

葡萄園式音樂廳的空間聽感寄予側向聲能貢獻程度之研究

陳炯堯¹ 黃煜倫^{2*}

¹朝陽科技大學建築系

²朝陽科技大學建築系建築及都市設計碩士班

(收件日期：112 年 6 月 19 日；接受日期：112 年 9 月 19 日)

摘要

自從 1963 年德國柏林愛樂音樂廳出現之後，一種新形式的正式音樂廳就此誕生，稱作葡萄園式音樂廳(又稱梯田式音樂廳)，相較傳統鞋盒式音樂廳，葡萄園式音樂廳最大的特色為觀眾區分區分層環繞舞台，進一步拉近了表演者與觀眾間的親近感。而談到音樂廳的本質，最重要的就是聲學呈現出的空間感，它是一個抽象但又不可或缺的音樂廳聲音特性。由早期反射所形成的側牆反射聲能一直是聲學設計最賴以表現聲音空間感的工具。然而葡萄園式音樂廳之聲學設計因為觀眾區包圍舞台的緣故，常被詬病缺乏豐富的側牆反射聲能量，因此設計師會利用座位區高起的分區牆來補充其側向反射聲能的不足。然而分區牆的做法相較傳統音樂廳大面積側牆到底能有多少的回饋效果，目前針對這個課題並沒有太多的相關研究。

本研究將透過電腦軟體 EASE 的協助，模擬還原世界上具代表性的葡萄園式音樂廳，同時模擬代表性之傳統鞋盒式音樂廳，並製作可聽化樣本以配對比較法進行心理聽測實驗相互比較，期盼能了解利用分區牆面反射的輔助來彌補無法充分得到側牆反射聲能的葡萄園式音樂廳在空間聽感上與鞋盒式音樂廳的落差。

關鍵詞：葡萄園式音樂廳、心理聽測實驗、配對比較法、雙耳互函數

Research on the Contribution of Lateral Reflection to the Spatial Auditory Perception of Vineyard-style Concert Halls

Chiung-Yao Chen¹ Yu-Lun Wong^{2*}

¹Department of Architecture, Chaoyang University of Technology

²Master Program in Architecture and Urban Design, Department of Architecture,
Chaoyang University of Technology

(Date Received : June 19, 2023 ; Date Accepted : September 19, 2023)

* 本文通訊作者：黃煜倫 eltonschool@gmail.com

Abstract

Since the appearance of the Berlin Philharmonic Concert Hall of Germany in 1963, a new form of formal music hall has emerged, called the vineyard-style music hall (also known as the terraced music hall). Compared to traditional shoebox-style music halls, the biggest feature of the vineyard-style music hall is that the audience area is divided into layers around the stage, which further enhances the closeness between performers and the audience. Regarding the essence of a music hall, the most important aspect is the spatial sense of acoustics, which is an abstract but essential characteristic of a music hall's sound. The side wall reflection energy formed by early and late reflections has always been the tool on which acoustic design relies most to demonstrate sound spatiality. However, due to the audience area surrounding the stage, the acoustic design of the vineyard-style music hall is often criticized for lacking sufficient side wall reflection energy. Therefore, designers use partition walls that are higher than the seating area to supplement the lack of lateral reflection energy. However, there is currently little research on the feedback effect of partition walls compared to large side walls in traditional music halls.

This research will use computer software EASE to simulate and reproduce representative vineyard-style music halls and traditional shoebox-style music halls and produce audible samples for pairwise comparison experiments in psychoacoustic testing. The aim is to understand how the use of partition walls for reflection can compensate for the lack of sufficient lateral reflection energy in vineyard-style music halls and the differences in spatial listening experience between vineyard-style and shoebox-style music halls.

Keywords : Vineyard-style music hall, Psychoacoustic testing, Method of paired comparison, IACC.

一、研究動機與目的

一般說到音樂廳，前方框架的舞台、後方的觀眾區以及兩側大面積的側牆，這些印象直接出現在我們眼前，此種音樂廳形式由傳統長盒狀逐漸演變而來，這是自從正式音樂廳出現以來，基於聲音於空間中傳播的特性，最直接也最有效控制聲音品質的設計手法，經典的案例如維也納金色大廳及波士頓音樂廳等。但自從 1963 年德國柏林愛樂音樂廳出現之後，一種新形式的正式音樂廳就此誕生，稱作葡萄園式音樂廳(又稱梯田式音樂廳)，相較傳統鞋盒式音樂廳，葡萄園式音樂廳最大的特色為觀眾區分區分層環繞舞台，

進一步拉近了表演者與觀眾間的親近感。楊志剛(2020)即針對現代表演越來越重視觀眾親近感的這一現象對葡萄園式音樂廳的尺寸以及形體做了分析，探討觀眾於廳堂內聆賞表演的感受。設想傳統我們在音樂廳聆聽演奏的時候，只能透過前方舞台的框架欣賞表演，然而在葡萄園式音樂廳我們可以以各種角度觀看表演者而不受限於任何框架，現場觀眾們將表演者包圍起來所產生的氛圍好不熱鬧，這不正是自古以來人們看表演的自然形式嗎？德國柏林愛樂音樂廳建築師 Hans Scharounru (1983-1972)正是因為這個想法從而創造出葡萄園式音樂廳的，也因為如此發展至今葡萄園式音樂廳越來越受歡迎，音樂廳不再拘泥於傳統框架的形式，變得更活潑更熱鬧。

然而葡萄園式音樂廳的聲學設計較鞋盒式來得複雜許多，過於自由多變的廳堂空間設計讓舞台聲源的傳播產生更多的變數，且對於空間聽感極為重要的側向反射聲能量來源，大面積的側牆也由高低大小不等的觀眾區所取代，因此常被詬病缺乏豐富的側牆反射聲能量。楊志剛(2019)也針對相似條件之下的鞋盒式以及葡萄園式之間進行了比較，結果顯示在大部分情況下鞋盒式的聲學效果都是優於葡萄園式的，且因為造型較多變不規則的原因，葡萄園式在廳內不同位置之間的差異較為極端。

談到音樂廳的本質，最重要的就是聲學呈現出的空間感，它是一個抽象但又不可或缺的音樂廳聲音特性。聲場空間主要由直達聲(direct sound)、早期反射聲(first reflection)、殘響(reverberation)三種重要元素組成。在聲學空間感的主觀評價上，Morimoto(1989)在聲場空間印象(spatial impression)的研究中就指出，決定一座廳堂優劣的必要評價有兩個，聲源寬度(apparent source width, ASW)與聲源包圍感(listening envelopment, LEV)，而Beranek(1992)也將構成空間音感的主要因素歸類成聲源寬度(ASW)與聲源包圍感(LEV)(圖 1)。前者由早期反射構成，主要提供音像大小與聲音定位的指標；而後者則由後期反射構成，主要提供聽眾在空間內聆賞的臨場樂趣。

由早期反射所形成的側牆反射聲能一直是聲學設計最賴以表現聲音空間感的工具。人耳位於頭部兩側而非上下，因此人耳的聽力系統對於側向反射聲能最為敏感。兩側的牆面對於音樂廳來說就顯得非常重要，有了側向反射聲能，會使得聲源有寬廣的感覺，這涉及了三維的聲音體驗，例如傳統鞋盒式音樂廳的大面積側牆就能提供充足的側向反射聲能。不過在葡萄園式音樂廳的空間規劃上，大部分的早期反射聲源均非常微弱，尤其在 2000 席以上之廳堂的主要早期反射能量延遲時間均較長，甚至達到 200ms 以上，這對上述的兩個空間感的主觀評價似乎是難以得到幫助，甚至會造成困擾。設計師通常要利用座位區高起的分區牆來補充其側向反射聲能的不足，然而分區牆相較傳統大面積側牆的作法到底能有多少效果，目前針對這個課題並無多少相關研究，因此本研究將針對這方面加以深入，以期望提供日後設計者在操作葡萄園式音樂廳時能有更多參考依據。

關於葡萄園式音樂廳設計所造成的聲學障礙，本研究將透過聲學模擬軟體 EASE，

模擬還原世界上具代表性的葡萄園式音樂廳，並對其進行聲場的分析，同時與代表性之傳統鞋盒式音樂廳相互比較，期盼能了解利用分區牆面反射的輔助來彌補無法充分得到側牆反射聲能的缺陷是足夠還是不足的，並得知葡萄園式音樂廳在側牆反射的豐富性上有何缺失。

1. 了解葡萄園式音樂廳的側牆反射聲能量影響廳感的程度為何？
2. 探討分區牆反射的作用在葡萄園式音樂廳中的影響有多少。

二、文獻回顧

2-1. 聲源寬度(ASW)與聲源包圍感(LEV)

在空間物理性分析中，Bradley(2000)提出聲源寬度(ASW)與聲源包圍感(LEV)差異在於側向反射音延遲以 80ms 來分割(圖 2)，於 80ms 之前的反射聲影響屬於聲源寬度(ASW)；而 80ms 之後影響者屬於聲源包圍感(LEV)。至於空間耦合效應僅影響後續殘響能量，造成殘響的雙斜效應。

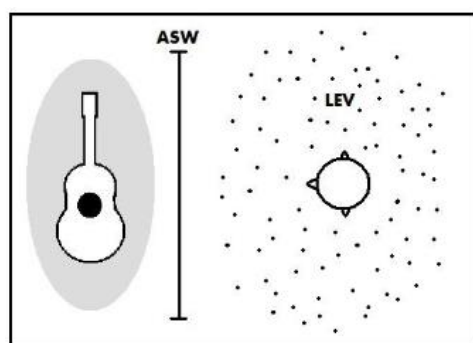


圖 1. 聽者包圍感(LEV)與聲源寬度(ASW)

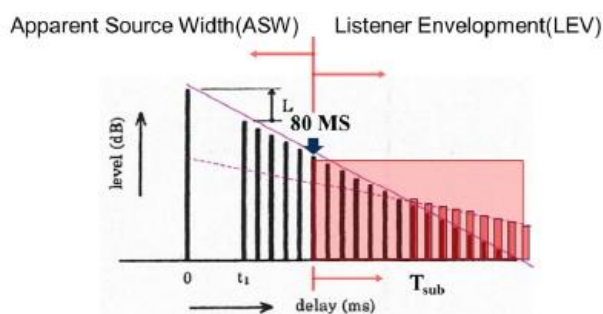


圖 2. 聲源寬度(ASW)及聲源包圍感(LEV)之差異

2-2. 空間聽感於聲學物理特性上的代表參數

在聲學物理特性上空聞聽感評價的代表參數大致以早期側向能量積分(early lateral energy fraction, LF)與雙耳互函數級數(gratitute of interaural cross-correlation function, IACC)兩者為主。不少學者更找到兩者之間的關聯性，如 Okano, Beranek, and Hidaka (1998)就透過 ASW 的主觀聽感報導 LF_E 與 $IACC_E$ 之間的強烈類似性。且這兩個代表空間音感的音樂廳物理參數都被收錄在 ISO 3382-1 當中。

雖然兩個參數在分析及測量工具上因各自不同的情況而各有不同的缺陷，不過 Barron (2019)提到對於 LF 值的測量有很多過程未被詳細確立，如實驗前校正、測量時兩種麥克風(無指向與八字型)的匹配(含位置)與其個別收音的感度或指向性等問題，都會影響測量的正確性，這些因素都影響麥克風收音對於直達聲能量與反射聲能量區分的

定義。而校正問題至今沒有明確的規定使得 LF 的數據容易因為實驗室的不同而導致結果常常不一致，考量到這方面問題因此本研究最後決定以 IACC 來進行計算評估。

2-3. 雙耳互含函數(IACC)

Ando(1985)提出以雙耳互函數級數(IACC)解釋人耳對於一聲場的空間印象，影響數值變動的主要因素為水平方向的擴散程度。由於聲音傳達路徑之特性在兩耳之個別脈衝響應為 $h_{nl}(t)$ 和 $h_{nr}(t)$ ，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)，並且兩者為獨立個體。

在一個二維空間的平面中，音源在任何角度上均有一定關係，將兩者之關係以一特定物理函數來表達聲源分別到達兩耳之信號 $f_l(t)$ 和 $f_r(t)$ 間的關係，定義如式(1)。

$$\Phi_{lr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f'_l(t) f'_r(t+\tau) dt, \dots\dots\dots(1)$$

$f'_l(t) = f_l(t) \cdot s(t)$ 和 $f'_r(t+\tau) = (t) \cdot s(t)$ 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 $s(t)$ 。

規化之雙耳互函數為式(2)

$$\varphi_{lr} = \frac{\Phi_{lr}(\tau)}{\sqrt{\Phi_{ll}(0) \Phi_{rr}(0)}} \dots\dots\dots(2)$$

$\Phi_{ll}(0)$ 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)之單耳的自函數。

在實際聲場中根據反射音次數及其強弱，正規化互函數將改寫為式(3)

$$\varphi_{lr}^{(N)}(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^N A n^2 \Phi_{lr}^{(n)}(\tau)}{\sqrt{\sum_{n=0}^N A n^2 \Phi_{ll}^{(n)}(0) \sum_{n=0}^N A n^2 \Phi_{rr}^{(n)}(0)}} \dots\dots\dots(3)$$

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(4)

$$IACC = |\varphi_{lr}^{(N)}(\tau)|_{max} \dots\dots\dots(4)$$

而兩耳間信號之最大延遲將限定於 $|\tau| \leq 1ms$ 。

2-4. 葡萄園式音樂廳與鞋盒式音樂廳於聲學效果上的差異

楊志剛(2019)針對條件相近的鞋盒式音樂廳以及葡萄園式音樂廳之間進行了比較，結果顯示大部分情形下鞋盒式的聲學效果都是優於葡萄園式的，且因為造型較多變不規則的原因，葡萄園式於廳堂空間內不同位置之間的差異較為極端。整體來說兩者除了響度、聲源寬度 ASW 和舞台支持度相差不大外，在整體豐滿度、聲源包圍感 LEV 和反射

聲效果等，鞋盒式音樂廳皆優於葡萄園式，且葡萄園式音樂廳位於舞台後方、側方及相鄰觀眾席的聲學參數相對較為極端，很大程度上影響了整個音樂廳的聲場表現。

通常設計師透過於舞台上懸掛反射板等手段來提升音樂廳的聲場效果，這種方式可以使得音樂廳的舞台支持度得到很大的改善，因此指揮和演奏人員在舞台上並不太能明顯的感受到兩者於音質上的區別。然而即使葡萄園式音樂廳擁有超脫框架的表演能力，且表演者與觀眾之間的親切感乃至於整體視覺上的美感都能大幅度的提升，卻也因為觀眾席設計造成一些始終無法避免的缺點，例如舞台正面、以及多出來的側面和後方不同觀眾區接收到的聲樂在平衡上就會出現極大的差異，不僅是因為不同樂器所發出的聲音有不同的指向性，在距離以及角度上產生的變數相比傳通鞋盒式音樂廳多出了許多，比如舞台後方的觀眾區，在演奏鋼琴協奏曲時，琴蓋向前敞開，舞台後方的聽者就只能接收到經過多次反射回來的聲音。

2-5. 配對比較法(method of paired comparison)

Ando(1985)提出評價一聲場好壞時，針對主觀感受而言，配對比較法非常的適合，因為接受測聽實驗的受測者能夠簡單地從兩個聲場中辨別出他們比較喜歡哪一個，這類實驗可以避免各種定義不明確的音響形容詞，如”清晰程度”、”空間感”等等，而這些形容詞時常無法在聽完測聽樣本的當下保留一致的體認，因此配對比較法僅須在兩者樣本之間二選一的作法，將能簡化測聽者的反應與解釋，故能更準確地呈現測聽者於音質差異下對於兩者樣本比較的喜好程度。

而跟據 Thurstone (1927)的 CASE V 假設，配對比較的基礎是建立在受測者認知不一樣的情況之下施作的一種心理量化方式。即受測者對於某事件兩樣本間反應的相關係數幾乎要接近零，不然 CASE V 的 goodness of fit (模型適合度)將不合格，也就是事件的配對間關係與 Thurstone 的量化假設違背。Mosteller (1951)就提出一致性調查結果只是要查核是否合乎 Thurstone 的假設，對於配對比較的結果並無影響。

2-6. 聲學模擬軟體與實際聲場差異性

由於諸多因素不便前往廳堂現場做數據量測，通常會仰賴聲學模擬軟體進行案例的模擬及計算，目前的聲學模擬軟體不少，本研究使用的模擬軟體即是業界主流之一，也是朝陽科技大學聲學實驗室一直以來使用的 EASE 做為模擬計算的工具。然而模擬軟體畢竟是軟體，常被詬病真實性的問題，Yang(2008)就針對模擬與現實進行過比較分析的研究，使用的是 CATT-Acoustic 和 ODEON 兩款聲學模擬軟體，模擬方法與本研究相同，皆為音線法。根據結果顯示，這兩個模擬軟體被用於模擬現有教室時，在低和高吸音/殘響時，預測它們的室內聲學參數；另外還進行了在課堂上聽到的語音清晰度測試，將結果相互比較，並與在真實教室中的測量結果進行比較後，發現這些模型在教室 3D 模型與實際房間聲學參數之間的預測以及語音清晰度測試的可聽化方面是等效的。多少間接

證明了目前主流運行的聲學模擬軟體確實具有一定的可信度。

三、研究方法

本研究會挑選幾座代表性之葡萄園式與鞋盒式音樂廳，透過這些經過現實考驗證明音響品質優良之音樂廳進行建模與分析。為證明葡萄園式音樂廳利用分區牆面反射的輔助來彌補無法充分得到側牆反射聲能的缺陷，相比傳統鞋盒式音樂廳是足夠還是不足，將會透過聲學模擬的方法中，圖 3 顯示利用音線法(ray trace)來模擬座位區上的雙耳脈衝，接著將葡萄園式與鞋盒式音樂廳模擬出來的測點脈衝數據製作成可聽化之聽測音樂樣本，透過配對比較法進行主觀心理聽測實驗，最後再進行各測點之 IACC 物理參數值計算，以求得主觀及客觀兩面向的結果進行對照，比對葡萄園式與鞋盒式音樂廳在心理聽感以及物理參數之間的差異。

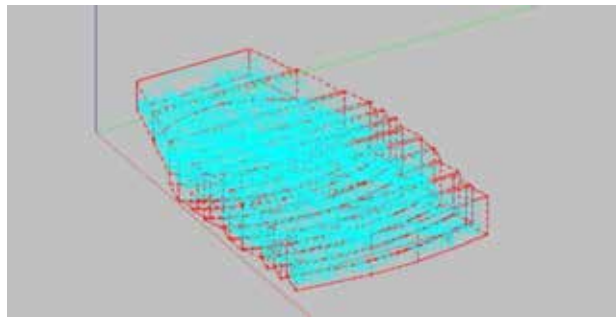


圖 3. EASE 軟體的音線法(ray trace)功能模擬聲音的行徑

3-1 主觀心理實驗

3-1.1 聲學脈衝數據模擬

主觀聽測實驗之第一步為數據的模擬，本研究將透過建置 3D 模型導入 EASE 聲學模擬軟體的方式，進行音樂廳數據的模擬。葡萄園式音樂廳資料蒐集以楊志剛(2020)及 Toyota 等人(2020)為依據，取分區座位達 8 個區域以上，並且主要演奏台設計有背後座位區達兩排以上之正式音樂廳為主。為觀察葡萄園式音樂廳本身形式差異是否也會造成不同影響，在殘響性能相近的基礎下，以對稱型日本三得利音樂廳(圖 4、體積 21,000m³、座位數約 2006 座、殘響時間 2.1s)及不規則形芬蘭赫爾辛基音樂廳中心(圖 5、體積 24,000m³、座位數約 1704 座、殘響時間 2.1s)共兩座差異較大的葡萄園式音樂廳進行模擬，並加入一座代表性之傳統鞋盒式音樂廳-美國波士頓音樂廳(圖 6、體積 18,750m³、座位數約 2625 座、殘響時間 1.9s)做為比對組。

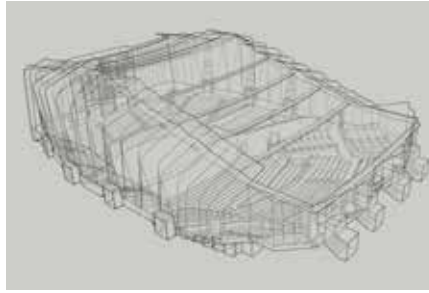


圖 4. 對稱型葡萄園式音樂廳日本三得利音樂廳

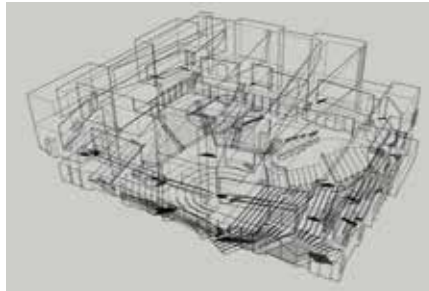


圖 5. 不規則型葡萄園式音樂廳芬蘭赫爾辛基音樂廳中心

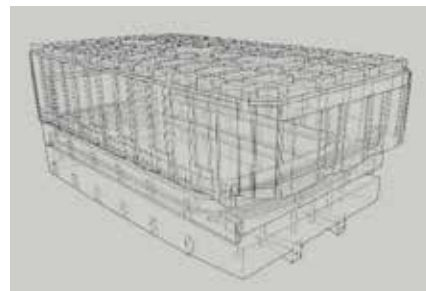


圖 6. 大型鞋盒式音樂廳美國波士頓音樂廳

3-1.2 聽測樣本製作

為了能透過實際聽測的方式，主觀感受葡萄園式與鞋盒式音樂廳之間的聽感差異，聽測樣本的製作尤其重要。首先於三座廳堂安排測試的座位點並給予編號(表 1)，接著透過聲學模擬軟體 EASE 的模擬計算，得到了各廳堂特定座位點之雙耳脈衝數據之後，此軟體將座位點脈衝資料根據 Thomas and Stockham (1966) 及 Soo and Pang (1990)提到的技術進行訊號的疊加，即利用軟體中的 "auralization" 功能製作座位區之可聽化測聽樣本。本次實驗在合成測聽樣本中使用朝陽科技大學聲學實驗室提供之小提琴演奏聲 (dry source)，作為音樂樣本的製作選擇。此方法乃為模擬各廳堂特定座位點於實際情形下聆聽該音樂樣本的情形，使測聽者能在不必親自前往該音樂廳的前提下，得到與之幾乎相同的聆聽體驗。

表 1. 各測點對應廳堂

測點 S	日本三得利音樂廳
測點 H	芬蘭赫爾辛基音樂廳中心
測點 B	美國波士頓音樂廳

3-1.3 樣本製作之實驗限制

根據 Ando(1985)提出的空間音響特性主要分為四因子，分別為聲壓級(level of listening, LL)、第一反射遲延(delay time of first reflection, Δt_1)、殘響(reverberation, RT)、雙耳互函數級數(gratitude of interaural cross-correlation function, IACC)。人耳在一聲場中的空間印象裡雙耳互函數級數(IACC)及殘響(RT)尤其重要，為區別出各音樂廳的臨場感，本模擬實驗之基本設定會固定前兩項因子，而雙耳互函數級數(IACC)及殘響(RT)作為操作變因，透過兩參數的差異，讓受測者從不同的聽測樣本中辨別臨場感較好的一方。

1. 聲壓級(LL)：EASE 模擬出之各測點的可聽化樣本，透過 Adobe Audition 編輯，將各音檔連接合併時，一並將所有音檔的音量做標準化(normalize process)的動作，初步使所有測點之可聽化樣本音訊的音量一致。接著於實際測試時保持播放設備、播放耳機以及播放音量的固定，設定為 75dBA，確保所有樣本播放的聲壓級完全相同。
2. 第一反射遲延(Δt_1)：每座廳堂皆以中距離及遠距離各一個測點為原則(圖 7、圖 8、圖 9)，並固定各測點與聲源之間的直線距離，中距離為 30.5cm；遠距離為 16.5m，在直達聲相同的情況下，以確保第一反射遲延並不會相差太多。

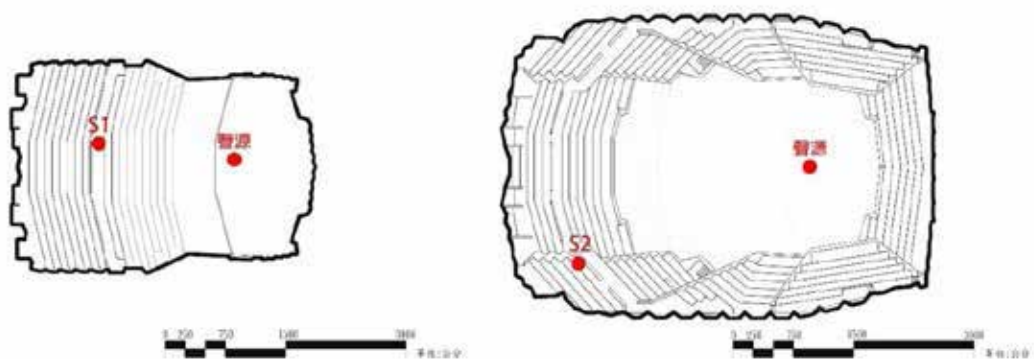


圖 7. 日本三得利音樂廳測點位置

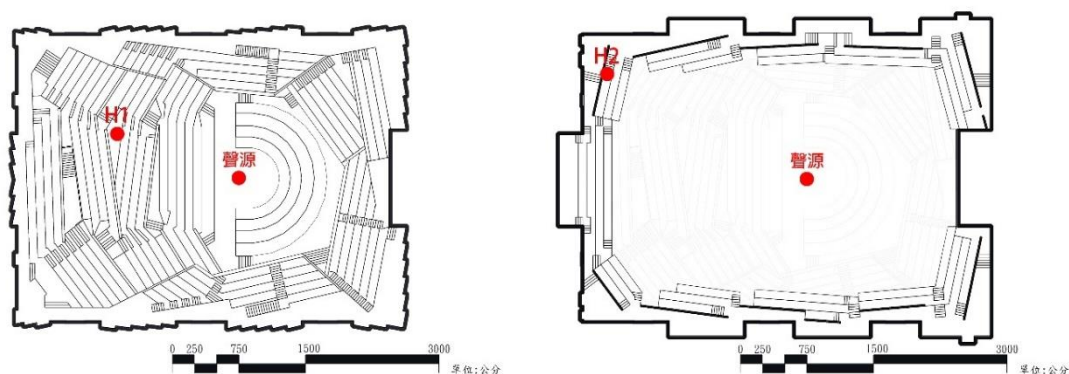


圖 8. 芬蘭赫爾辛基音樂廳中心測點位置

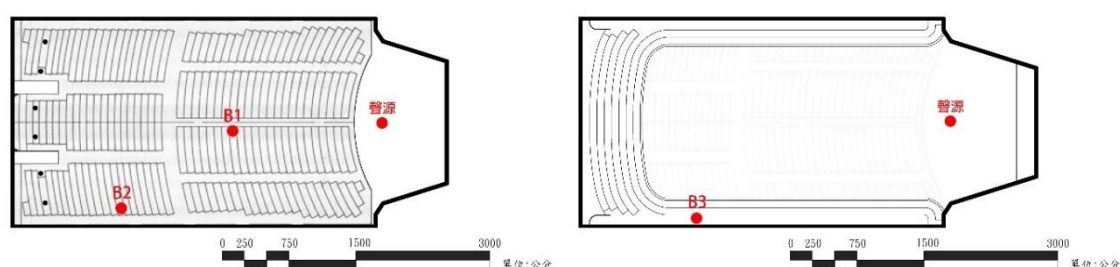


圖 9. 美國波士頓音樂測點位置

3-1.4 測聽者與實驗方式

實驗方式參考陳炯堯、游財榮(2011)之實驗方法，為避免人為因素所造成之實驗誤差，於實驗前會進行完整之程序及實際操作實驗說明，使測聽者充分理解實驗過程及問卷回答方式。並將音樂樣本給予測聽者進行試聽，測聽者通過簡單聽力測試確認了解實驗後方可進行。測聽者預計找尋年齡範圍 21 ± 3 歲之朝陽科技大學 20 至 30 名。實驗場地之選擇，為盡量降低周圍環境噪音的影響，整個實驗過程皆會於朝陽科技大學無響室中進行。實驗播放設備使用 ASUS TUF Gaming F15 FX507ZM 搭配 MSI S37-21000A1-V33 耳機進行。

為了瞭解聲場聽感的心理量化數值，實驗方法使用 Thustone Case V 之配對比較法，配對方式以葡萄園式及鞋盒式音樂聽之模擬樣本互相搭配進行比較，配對比較實驗時選擇臨場感較強烈者來回答。測試之音樂樣本根據圖 7、圖 8、圖 9 所示，兩座葡萄園式音樂廳分別各 2 個測點；鞋盒式音樂廳 3 個測點，一共 7 個測聽樣本。

根據兩刺激量：

$$R_j, R_k (j, k = 1, 2, \dots, n)$$

可以產生 N 對組合如式(7):

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \dots\dots\dots (7)$$

實驗音樂樣本撥放時間均為 10s，每一組中兩個樣本間距為 2s，除了第一組進行判別需考慮較久時間，因此設定 10s，其餘每組之間間距為 5s(圖 10)，一共為 21 組判別組。配對比較法能夠將人的收聽音感根據統計的分析得到量化的數據，俗稱心理量化。

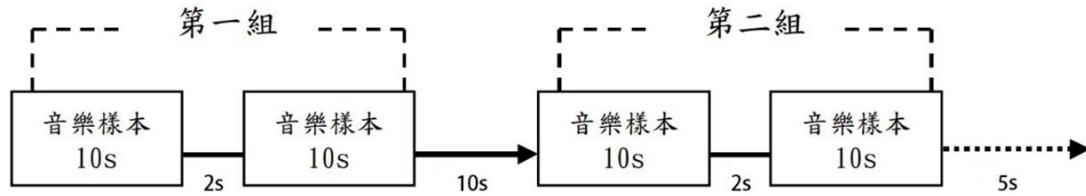


圖 10. 配對比較法聲音樣本播放過程

3-2 座位點物理參數計算

3-2.1 聲學脈衝數據模擬 2

於主觀的心理實驗結束後，為確保此結果的合理性，本研究將進一步針對模擬的部分進行物理參數的計算，以驗證心理實驗的結果。物理計算的樣本來源，將延續心理實驗 3-1.1 聲學脈衝數據模擬的做法進行模擬與製作。為避免廳堂特定區域影響整體結果，本次物理計算的測點安排會依中間區域、側邊區域、中距離、遠距離等條件，均勻散佈於三座廳堂中，每座廳堂 12 個測點共 36 個，參考如(圖 11、圖 12、圖 13)。

3-2.2 物理參數樣本製作與計算

將聲學模擬軟體 EASE 進一步模擬出來的 36 個座位點脈衝資料，依據心理實驗聽測樣本的作法將原小提琴演奏聲(dry source)透過 auralization 功能製作出座位區之可聽化測聽樣本，接著將這些樣本輸入 realtime analyzer 軟體轉檔後，於 Sound Analyzer System 系統中進行物理參數的計算。

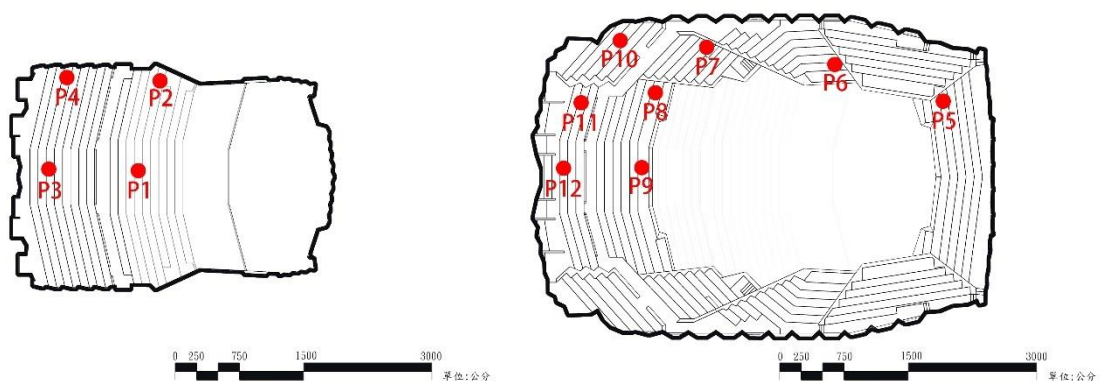


圖 11. 日本三得利音樂廳 12 個測點位置

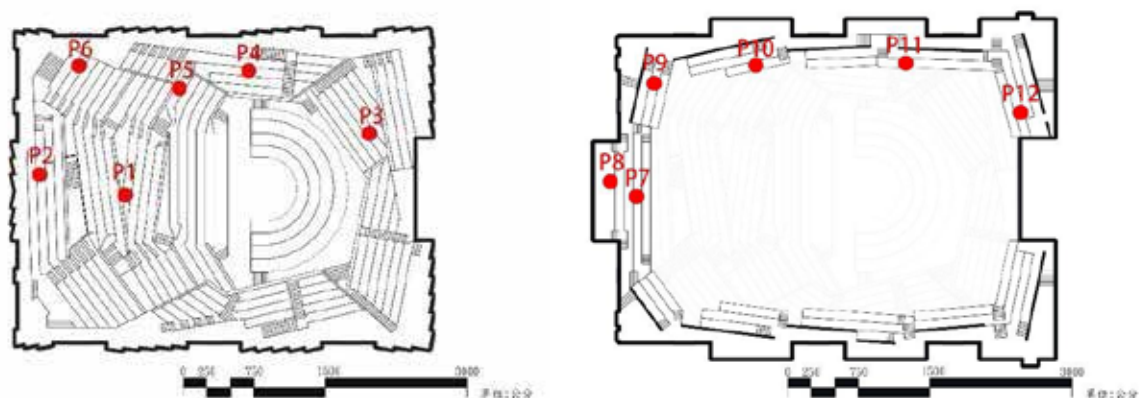


圖 12. 芬蘭赫爾辛基音樂廳中心 12 個測點位置

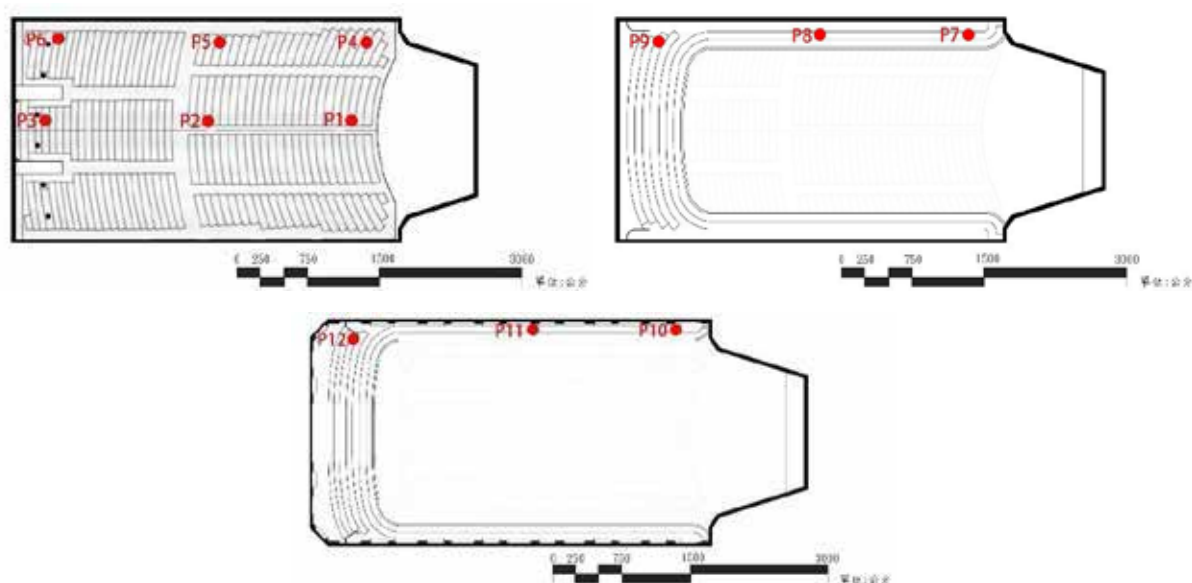


圖 13. 美國波士頓音樂 12 個測點位置

四、實驗與統計結果

4-1.1 分區牆及側牆面積之統計

所謂分區牆為各高底錯落的座位區之間以及樓座前方的高矮不等牆面，而關於側牆之定義卻無一個統一的說法，因此本研究以最為廣義之”廳堂四周牆面”為標準，根據 3D 模型進行各項面積統計，結果如下表所示(表 2)。

表 2. 分區牆及側牆之統計

	日本三得利音樂廳	芬蘭赫爾辛基音樂廳中心	美國波士頓音樂廳
側牆面積	1304.23 m ²	1033.60 m ²	1542.95 m ²
分區牆面積	393.92 m ²	473.63 m ²	203.63 m ²
側向反射面積	1698.15 m ²	1507.23 m ²	1773.58 m ²
分區牆占側向反射面積比例	30.203%	45.823%	14.272%

4-1.2 心理聽測實驗結果與分析

藉由配對比較法一貫性檢定結果顯示，測聽者共 20 名，其中 15 名問卷($d > 3$)產生首尾回答不一致的情形，故不予採納；剩餘 5 名測聽者($d \leq 3$)的回答符合一貫性標準。此 5 名測聽者配對比較結果根據 Thustone Case V 量化理論得到心理量化的數值，即為本研究三座音樂廳案例的各測點收聽臨場感的心理量化值。

配對比較實驗結果如上表所示(表 3、表 4)，三座音樂廳各測點收聽臨場感的心理量化值結果排序： $B1 > B3 > S1 > B2 > H2 > H1 > S2$ (圖 14)。

表 3. 配對比較法之配對比率 P_{jk} 比較表

$j \backslash k$	B1	B2	B3	S1	S2	H1	H2
B1		0.4	0.2	0.2	0.001	0.001	0.2
B2	0.6		0.4	0.4	0.001	0.6	0.4
B3	0.8	0.6		0.4	0.001	0.001	0.2
S1	0.8	0.6	0.6		0.001	0.001	0.4
S2	0.999	0.999	0.999	0.999		0.999	0.8
H1	0.999	0.4	0.999	0.999	0.001		0.6
H2	0.8	0.6	0.8	0.6	0.2	0.4	

表 4. 配對比較法之標準分數 Z_{jk} 、求得主觀心理量化值 S_{jk}

$j \backslash k$	B1	B2	B3	S1	S2	H1	H2
B1		-0.25335	-0.84162	-0.84162	-3.09023	-3.09023	-0.84162
B2	0.253347		-0.25335	-0.25335	-3.09023	0.253347	-0.25335
B3	0.841621	0.253347		-0.25335	-3.09023	-3.09023	-0.84162
S1	0.841621	0.253347	0.253347		-3.09023	-3.09023	-0.25335
S2	3.090232	3.090232	3.090232	3.090232		3.090232	0.841621
H1	3.090232	-0.25335	3.090232	3.090232	-3.09023		0.253347
H2	0.841621	0.253347	0.841621	0.253347	-0.84162	-0.25335	
S_{jk}	8.958675	3.343579	6.180465	5.085496	-16.2928	-6.18046	-1.09497
$S_{jk}/7$	1.279811	0.477654	0.882924	0.726499	-2.32754	-0.88292	-0.15642
度量值	1.804533	0.673492	1.244922	1.024364	-3.28183	-1.24492	-0.22056

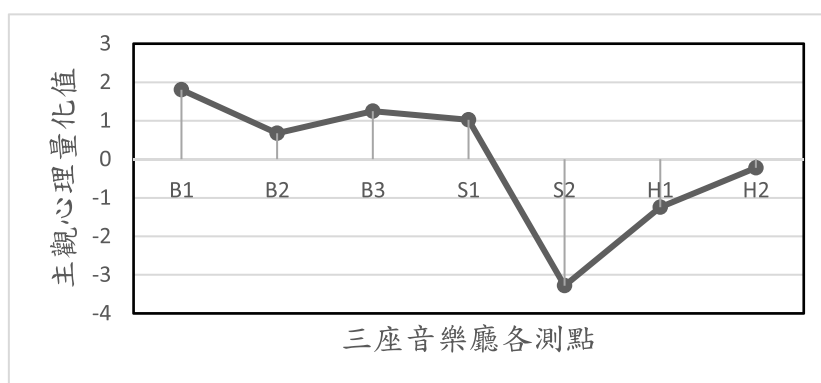


圖 14. 臨場感之心理量化值結果

4-1.3 心理聽測實驗結論

本次研究在心理實驗結果方面大致符合預期，傳統鞋盒式音樂廳的波士頓音樂廳平均來說有著較高的空間聽感水準。根據此結果整理出以下結論：

1. 日本三得利音樂廳較遠的座位區臨場感掉落的原因可能在於，位處上層的區域而周邊缺乏足夠面積的側牆及分區牆，導致側向聲能較為不足進而嚴重影響了收聽的臨場感。
2. 從芬蘭赫爾辛基音樂廳中心的結果來看，不規則造型之下層觀眾席區對比稍微規則之上層觀眾席區，明顯後者優於前者。此結果可能表示規則對稱性的葡萄園式音樂廳規劃較有利於營造空間聽感的水準。
3. 進一步代入側向反射面積(表 2)及臨場感量化結果(圖 14)之間作比對可以發現，在側牆零碎及被壓縮的葡萄園式音樂廳中，分區牆起到了一定程度的控制效果，分區牆占比較高的芬蘭赫爾辛基音樂廳在中距離與遠距離的聽感相差並不會太多；反之占比稍少的日本三得利音樂廳好的很好差的很差，呈現出了極端的結果。

4-1.4 座位點物理參數結果與分析

根據 3-2.2 所計算出來的 36 個座位點樣本之物理參數，針對其中的雙耳互函數級數(IACC)計算結果整理平均進行比較，其結果如(圖 15)。

經過計算分析後的結果顯示，傳統鞋盒式音樂廳的波頓音樂廳擁有最佳的 IACC 表現，赫爾辛基音樂廳次之，而三得利音樂廳第三。接著進一步分析心理實驗使用的 7 個測點，計算與結果如(圖 16、圖 17)。

分別將中距離與遠距離各自計算後從結果發現，不論是在廳堂中段位置抑或後段位置，傳統鞋盒式音樂廳的波頓音樂廳仍然擁有最佳的 IACC 表現，而葡萄園式音樂廳的三得利音樂廳則是廳堂後段位置的表現優於中段位置；赫爾辛基則相反，廳堂中段位置的表現優於後段位置。

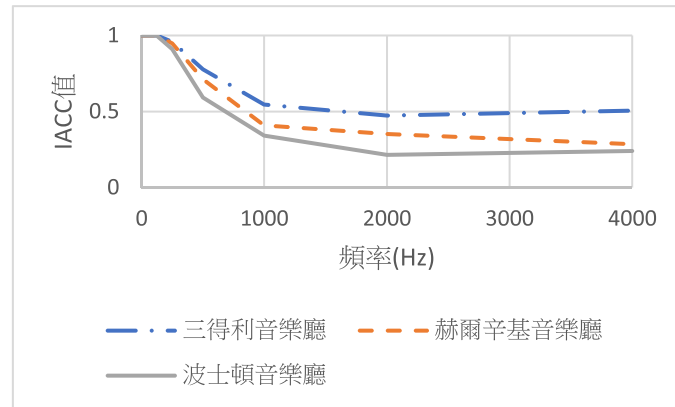


圖 15. 三座廳堂 IACC 平均值比較

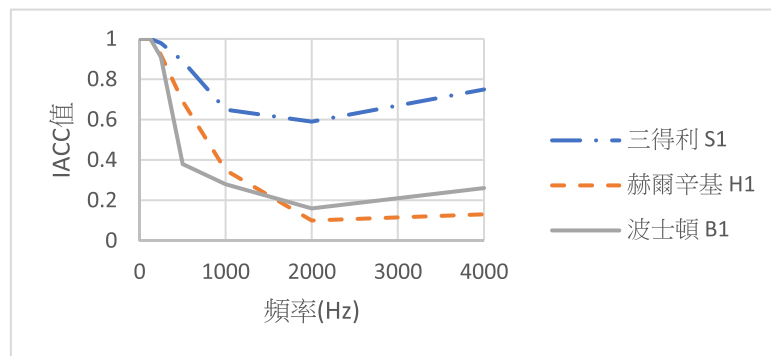


圖 16. 各廳堂中距離 IACC 值

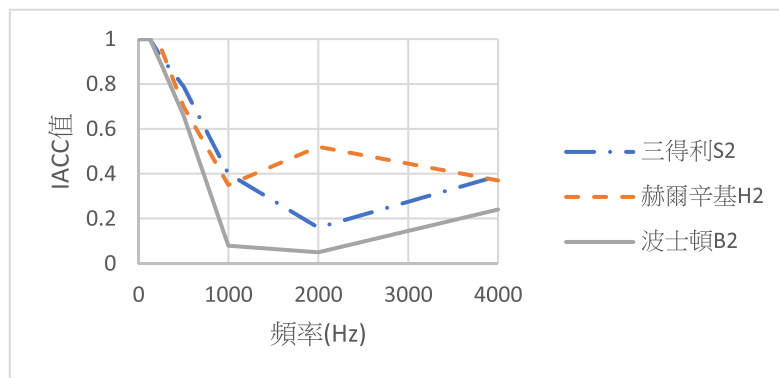


圖 17. 各廳堂遠距離 IACC 值

4-1.5 座位點物理參數計算結果

本次物理計算結果大致上符合預期，根據以上結果整理出以下結論：

1. 整體而言葡萄園式音樂廳的空間聽感相比傳統鞋盒式音樂廳確實明顯不足。
2. 從兩座葡萄園式音樂廳在廳堂下層中段位置的 IACC 結果來看，明顯是赫爾辛基音樂廳優於三得利音樂廳。而在上層後段位置部分，除了 2000Hz~3000Hz 三得利音樂廳有比較優秀的表現之外，其餘大致上與赫爾辛基相同。

五、結論與建議

1. 在諸多鞋盒式音樂廳中座位的 IACC 值調查中，結果皆顯示座位區後半段的數據較低，也就是後段座位區得到側向反射能量較前段座位優良。本研究發現葡萄園式音樂廳因高起的樓座分區強牆提供了不少有效的反射能量，因此依然可以發現遠距離的座位 IACC 值較低的結果。
2. 從整體實驗結果來看，鞋盒式音樂廳擁有極高的穩定性，靠著大面積且完整的側牆營造了良好的聲場空間，而葡萄園式音樂廳透過分區牆雖然在一定程度上補足了葡萄園式音樂廳缺乏完整大面積側牆所形成的聲場缺陷，但仍存在太多不穩定的因素，導致結果多呈現極端化。
3. 心理實驗部分，根據 Ando(1985)的空間音響特性四因子，本次心理實驗固定了樣本的第一反射遲延時間(Δt_1) 以及聲壓級(LL)，僅將雙耳互函數級數(IACC)及殘響(RT)兩因子作為操作變因，然而或許因為葡萄園式音樂廳空間的多變化性帶給受測者的感受較為複雜，而受測者又並非專業的音樂人士之下，從而導致實驗結果的有效問卷數不盡理想。或許可以進一步思考測點的安排方式、數量以及實驗方法能如何調整。
4. 從結果來看，赫爾辛基音樂廳的表現是優於三得利音樂廳的，這部分與現實中對這兩座廳堂的評價稍微有點出入，可能是葡萄園式音樂廳複雜的聲場環境帶給模擬軟體的誤差。或許可以進一步實測葡萄園式音樂廳現場數據與模擬進行比對，或是重新調整模擬的參數、思考實驗的配置等。

謝辭

本研究經國科會補助大專生研究計畫特此感謝 (計畫編號 111-2813-C-324-020-E)

參考文獻

1. Ando, Y. (1985). *Concert Hall Acoustics*. Berlin Heidelberg. New York.
2. Beranek, L. L. (1992). *Concert Hall Acoustics*. J, Acoust. Soc. Am. ,85, pp.39
3. Bradley, J. S., Reich, R. D., and Norcross, S. G. (2000). *On the combined effects of early- and late-arriving sound on spatial impression in concert halls*. J. Acoust. Soc. Am. 108(2) 651-661.
4. Beranek, L. L. (1996). *Concert hall and opera houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer.

5. Barteld N. J. Postma, Brian F. G. Katz. (2016). *Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralization*. USA.
6. Soo, J.S. Pang, K.K. (1990). *Multidelay block frequency domain adaptive filter*. Monash University, Clayton campus 01 Feb IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Vol. 38, Iss: 2, pp 373-376
7. Mosteller, F. (1951) *Remarks on method of paired comparison: I. The least squares solution assuming equal standard deviation and equal correlation*. Psychometrika, 16, pp 3-9.
8. Morimoto, M. and Posselt, C. (1989). *Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls*. J. Acoust. Soc. Jpn (E) 10, pp.87-91
9. Barron, M. (2019). *Basic design techniques to achieve lateral reflections in concert halls*. PROCEEDINGS of the International Symposium on Room Acoustics, 15 to 17 September in Amsterdam, Netherlands.
10. Okano, T., Beranek, L. L. and Hidaka, T. (1998). Relations among interaural cross-correlation coefficient ($IACC_E$), lateral fraction (LF_E), and apparent source width (ASW) in concert halls. J. Acoust. Soc. Am. 104 (1), 255-265.
11. Thurstone, L L. (1927). *The Method of Paired Comparisons for Social Values*. Journal of Abnormal and Social Psychology, 21, pp 384-400.
12. Toyota, Y., Komoda, M., Beckmann, D., Quiquerez, M., Bergal, E., (2020). *Concert Halls by Nagata*. pp.3-8 ,pp.79-86 ,Springer.
13. Thomas, G. Stockham, Jr. (1966). *High - Speed Convolution and Correlation*. Published in AFIPS '66 (Spring) 26 April, Computer Science, Mathematics.
14. Yang, W., (2008). *Comparison of Predicted, Measured and Auralized Sound Fields with Respect to Speech Intelligibility in Classrooms Using CATT-Acoustic and ODEON*. Gwangju University.
15. 陳炯堯、游財榮 (2011)，〈中西傳統樂器獨奏時之主觀聲源寬廣度比較研究〉，《設計與環境學報》，12，pp.99~116。
16. 楊志剛(2020)，〈探討親密感對葡萄園式音樂廳的尺寸要求〉，《演藝科技》，2020(1)，pp.48~54。
17. 楊志剛(2019)，〈同等條件下鞋盒式與葡萄園式音樂廳聲學特性的比較分析〉，《演藝科技》，2019(3)，pp.39~47。

