

竹製打擊樂器之聲音特性探討

王栢村¹ 俞均翰¹ 林冠廷¹ 楊博舜¹ 王昱棠¹ 黃家賢¹ 吳盈輝²

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

² 國立內埔高級農工職業學校 機械科

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

每種樂器演奏的聲音都有各自的特色，可以藉由聲音量測判別不同樂器的聲音特性，進而改良樂器的製造工藝。本文針對一組從C6到G7具有12個音階的竹製打擊樂器進行聲音特性探討，每一竹管為圓柱殼結構，在一端有特殊的底切構造。實驗規劃在量測每一個竹管受敲擊時的時間域響應，並獲得聲音功率頻譜，探討敲擊聲音的頻譜特性。針對每一竹管，以三個指標包括：音準、音色、持續度，進行聲音特性探討。竹管第一個結構自然頻率即是發聲的音準頻率，必須對應音階的標準頻率，實驗結果顯示所有竹管的音準頻率誤差在0.57-2.29%之間，均超過理想的0.3456%音準頻率誤差，可判斷此竹琴音準不佳，與實際聽覺感受相同。音色係由泛音頻率定義，由每個竹管的高頻率振動模態之聲音頻率探討，各竹管打擊聲音呈現出有數個分散的振動模態效應，而泛音頻率與基音音準頻率比值有接近整數倍的特徵，顯示幾何結構具有潛力改善為簡諧倍頻聲音特性。另外，以聲音時間域響應的衰減率定義為持續度，由於竹材料特性，打擊聲音持續短暫，顯現高衰減率的特性。本文探討簡易手工製作的竹琴打擊樂器，由聲音特性可看出有潛力改善為高品質的打擊聲音，未來將以電腦輔助工程分析技術進行結構模態分析，以進行開發此新型打擊樂器。

關鍵字：聲音特性、基音頻率、音準頻率、音色、衰減率

1. 前言

不同樂器演奏出的聲音都擁有各自的特色，可以藉由聲音量測判別不同樂器的聲音特性，再利用聲音頻率分析軟體進而改良樂器的製造工藝。打擊樂器可分為有調打擊樂器及無調打擊樂器兩種，有調打擊樂器最早有鐵琴，之後又衍生出木琴，並且有人透過改造竹子的結構並製作出竹琴等樂器，無調樂器則有木魚與古鈸等樂器，希望透過科技化的方式針對竹琴進行實驗量測，並了解其聲音特性，在未來希望能做為改善竹琴之參考依據，

王等人[1]探討不同打擊樂器聲音特性，分開探討有調打擊樂器及無調打擊樂器，之個別音高、音色、衰減率(持續度)，以聲音感測器及頻譜分析儀，量測個別打擊樂器的聲音樣本，並加以分析出其中的自然頻率、基音、泛音、衰減率，再由數據判斷，材料的不同是否會影響聲音的持續度。王等人[2]對於古鈸打擊樂器進行聲音品質探討。先以有限元素分析建構古鈸

的模型，再以理論模態分析得知古鈸的自然頻率、模態振型。實驗中測得的原始聲音，與有限元素分析對比之後可得三個主頻率。不同打擊點其敲擊出的頻域也會有相對的不同。王等人[3]針對特殊設計之簡諧倍頻音鐵琴組進行聲音品質探討，透過鐵琴片之打擊之聲音的音準、音色及持續度進而去了解它的物理意義，此外，本文獻也對其敲擊之琴槌頭的硬度進行探討，藉此得到琴槌硬度不同，對鐵琴片的聲音特性也會有所不同。徐等人[4]探討影響樂器本身的音色、特色、純淨度、音量的主要因素有泛音與基音間的協和性，甜美的音色有個重要條件就是純淨度要夠，雜音太多絕對不好聽，若怕有雜音，可使用濾波器濾除雜音而保留純音部份，各個樂器的音色不同取決於泛音結構。

王與林[5]對鐵琴片振動特性與聲音關聯性作探討，利用有限元素分析與實驗模態分析於鐵琴片，比較理論與實驗的自然頻率與模態振型。由敲擊鐵琴片結果顯示，敲擊鐵琴片的中心位子，可激發出第一個振動模態的聲音頻率，得到第一個振動模態為鐵琴片之主頻率，以利分辨不同長短鐵琴片之音階。鐘等人[6]對二胡之悶音進行探討，而胡琴之好壞是藉由悶音高頻多寡來判斷，以音量來說，高頻音量佔總體音量之百分之五以下時，將會造成高頻音色無法顯現，此類聲音就稱作為悶音，並透過主觀的問卷調查下進行悶音之訂定。王與簡[7]對鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證做探討，於敲擊12片不同音階鐵琴片做有限元素分析與實驗模態分析，比較其模態參數。如理論等效於實驗，即可利用鐵琴片有限元素模型，對鐵琴片進行設計與製作。

王與廖[8]則主要是對木琴條聲音與振動關聯性及形狀變更進行設計分析，並且對於等同於木琴條的限元素模型進行幾何形狀比例之設計與變更分析，藉由比例的關係來探討不同音階的木琴條，進而得到振動模態自然頻率與長度縮放比例平方成反比。王與蔡[9]針對平鑼聲音特性與振動分析，探討民俗樂器-平鑼的振動聲音頻率之特性，並以有限元素分析建構模型，進行模態分析取得模型數據。配合實驗模態分析測量出頻率響應，得知在不同敲擊點與自然頻率之間是有相對應的關係。Chaigne, and Doutaut[10]以木棒敲擊木琴條，得時間域與頻率域之振動情形來探討木琴條與木棒兩者之關係，以 Euler-Bernoulli 方程式建構理論木琴條之模型，木琴條定義為線性彈性體、邊界條件為自由邊界。在與實驗量測作比較。最後得知木琴條有著厚度或截面不均勻之情形，因此與實驗不相符。Labuschagne *et al.*[11]在音色感知的研究中，以6名聽覺



正常的人做為對象並進行聲音的主觀感覺實驗，發現藉由對數上升時間、持續衰減率、頻譜質心、頻譜不規則度，4個影響音色特性的變數，可以完全控制頻譜參數之方法。

本文透過聲音量測軟體對竹製打擊樂器進行聲音量測，實驗規劃在量測從 C5 到 F6 共具有 12 個音階的竹管每一個竹管受敲擊時的時間域響應，進而可獲得聲音功率頻譜，以探討敲擊聲音的頻譜特性。針對每一個竹管，以三個指標包括：音準、音色、及持續度，進行聲音特性探討。未來將做為與竹製相關打擊樂器之聲音品質依據及參考。

2. 竹製樂器竹音管量測

2.1 竹製樂器基本介紹

圖 1 為竹製打擊樂器示意圖，本竹製打擊樂器由 12 支音管所構成，圖 2 為竹製打擊樂器之 C6、G7 竹音管結構示意圖，表 1 為最大與最小竹管之結構尺寸表，並由表 1 得知結構尺寸最長音階為 C6 長度 A:235mm，直徑 D:17.7mm，切片長度 B:110.5mm，切片厚度 C:8mm，結構尺寸最短音階為 F7 長度 A:102.4mm，直徑 D:7.6mm，切片長度 B:53.8mm，切片厚度 C:4.9mm。

2.2 竹製樂器之量測方式

圖 3 為實驗量測架結構圖，本實驗使用敲擊棒敲擊竹琴，並以麥克風作為感測器與利用自行開發的聲音頻譜分析軟體 SVM，進行聲音量測及分析。

圖 4 為聲音頻譜分析軟體之設定介面，實驗進行前，需先將軟體進行初始設定，並在主選單選擇實際量測模式，輸出模式選擇手動輸入，以便在儲存原始聲音時較為便利，其竹琴敲擊時的聲音持續度並不高，所以量測時間上設定為兩秒，設定完成即可進行實驗量測。測得聲音訊號在進行頻譜分析前，我們先將平均次數設為 2 次，並由時間域中第一個最大振幅前之時間位置做為頻譜分析的開始時間，由於麥克風並無靈敏度，所以 dB 值則以為相對 dB 作為表示，完成以上設定即可進行頻譜分析。透過頻率域圖中可發現頻寬固定為 0~20000Hz，大部份聲音之發生頻率約為低頻部分，所以需在音色頻寬範圍，放大頻率域使發生頻率之峰值較為明顯，並將頻寬範圍設定 0~10000Hz。

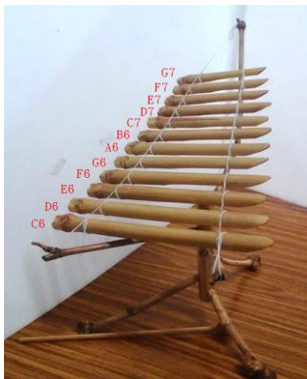


圖 1 竹製打擊樂器示意圖

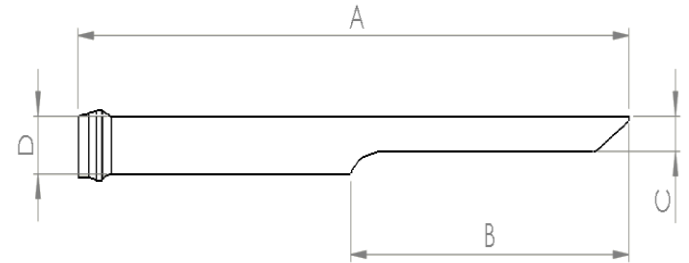


圖 2 竹製打擊樂器之結構示意圖

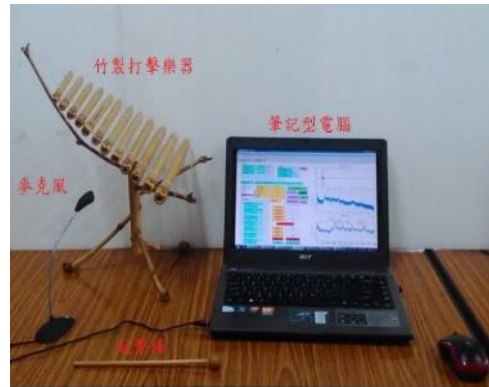


圖 3 實驗量測架構圖

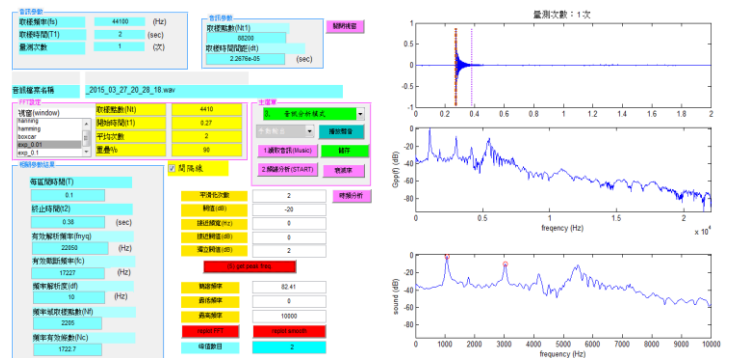


圖 4 聲音頻譜分析軟體之設定介面

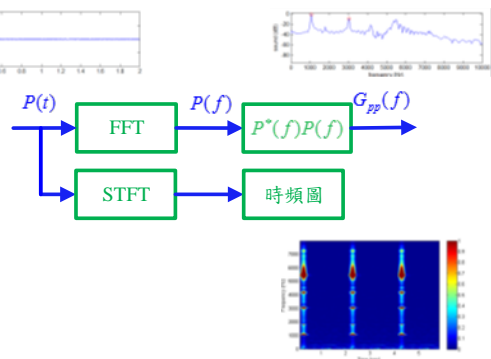


圖 5 竹製打擊樂器實驗量測分析之系統方塊圖

3. 竹製打擊樂器單一音管之聲音特性

3.1 音準、音色及持續度介紹

本文透過聲音量測軟體對竹製打擊樂器進行聲音量測，進而分析竹製打擊樂器之聲音特性，並探討音準、音色、持續度做為單一音管之實驗依據。

- (1). 音準：本實驗是由量測到聲音的第一個峰值頻率進行探討，而基音頻率在±0.34%以內代表音準質優良，而音階頻率又可以[12]得知下列方程式：

$$P_n = P_a \times 2^{(n-a)/12} \quad (1)$$

其 P_n 為任意音階之基音頻率，並以 P_a 為基準頻率，舉例若已知 A4 音階頻率為 440Hz，若想得知 C6 之音階頻率，假設得知 A4 音階為第 69 個音階，其 C6 音階則為 84 個音階，則獲得以下列計算式子：

$$P_{84} = 440 \times 2^{(84-69)/12} = 1046.50 \text{ Hz} \quad (1-1)$$

並求得 P_{84} 之音階頻率為 1046.50Hz，可透過相同之計算方法求得其他音階頻率。並透過[13]得知音準方程式：

$$b = a \times 2^{n/1200} \quad (2)$$

其中 b 為音階頻率，a 為已知音階頻率，n 為間格的分音，而人所能分辨的音分範圍約為 5~6 cents 左右。若以 C6 音階為例，其基音頻率支容許誤差值可計算如下：

$$b_1 = 1046.50 \times 2^{-6/1200} = 1042.882 \text{ Hz} \quad (2-1)$$

$$b_2 = 1046.50 \times 2^{6/1200} = 1050.135 \text{ Hz} \quad (2-2)$$

$$[(b_{1,2} - a) \div a] \times 100 = \pm 0.347\% \quad (2-3)$$

並由 2-3 之計算式得知頻率之容許誤差為±0.347%，其計算方程式用於其他音階頻率。

- (2). 音色：音色的判別取決於泛音，除了第一個基音之外，還會有許多頻率不同的泛音，而這些泛音會改變其音色的不同，使人們能夠辨別出不同樂器所發出來的聲音。
- (3). 持續度：指聲音持續時間的長短，本實驗以 C6 音階做為樣本進行衰減率之探討，衰減率方程式如下：

$$p(t) = e^{-\sigma t} \quad (3)$$

其中 σ 為衰減函數、 $p(t)$ 為時間函數，並透過已上方程式計算得知衰減率值。圖 6 為衰減率之聲音頻譜示意圖，圖 6(a) 為時間響應示意圖，並透過將時間函數平方根求得圖 6(b) 時間函數之平方根響應示意圖，如圖之對數衰減函數如下：

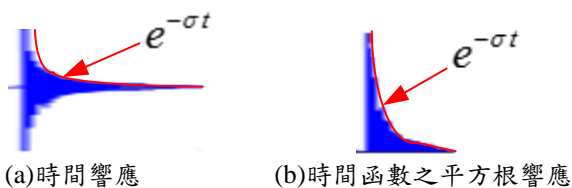


圖 6 衰減率之聲音頻譜示意圖

3.2 竹製打擊樂器 C6 音管之聲音特性

本實驗使用敲擊棒敲擊竹琴，並以麥克風收音與聲音頻譜分析軟體，進行聲音量測及分析，表 2 為竹製打擊樂器 C6 音管之聲音頻譜圖，針對 C6 竹管敲擊實驗數據得到時間域、頻率域、衰減率，在頻率域的部分以 1Hz 之頻率解析度進行分析，因 1Hz 的峰值較不明顯，分別以不同頻率解析度 5Hz、10Hz 進行頻率域比較，發現到由 10Hz 的峰值較明顯。則後續之相關實驗可以 10Hz 之頻率做為參考值。並由衰減率圖可得知此竹琴片之衰減率為 55.89 並不是很好，可能之原因為竹琴片為手工製造而導致材質好壞的問題或是竹子本身之材料特性的因素。

4. 竹製打擊樂器之聲音特性探討

本文打擊樂器為有調竹製打擊樂器，利用聲音量測軟體對整組一共 12 支之竹製打擊樂器在敲擊後所發出的聲音進行量測，以得到該聲音頻譜，定義竹製打擊樂器之聲音特性，主要以音準、音色、持續度進行探討。

4.1 打擊後之音準分析

音準為結構的第一個自然頻率，即發聲頻率。本節對 12 個竹管量測後的音準進行探討，表 2 為竹製打擊樂器之自然頻率總，可知有 F6 與 C7 兩個音階頻率誤差有在±0.34%以內，其餘所測得均超出標準值，可能原因為竹製樂器為手工製造，在製造過程中會因製作者的個人音準而有不同的差異，以致於此竹製樂器量測上的誤差。

表 1 竹製打擊樂器 C6 音管之聲音頻譜圖

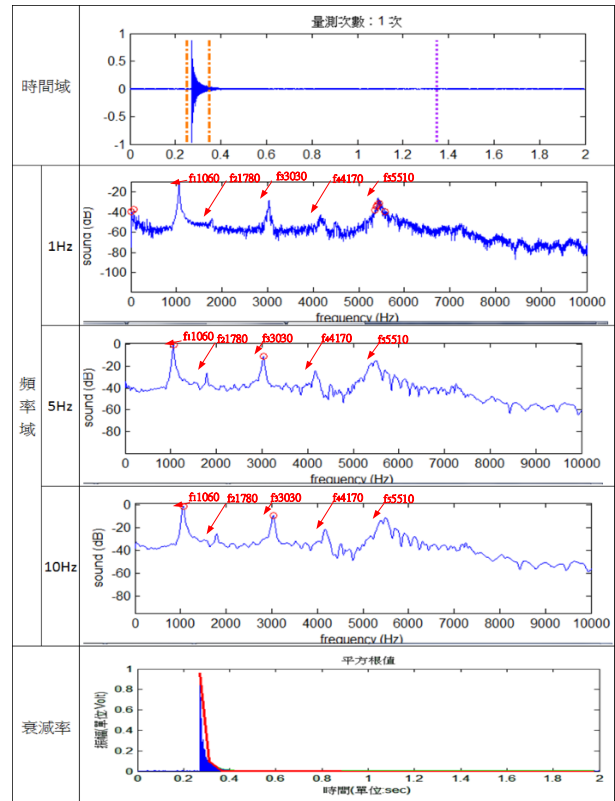


表 2 竹製打擊樂器之自然頻率總

音階	測得基音頻率(Hz)	音階頻率(Hz)	誤差(%)
C6	1060	1046.50	1.29
D6	1190	1174.66	1.36
E6	1340	1318.51	1.62
F6	1401	1396.91	0.29
G6	1585	1567.98	1.08
A6	1779	1760.00	1.07
B6	2021	1975.53	2.3
C7	2088	2093.00	0.23
D7	2368	2349.32	0.79
E7	2654	2637.02	0.64
F7	2858	2793.83	2.29
G7	3187	3135.96	1.62

4.2 打擊後之音色分析

音色為泛音頻率，結構有第二個頻率或以上。由實驗得知，竹音管的基音頻率與泛音頻率有倍頻關係，表 3 為竹製打擊樂器之頻率數比與衰減率總表，由表可知除了 C7 只有 1:2.19 的倍頻關係，其他竹音管有 1:2.61 到 1:2.85 的倍頻關係，C6、D6、E6、F6、G6 竹音管的倍頻比較大，各為 1:5.19、1:4.13、1:4.14、1:5.02、1:4.79，有呈現接近簡諧倍頻音之效果。

4.3 打擊後聲音持續度分析

聲音的持續度為敲擊後聲音長短，本節對敲擊竹管之聲音衰減率進行探討，由表 3 可發現竹琴的衰減率最大為 121.79，竹琴平均衰減率為 53.56，其中音階 C7 竹管的衰減率最大，可能因為阻尼比過大所導致，由於阻尼比較大以至聲音振動幅度下降較快，進而使所量測之衰減率偏大，所以聲音持續性不持久。

4.4 時頻圖

圖 7 為竹製打擊樂器各音階之時頻圖，上區塊為 C6 到 G7 之音訊，下區塊為所對應之時頻圖，由圖中可明顯的看出 C6 至 G7 之基音有逐漸往上的趨勢，其表示聲音愈來愈高亢，而在基音上之所有點均為泛音，圖中顯示出各泛音都很分散，D6 至 F6 之第一個與第二個泛音呈倍頻關係較明顯，頻率有逐漸往上之趨勢，其中 E6 音階處有兩處顏色較深之區域，其代表為泛音聲壓較大。

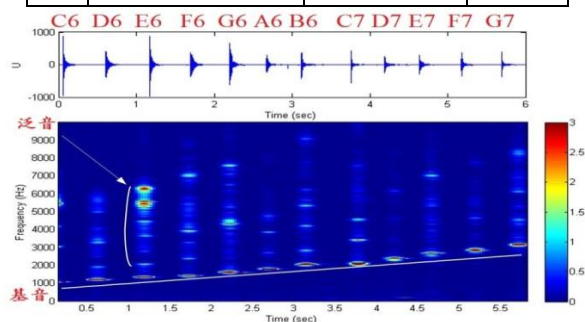


圖 7 竹製打擊樂器各音階之時頻圖

表 3 竹製打擊樂器之頻率數比與衰減率總表

音階	頻率數	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	衰減率	音階	f_1	f_2	f_3	f_4	衰減率
		測得頻率(Hz)	比例	測得頻率(Hz)	比例	測得頻率(Hz)			比例	測得頻率(Hz)	比例		
C6	測得頻率(Hz)	1060	1780	3030	4170	5510	55.89	B6	2021	2796	4160	6182	61.94
	比例	1	1.68	2.85	3.39	5.19			1	1.38	2.05	2.62	
D6	測得頻率(Hz)	1190	1900	3270	4920		30.99	C7	2088	3409	4589		121.79
	比例	1	1.59	2.74	4.13				1	1.63	2.19		
E6	測得頻率(Hz)	1340	2041	3619	4454	5555	57.61	D7	2368	3348	4612	6182	44.03
	比例	1	1.52	2.70	3.32	4.14			1	1.41	1.94	2.61	
F6	測得頻率(Hz)	1401	2369	3256	3916	7046	26.77	E7	2654	5421	6982		30.61
	比例	1	1.69	2.32	2.79	5.02			1	2.04	2.63		
G6	測得頻率(Hz)	1585	4303	7598			37.46	F7	2858	4647	7553		51.48
	比例	1	2.71	4.79					1	1.62	2.64		
A6	測得頻率(Hz)	1779	2693	3874	4766		60.43	G7	3187	4546	6141	8343	63.80

第二十三屆中華民國振動與噪音工程學術研討會 明志科技大學 中華民國一〇四年六月二十七日
The 23rd National Conference on Sound and Vibration, New Taipei City, June 27th, 2015

	比例	1	1.51	2.17	2.67			1	1.42	1.92	2.61	
--	----	---	------	------	------	--	--	---	------	------	------	--

5. 結論

本文利用聲音量測軟體並架設麥克風對竹製打擊樂器打擊之聲音進行量測，得到以下結論。

- (1) 針對本竹製打擊樂器之音準、音色、衰減率為分析量測目標，主要以 C6 音階為量測之目標，其竹管長度為 235mm，寬度為 18.45mm，但因為手工製作，由量測結果得知其音準為不良。
- (2) 音準部分由實驗分析得到，F6、C7 兩個竹管的基音頻率誤差值皆在標準的 $\pm 0.34\%$ ，而其他竹管基音頻率誤差值介於 0.64%~2.3%之間。
- (3) 音色部分由分析得到，竹管之峰值數在 3~5 之間不等，且以 1Hz 之頻率解析度分析得到的頻率域，峰值表現較毛躁不明顯，將頻率解析度更改為 10Hz，則可得到較平整之明顯峰值，可得知以較高頻率解析度對判斷基音峰值與泛音峰值較明顯。
- (4) 衰減率部分由實驗分析得知，所有竹管之衰減率皆大，聲音不持久。
- (5) 由本實驗結果可推測，C6、E6、C7 可能會有倍頻關係，由簡諧倍頻圖可得到各點都有逐漸向上或逐漸現下的傾向，對此即可評斷此三音階有倍頻關係，經由其聲音特性可看出有潛力改善為高品質的打擊聲音，未來可由此量測結果為客觀的數據針對竹製打擊樂器進行進一步的設計

6. 參考文獻

- [1]. 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，「不同打擊樂器聲音特性探討」，*中華民國音響學會第二十四屆學術研討會*，臺北，論文編號：C-10，2011。
- [2]. 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，「古鈸打擊聲音特性之探討」，*中華民國振動與噪音工程學會第 19 屆學術研討會*，彰化，論文編號：B-09，2011。
- [3]. 王栢村，董時沛，徐秀娟，高正賢，「特殊設計簡諧倍頻鐵琴組之音聲品質評估」，*中華民國振動與噪音工程學會第 20 屆學術研討會*，彰化，論文編號：B-04，2012。
- [4]. 徐茂濱，劉耿豪，林昱廷，「甜美的二胡所具備之特性」，*中華民國音響學會第二十四屆學術研討會*，新北市，論文編號：C12，2011。
- [5]. 王栢村，林怡馨，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，*中華民國音響學會年會暨第二十屆音響學會*，臺北，論文編號：C5，2007。
- [6]. 鍾欣樺，徐茂濱，李十三，「二胡的悶之客觀指標的探討」，*中華民國音響學會第二十二屆學術研討會*，新北市，論文編號 A007，2009。
- [7]. 王栢村，簡孝名，2010，「鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證」，*機械計師學刊*，第 3 卷，第 2 期。
- [8]. 王栢村，廖偉廷，「木琴條聲音與振動關聯性及形狀變更設計之探討」，*屏東科技大學暨北京科技大*

學第四屆學術交流研討會，屏東，論文編號：C14，2009。

- [9]. 王栢村，蔡有倫，「平鑼聲音特性與振動分析之探討」，*中華民國力學學會第三十六屆全國力學會議*，桃園，論文編號：F-002，2012。
- [10]. Chaigne, A., and Doutaut, V., "Numerical Simulations of Xylophones. I. Time-domain Modeling of the Vibrating Bars," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 101, No. 1, pp.539-557, 1997.
- [11]. Labuschagne, I. B., & Hanekom, J. J., "Preparation of stimuli for timbre perception studies," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, No. 3, pp. 2256-2267, 2013.

Discussions on Sound Characteristics of Bamboo Percussion Instrument

Bor-Tsuen Wang¹, Chun-han¹ Yu, Guan-Ting Lin¹, Po-shun Yang¹, Yu-Tang Wang¹, Chia-hsien Huang¹, Ying-Huei Wu¹
¹National Pingtung University of Science and Technology Department of Mechanical
²National Nei-Pu Senior Agricultural-Industrial Vocational School of Machinery Division

ABSTRACT

Every type of musical instrument has its own special sound characteristics that can be measured and analyzed to examine its sound quality. This work aims to study the bamboo percussion instrument that is a roughly handmade simple instrument with twelve notes from C6 to G7. Each note of bamboo tube is the hollow cylindrical shell with the special undercut at one end of the tube. The experiments are designed to measure the time domain response of the percussion sound for each bamboo tube by striking on the tube as normal play. The auto power sound spectra can be obtained to examine the frequency contents of the percussion sound. Three indices, including the pitch frequency, tone color and continuity, are presented for each note of bamboo tube. The first fundamental natural frequency of the bamboo tube is referred to the pitch frequency such that the fundamental frequency should be consistent with the standard frequency for certain musical note. Results show the pitch frequency errors for all tubes are about 0.57-2.29%. In term of the required pitch frequency accuracy within 0.3456%, the bamboo tubes reveal bad sound quality. The tone color can be characterized by the overtone frequencies, i.e. the higher modal frequencies of each

bamboo tube. There are several well separated vibration modes of the percussion sound. And, the frequency ratios between the overtone frequencies over the fundamental pitch frequency can be observed with near integer values. This indicates this type of geometry can be potentially improved to get a better sound quality design with harmonic sound effect. The continuity is defined by the decay rate of time response. Because of the nature of bamboo material, the percussion sound is short and with high decay rates in general. This work investigates the simple handmade bamboo percussion instrument and shows the potential of making the similar geometry design of cylindrical shell tube with better sound quality. The computer aided engineering technique can be adopted to perform structural modal analysis and achieve the new design of percussion instrument.

Keywords: sound characteristic, fundamental frequency, pitch frequency, tone color, decay rate

