題，本研究須將以系統性地規劃以半無響室內的揚聲器系統來模擬水平以及上下方向之反射聲能量與反射角度以取得最大之 IACC 可能範圍(0.3 ~1.0)，來與聲場之 RASTI 作更有效之比較，此處須以餘響時間條件以搭配各種 RASTI 值之設定，以達成有效之比較統計範圍。並以實際之中文單音節語音作為語音清晰度與語音了解度雙方面的影響與關連性。