

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

佳作

080111

風「聲」「Hz」喚

—不同桌球旋球驅動球桌基頻振動之研究

學校名稱：新北市板橋區沙崙國民小學

作者： 小六 李擘霆 小六 石芮綺 小六 詹糧有 小六 張晴茹	指導老師： 黃淳霖 沈昱穎
---	---------------------

關鍵詞：桌球、聲音、基頻

摘要

從不同旋球撞擊球桌的聲音會有差異，利用發球機進行桌球選手的實測，發現選手分辨不同旋球之撞擊聲與年齡及練習時數有關。

我們將錄製的撞擊聲經過 Godwave 及 Origin 進行頻譜分析，發現球桌振動的基頻有 133Hz、153Hz、180 Hz、200 Hz，並判斷音色及音高略有不同。

我們試著找影響球桌基頻振幅組成的原因，測量了不同的球速、飛行距離及球桌角度的撞擊聲，發現正向力不同及撞擊位置不同，也會影響球桌基頻的驅動，但發現並無絕對關係。最後量測球桌邊長，利用公式 $v = f \times \lambda$ 代入計算，發現基頻與球桌特徵長度相符，並且推論旋轉方向與特徵長度方向為平行，可得之兩者有顯著關係。

壹、研究動機

我們發現旋轉方向在一次的桌球課程中，體育老師正在示範如何擊出不同旋轉方式的球。就在老師示範到一半的時候，我們發現了這些不同旋轉方式的發球，撞到球桌之後發出的聲音好像不太一樣，但是卻有些同學認為聽起來都一樣。

五年級的課程中有上過「聲音是由物體振動產生的」，我們想知道不同方向的旋球是否真的能驅使球桌產生的聲音有所不同呢？因此決定透過實驗來探討不同旋轉方式的桌球是否能驅動球桌基頻振動。

重要性:

實驗中會影響到桌球不只是不同旋轉方向，而是撞擊到球桌的位置不同也會有所影響。因為球桌是不均勻材質，且有不同的節點，最後影響到基頻產生不同的振幅，最後影響到不同旋球產生的聲音。

貳、研究目的

- 一、調查桌球選手是否能判別不同旋球的撞擊聲
- 二、探討不同旋球使球桌振動的基頻組成
- 三、探討球速、飛行距離與球桌角度對驅動基頻振動的影響
- 四、不同旋球撞擊時的接觸面積與接觸時間與基頻的關係
- 五、探討球桌特徵長度與驅動球桌基頻振動的關係

參、研究架構圖



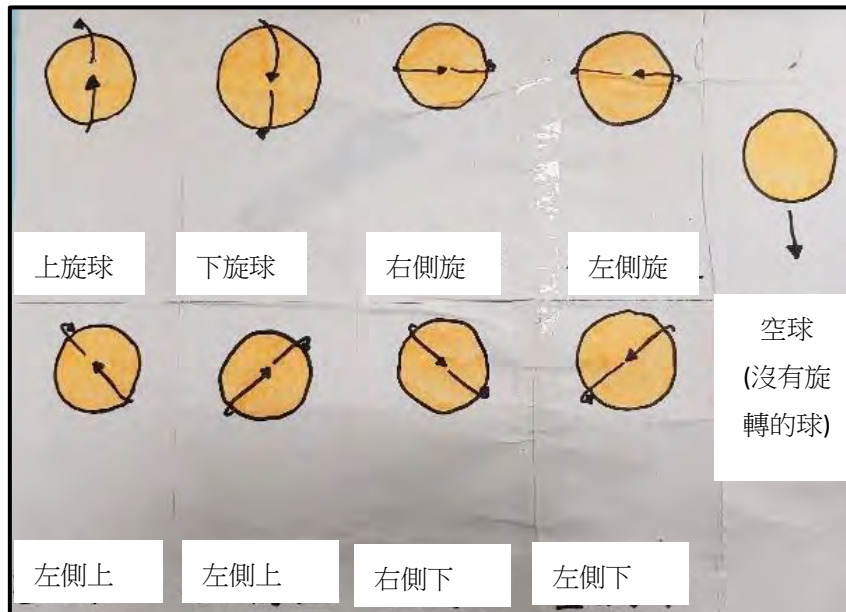
肆、研究設備及器材

白色乒乓球	數顆	手機軟體 iNVH	x 1
指向性麥克風及 DV	x 1	桌球發球機	x 1
電腦 GoldWave 軟體	x 1	Google 表單設計程式	x 1
電腦 Origin2018 軟體	x 1	球拍	x 1
球桌	x 1		

伍、文獻與名詞解釋

一、不同旋轉方向的桌球定義

以發球者視角，朝特定方向旋轉的球為旋球，且撞擊後反彈的方向會與桌球旋轉方向方向相反。例如發球者視角為向上旋轉的旋球，撞擊球桌後會朝下反彈，稱為上旋球。而空球是幾乎沒旋轉的球。



[圖 1]八種旋球與空球示意圖

二、從以撞擊聲音評估高爾夫擊球之表現這篇文章得知音高及音色的定義

在此篇研究中的名詞解釋提到「音高為由麥克風蒐集到的聲音訊號，經 FFT 傅立葉轉換後，在頻率域所產生的第一個最大峰值得頻率與強度。」以及「音色為由麥克風蒐集到的聲音訊號，經 FFT 傅立葉轉換後，在頻率域所產生的週期性泛音與基音(即第一個最大峰值)強度比例，即泛音衰減率。」

因我們想要研究音色及音高是否可成為桌球選手的判斷依據，故使用此研究的定義。

陸、研究過程

一、研究限制

1.指向性麥克風

指向性麥克風因有過濾雜音功能，會過濾 60Hz 以下之頻率，故本研究的頻譜圖 60Hz 以下不列入討論。

2.背景音難以完全排除

本研究盡量使用封閉的視聽教室，且周圍牆壁為吸音牆。除此之外為了減少其他背景音，我們還在發球機及球桌周圍圍了一圈隔音布，盡量減少錄製到撞擊聲以外的雜音。而由於桌球的發射為球精準，使用發球機發球，必定為錄製到機器運轉聲，所以我們為了撞擊聲頻譜的精準，也分析背景音的頻譜，並將撞擊聲減掉背景音，降低機器的干擾，但也未能完全消除，此為本研究的限制。

3.發球機發射的撞擊位置無法完全相同

研究中盡量將不變變因保持相同，但機器也會有誤差所在，所以發球機發射桌球後的撞擊位置也會有微小的不同。

二、前置實驗-指向性麥克風效果測試

為了減少雜音干擾，我們決定使用指向性麥克風進行撞擊聲的錄製，但怕會反而對想錄製的聲音被過濾，所以先針對指向性麥克風進行以下測試:

(一) 撞擊聲位於指向性麥克風收音口前後效果測試。

1.研究步驟

- ①將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面前方，並錄製下來。
- ②將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面後方，並錄製下來
- ③將錄製下來的音檔用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較。

2.結果及討論:

我們發現撞擊位置在麥克風收音口前後的頻率相同，但是振幅不同，撞擊位置在麥

克風收音口前的平均振幅是 47.4，而在收音口後的平均振幅是 34.0，可以看出撞擊位置在收音口前的平均振幅較大。

(二)指向性麥克風上的 2 種模式(Low Cut，Norm)效果測試

1.研究步驟

- ①將麥克風的模式切換到 Low Cut 並將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面，然後錄製下來。
- ②將麥克風的模式切換到 Norm 並將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面，然後錄製下來。
- ③將錄製下來的音檔用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較。

2.結果及討論

我們將模式 Low Cut 和 Norm 進行頻率和振幅的分析比較，發現兩者的頻率相同，但是模式 Low Cut 的頻率，振幅會被減弱，因此桌球撞擊聲的低頻率會被減弱，所以決定用模式 Norm

(三) 麥克風是否裝降噪毛效果測試

1.研究步驟

- ①將降噪毛裝上麥克風，並將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面，然後錄製下來。
- ②拿掉降噪毛，將手放開讓空球自由落下撞擊接觸面，然後錄製下來。
- ③將錄製下來的音檔用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較。

2.結果及討論:

我們將有裝毛和沒毛的麥克風進行頻率，振幅比較，發現振幅頻率幾乎一樣，因此，我們決定再用麥克風的使用說明書上的建議，使用降噪毛。

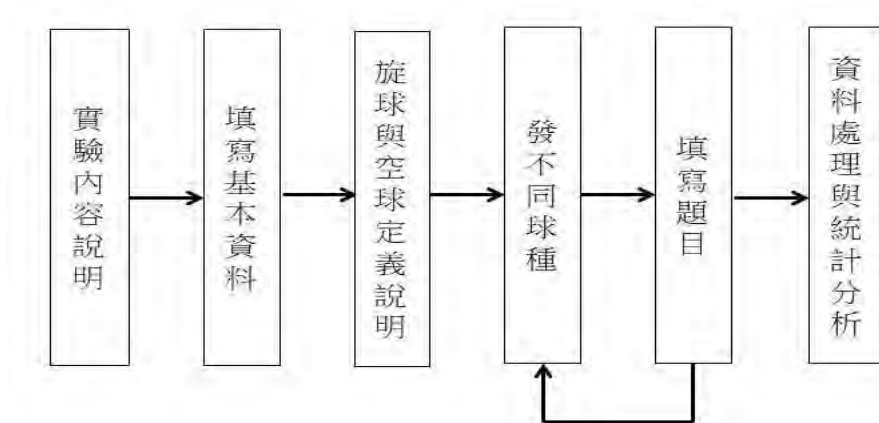


[圖 2]本研究使用的指向性麥克風

三、實驗設計

(一)調查桌球選手是否能判別不同旋球的撞擊聲。

1. 連絡附近學校桌球隊，協助進行問卷調查。
2. 將發球機帶到受訪者的桌球室進行問卷調查。
3. 將發球機調整到能夠撞擊球桌中央的位置，並解說施測進行的方式。
4. 先發射第一種球，請同學聽完撞擊聲後開始填寫問卷(問卷詳見附錄)。
5. 再發射第二種球，請同學聽完撞擊聲後開始填寫問卷。
6. 接下來的步驟以此類推。
7. 使用 Excel 計算百分率並繪製成長條圖。



[圖 3]問卷調查實驗流程圖



[圖 4]解說施測進行方式的情形



[圖 5]聽撞擊聲進行實測的情形

(二) 探討不同旋球使球桌振動的基頻組成

- 1.將發球機的球速轉成 70°。
- 2.發射上旋球撞擊桌球中央，並用攝影機錄製下來，重複 100 次。
- 3.重複步驟 2，錄製不同球種的撞擊聲各 100 次。
- 4.將錄製過後的音檔，用 Goldwave 及 Origin2018 轉成頻譜，進行分析比較



(a)



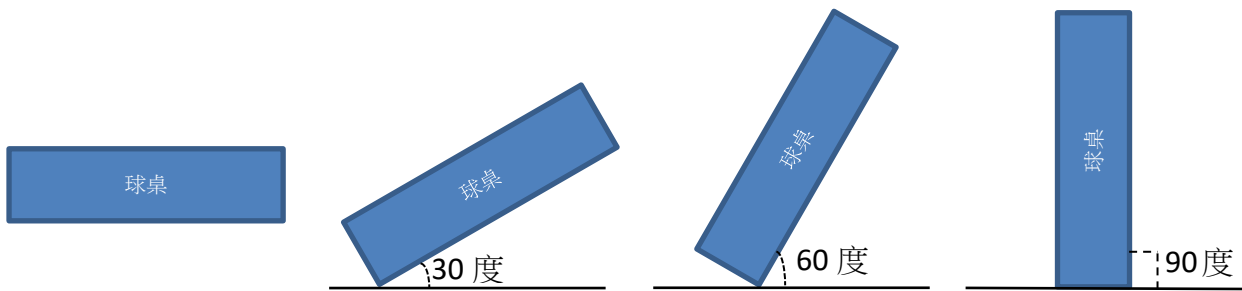
(b)

[圖 6](a)不同旋球撞擊球桌之儀器架設與場地布置實際圖

(b)不同旋球撞擊球拍之儀器架設與場地布置實際圖

(三)探討重力、飛行距離、球速對旋球的撞擊聲頻譜的關係。

- 1.重力對撞擊聲頻譜的影響。
 - ①將發球機的球速轉成 50°。
 - ②球速 50 分別撞擊不同角度的球桌(0 度，30 度，60 度，90 度)並錄製下來，各錄製 100 次。
 - ③將錄製過後的音檔，用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較 進行分析比較



[圖 7]球桌 0 度、30 度、60 度、90 度示意圖



[圖 8]使用傾斜儀量測桌子角度情形(60 度)

2. 桌球速度對撞擊聲頻譜的影響。

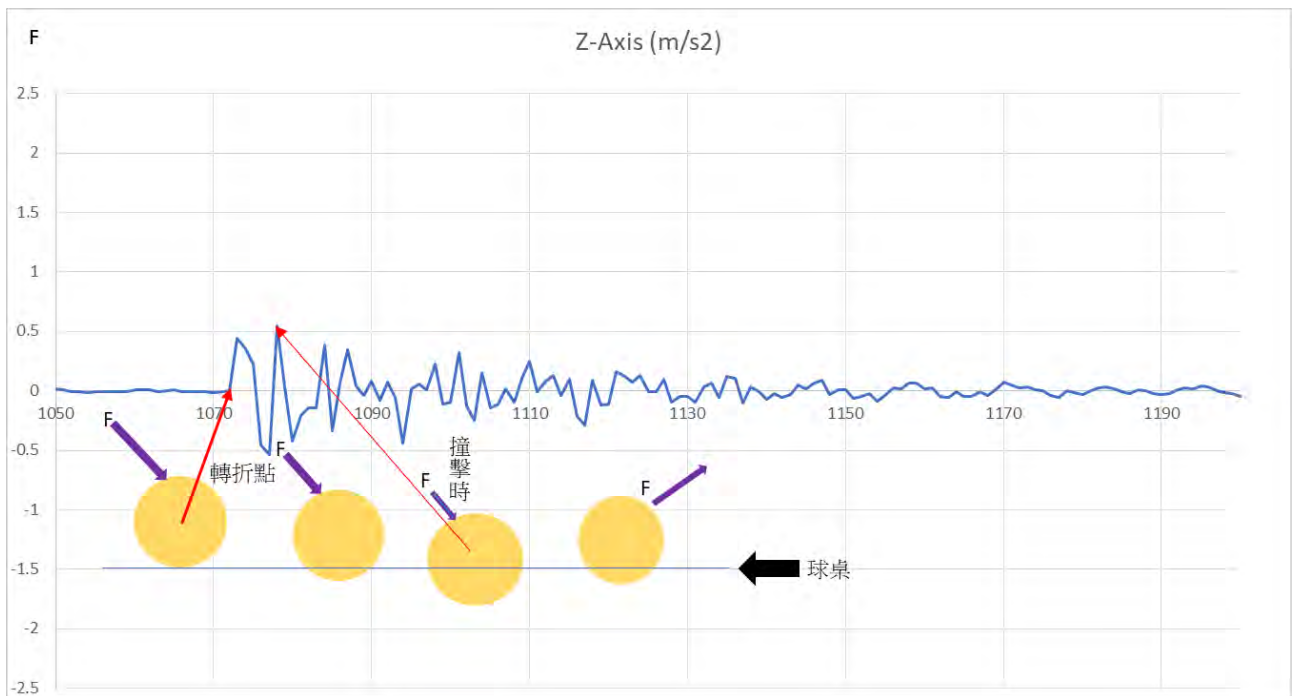
- ① 將球桌調整與地面呈 90 度。
- ② 分別以發球機的球速 1，11，21，31，41，51，61，71，81，91，99 撞擊球桌中央，各 100 次，並錄製下來。
- ③ 將錄製過後的音檔，用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較。

3. 發球機離桌球間距離對撞擊聲頻譜的影響。

- ① 將發球機擺在距離球桌 80cm 處。
- ② 將發球機的球速轉成 50，並發球後錄製撞擊聲，共 100 次。
- ③ 將發球機擺在距離球桌 100cm、120cm、150cm 處，重複步驟 2，各 100 次。
- ④ 將錄製過後的音檔，用 Goldwave，Origin2018 進行分析比較。



[圖 9]實驗設置示意圖



[圖 10]用振波取撞擊時間之示意圖

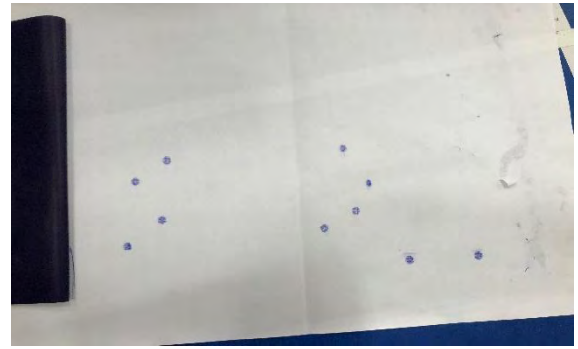
(四)探討造成不同旋球頻率不同的可能因素

1.不同旋球的撞擊面積實驗

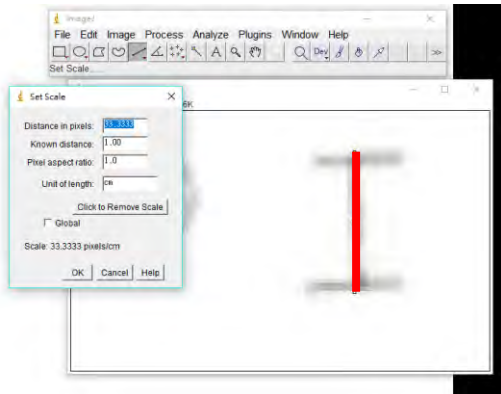
- ①在桌球桌上貼上有複寫紙的白紙，並用不同的旋球撞擊複寫紙(各重複 30 次)。
- ②將撞擊留下的痕跡掃描，並截圖成圖檔。
- ③利用 Image J 校正 1cm 長度。
- ④選取撞擊痕跡的範圍，計算面積。



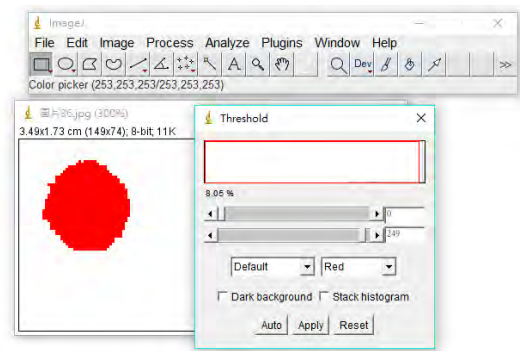
[圖 11]貼有複寫紙的白紙貼於桌子中央



[圖 12]不同旋球撞擊後留下撞擊痕跡



[圖 13]ImageJ 校正 1cm 長度的畫面



[圖 14]選取撞擊面積的範圍

2.不同旋球的撞擊時間實驗

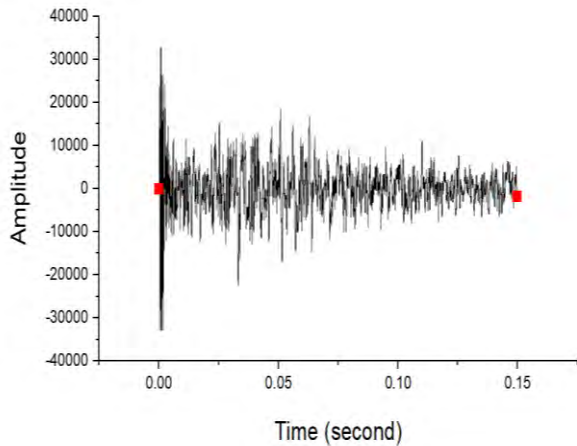
- ①用發球機發出不同旋球撞擊球桌並用 INVH 軟體將球桌的振動記錄下來。
- ②將振動資料匯入電腦並轉成 Excel。
- ③將振動的起始點與振動凹陷最大的點時間相減(此步驟相減是為了得到 2 者間的振動時間)
- ④將取出的時間 $\times 2$ 得出接觸時間(此步驟是為了得到總體振動時間)



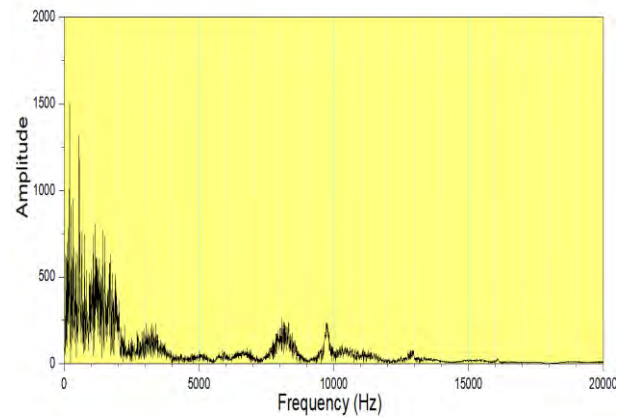
[圖 15]測試振動的手機 APP 軟體 iNVH(右圖為錄製畫面)

四、資料處理過程

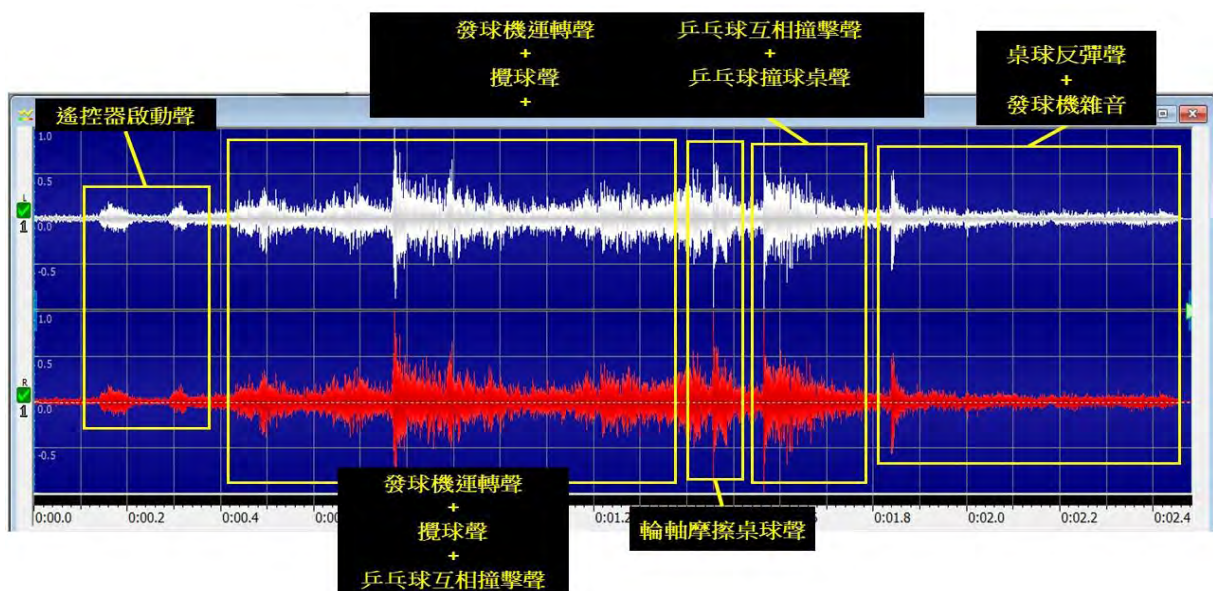
1. 將 DV 內錄好的音檔，傳至電腦。
2. 接下來利用 Goldwave 軟體將錄好的音頻裁減出 0.15 秒的撞擊聲與 0.15 秒的背景音。
3. 利用 Origin2018 軟體將音頻(撞擊聲與背景音)進行傅立葉轉換。
4. 傅立葉轉換之後的振幅和頻率貼至 Excel，將 100 次的撞擊聲振幅數據加總。
5. 將加總後的撞擊聲減背景音的振幅相減(目的是為了盡量去除撞擊聲以外的雜音)。
6. 將處理過後的振幅與頻率製作成頻譜圖。



[圖 16]原始波形圖



[圖 17]FFT 轉換後的頻譜圖



[圖 18]原始錄製音檔的分析

柒、實驗結果與討論

一、桌球選能判別不同旋球的撞擊聲與年齡和練習時數有關

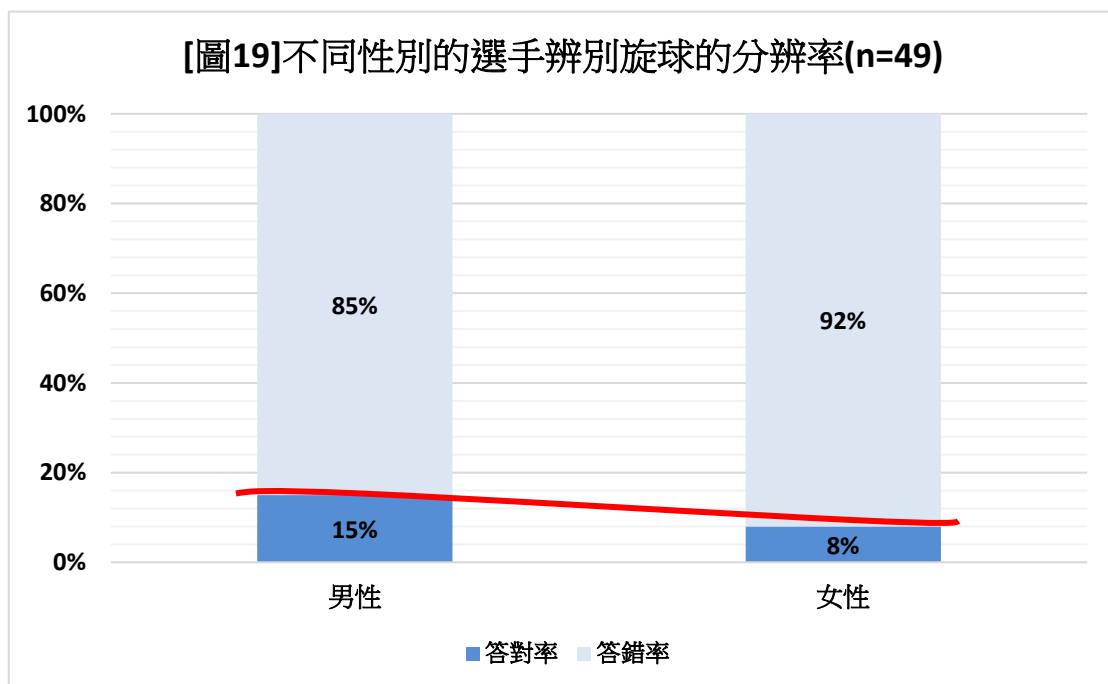
我們透過以下幾個變相(性別、年齡、練習時數、慣用手、球拍握法)，針對桌球選手進行問卷調查。

將問卷調查的結果進行分析之後，我們發現：

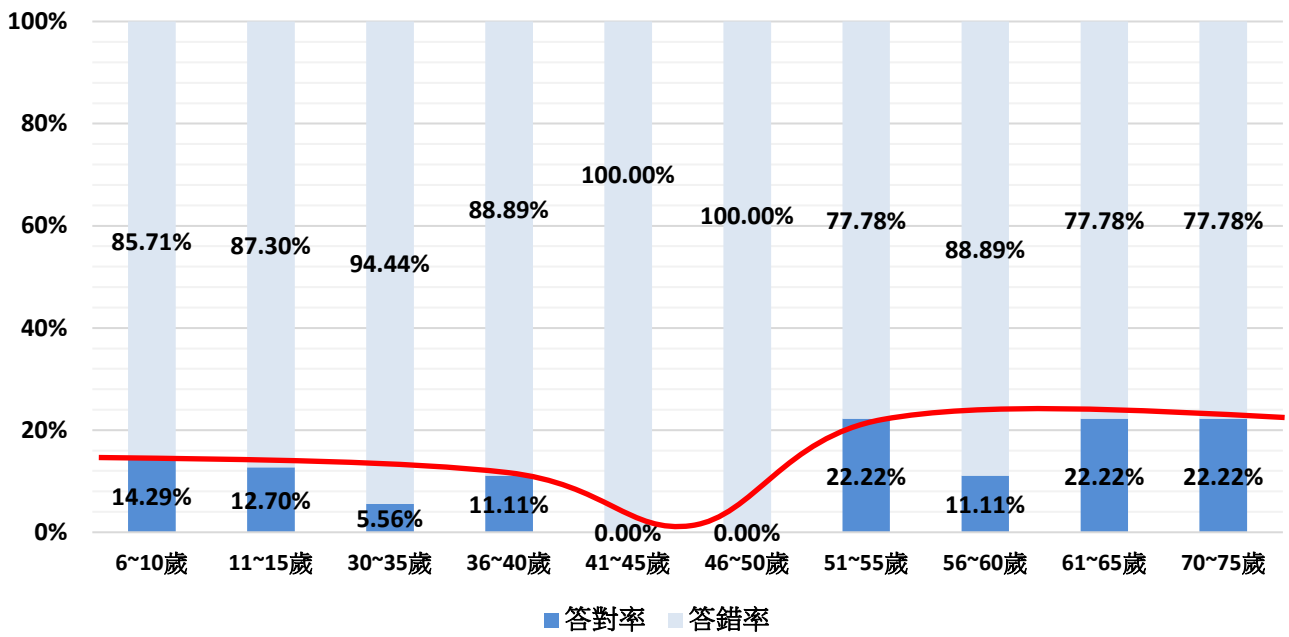
- 1.不同性別、慣用手或是不同球拍握法的選手，在分辨桌球有無旋轉的調查中無明顯的差異。
- 2.不同年齡的選手在分辨桌球有無旋轉的調查中，分辨率從 6 歲開始下降；50 歲後開始上升。
- 3.每周累積不同練習時數的選手在分辨桌球有無旋轉的調查中，分辨率會隨著練習累積時數增加而提高。

透過實驗結果，我們發現透過桌球撞擊聲來判斷桌球無旋轉的答對率，與選手每周累積練習的時間、以及選手年齡具有一定的關係。

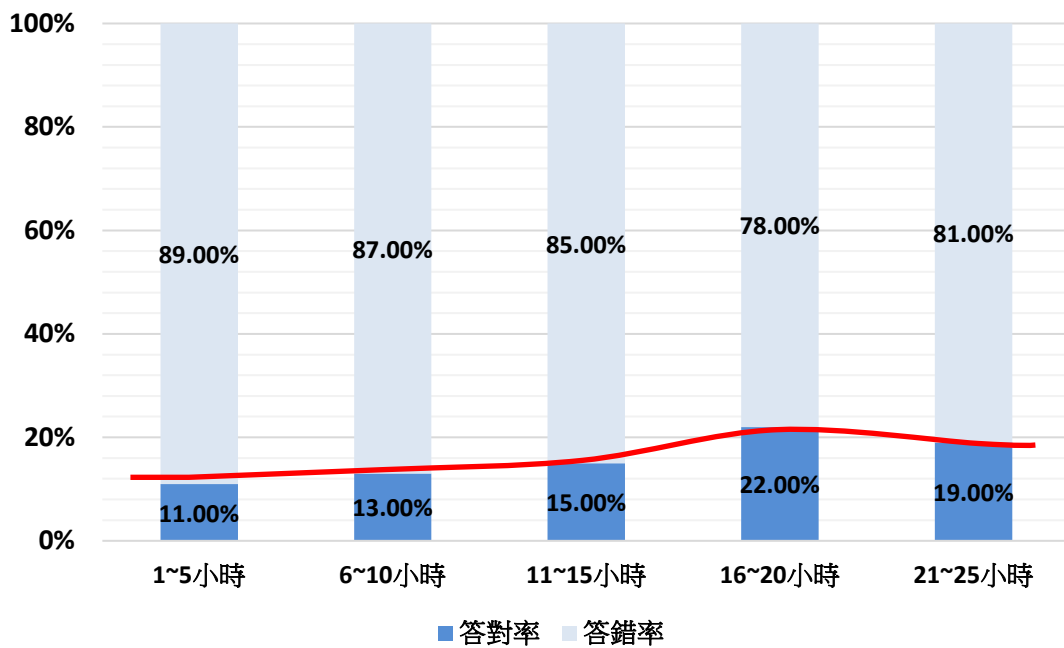
因此我們推論，若能夠適當的增加練習時間，則可以有效的提高辨別桌球有無旋轉的辨別率。



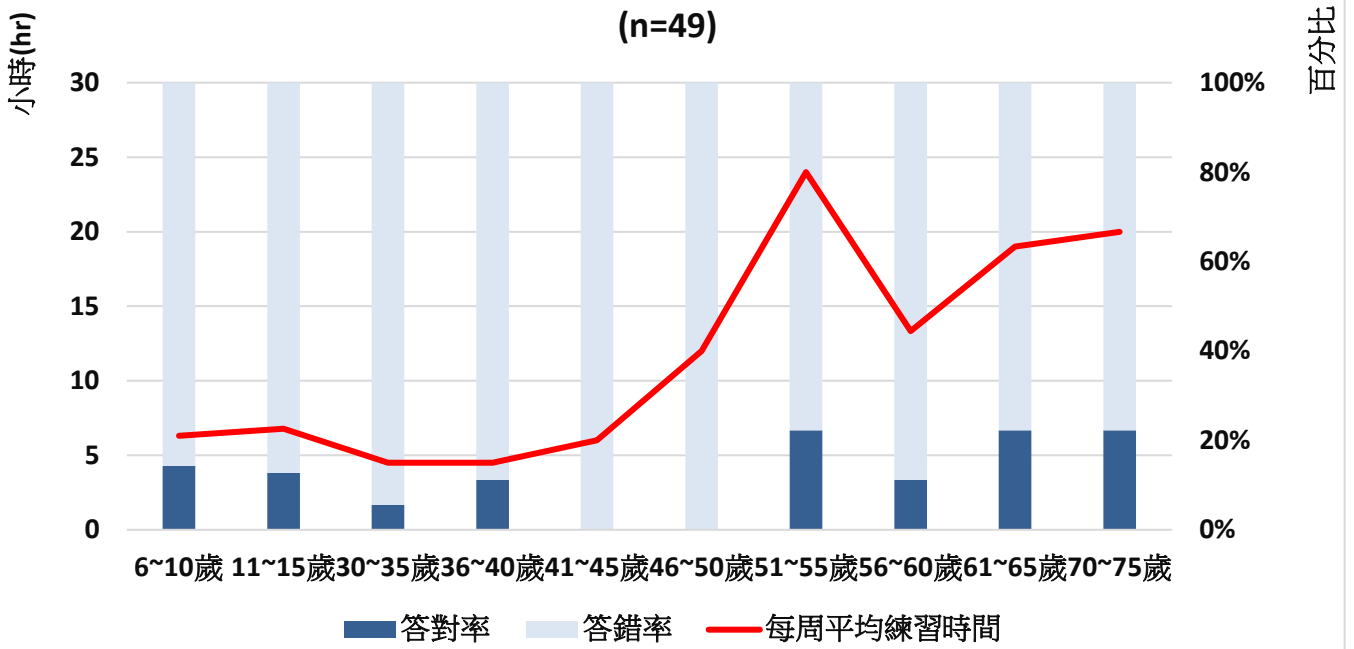
[圖20]不同年齡的選手辨別旋球的分辨率(n=49)



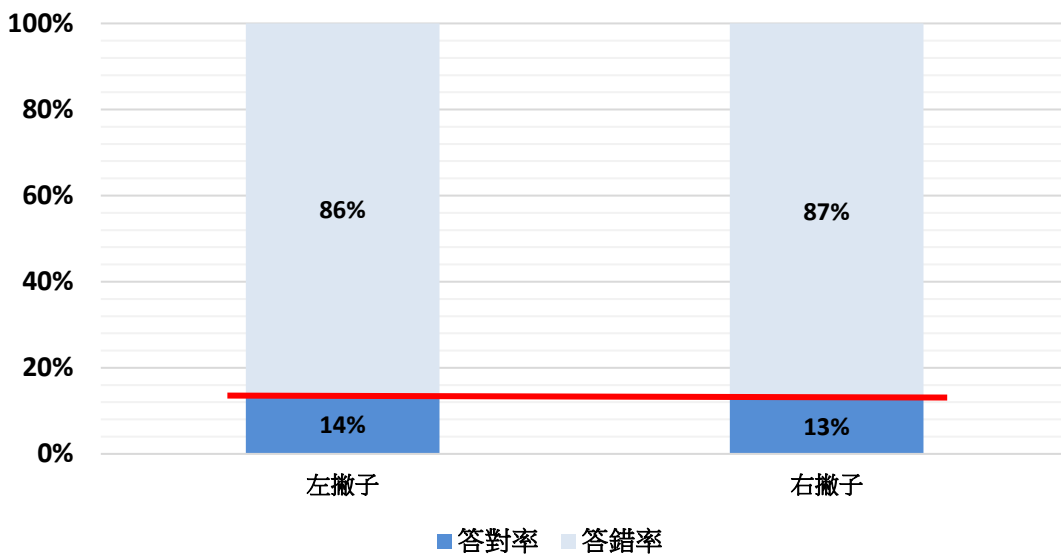
[圖21]每周累積不同練習時數的選手辨別旋球的分辨率(n=49)

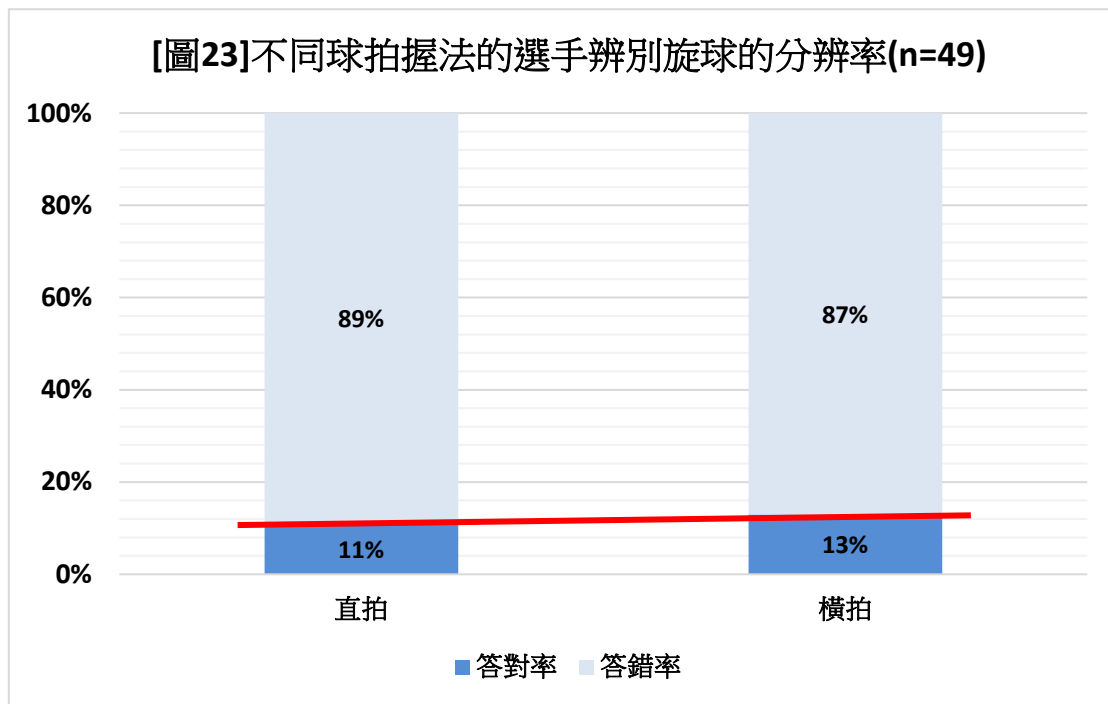


[圖22]不同年齡的選手辨別旋球的分辨率與平均練習時間比較圖 (n=49)



[圖22]不同慣用手的選手辨別旋球的分辨率(n=49)





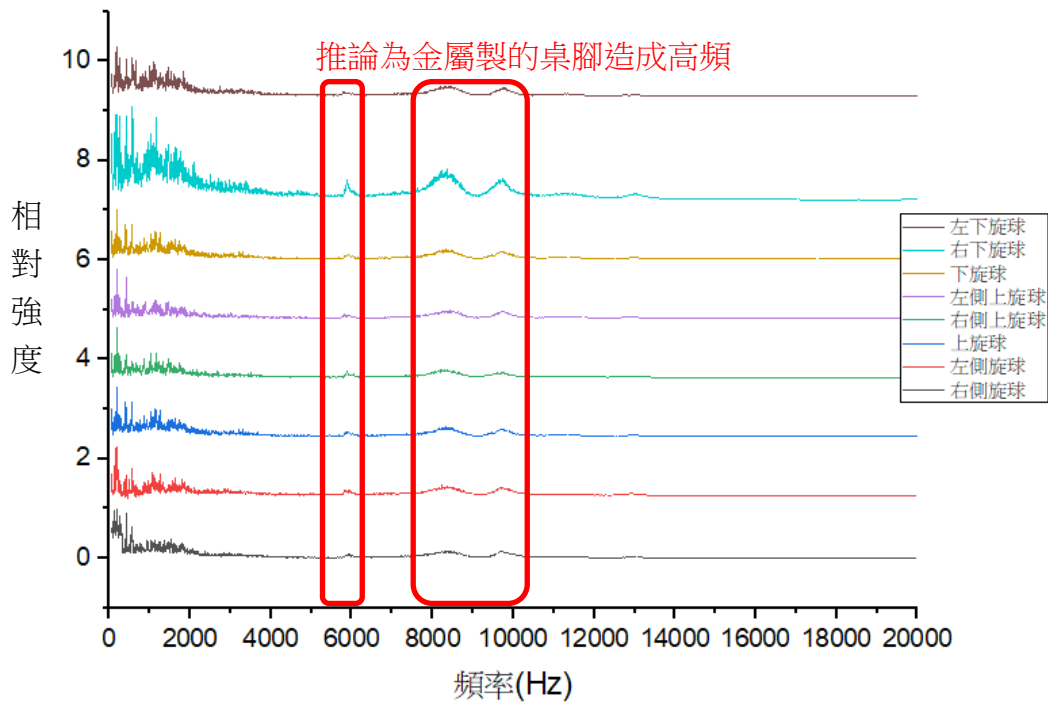
二、探討不同旋球使球桌振動的基頻組成

1.不同旋球撞擊聲的基頻組成為 133Hz、153Hz、180Hz 及 200Hz

由[圖]可明顯看出較大振幅大約分布在 0-2000Hz、6000Hz 及 8000-10000Hz 這三個區間。

而八種旋球在人耳可聽見的頻率範圍(< 20000 Hz)之頻譜圖，由於球桌連著的桌腳為金屬製(通常為鋁合金)，在金屬傳遞的生波波速很高(鋁合金之聲波波速 ≈ 5200 m/s)(<https://webbuilder.asiannet.com/ftp/460/index-09105.htm>)，因此產生的頻率也會比較高，所以我們認為在高頻處以上(>5000 Hz)的峰值，應該是金屬桌腳所產生的。

我們認為撞擊聲為複合音，由多種基頻組成，而由不同旋球的頻譜圖中，可以看出共同振幅較大的頻率約為 133Hz、153Hz、180Hz 及 200Hz。

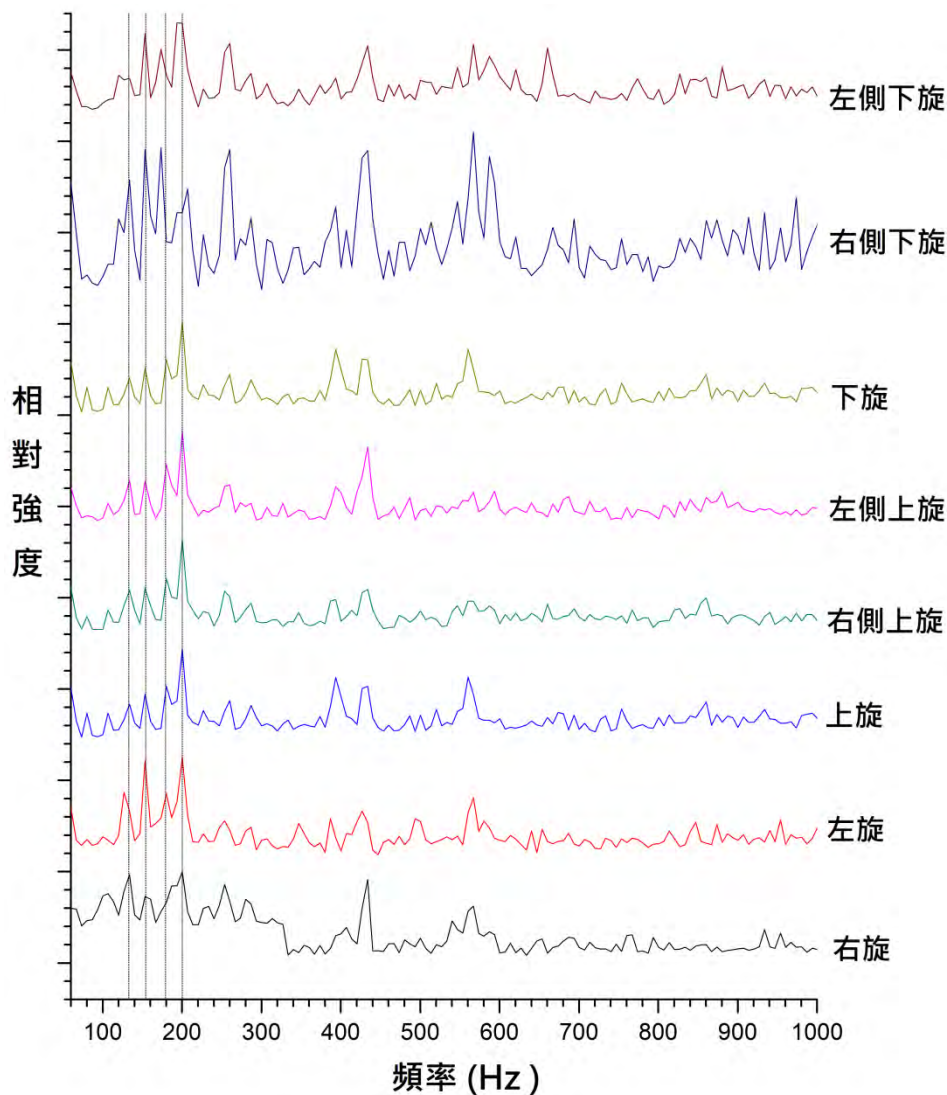


[圖 24] 八種旋球在人耳可聽見的頻率範圍(< 20000 Hz) 之頻譜圖

我們查到桌球桌的桌面材質多為密迪板，是一種合成板，含有塑膠材質，而桌面通常也會塗上膠，因此我們推論在球桌上聲波傳遞的速度會比金屬低很多，所以產生的基頻應該不會太高。依據我們的頻譜[圖 24]，應該是在 1000 Hz 以內。因此，我們做了各種旋球在頻率小於 1000 Hz 範圍之頻譜圖，如[圖 25]所示。

[圖 25]中可以明顯看出除了右下旋球的最大振幅出現在 566 Hz 以外，其他旋球最大振幅皆出現於 200 Hz。

由頻譜圖我們判斷撞擊聲為複合音，由多種基頻與其泛音所組成，從[圖 25]中可以看出共同振幅較大的頻率約為 133 Hz、153 Hz、180 Hz 及 200 Hz，我們認為這四個頻率有可能是球桌所能發出的基頻頻率。



[圖 25]八種旋球 1000Hz 以內的頻譜圖

2.不同基頻差異值約 20Hz，將近樂器音的半音，推論人耳應能判別

我們找出的四個基頻為 133 Hz、153 Hz、180 Hz 及 200 Hz，大約相差 20 Hz，而查過樂器八度音的頻率(如下表)，發現半音的頻率相差約 15Hz，所以推論 20 Hz 人耳應能分辨。

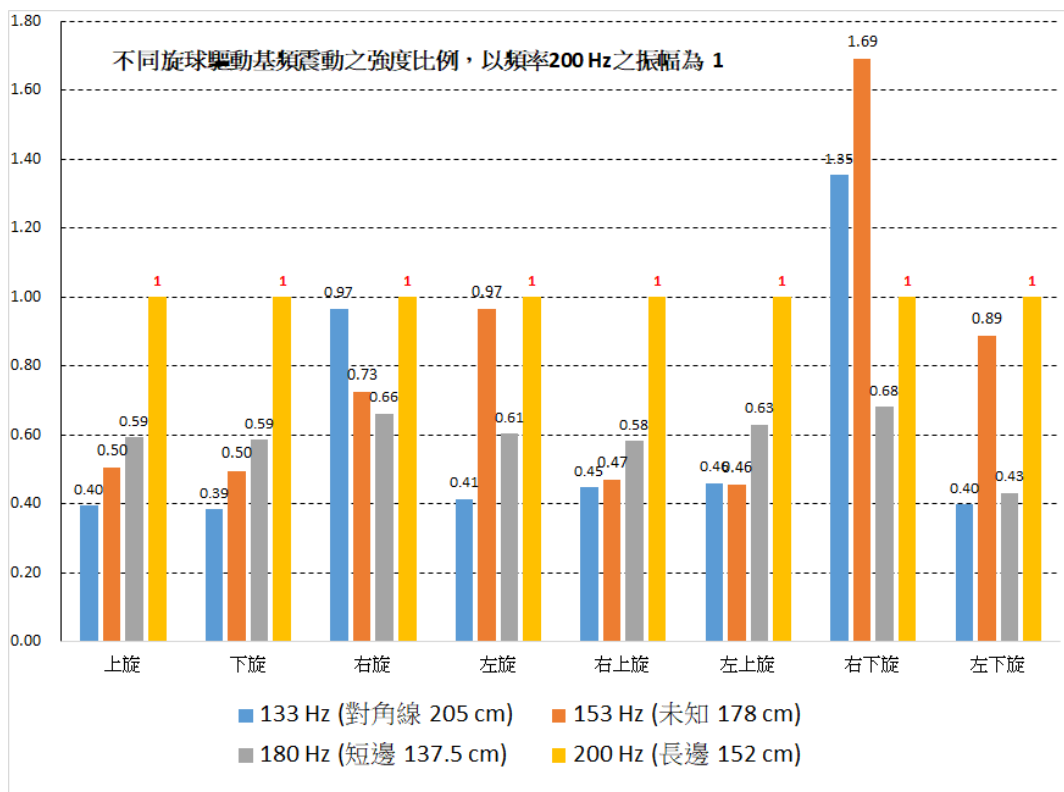
中央音 Do 為 256.00Hz] 半音	Sol 為 383.57Hz] 全音
Do#為 271.22Hz		Sol# 為 406.37Hz	
Re 為 287.35Hz	La 為 430.54Hz		
Re#為 304.44Hz	La# 為 456.14Hz		
Mi 為 322.54Hz	Si 為 483.26Hz		
Fa 為 341.72Hz	高音 Do 為 512.00Hz		
Fa#為 362.04Hz	(其中#表示升半音)		

[表 26]樂器八度音

因各種旋球 200Hz 明顯振幅較大，所以我們將 200Hz 的振幅定為 1，再計算 133Hz、153Hz、180Hz 的頻率比例，製作呈長條圖(如下圖 27)。由圖中可看出上旋球和下旋球的各個基頻組成率近乎相同，所以我們推論上旋球和下旋其無法依音高判別。

而左旋球和右旋球則較有差別，右旋球的 133Hz 振幅比例較高為 0.97，而左旋球的 153Hz 振幅比例較高為 0.97，皆較左旋球及右旋球的 200Hz 頻率還低，所以推論在聽左右旋球時會受到低頻干擾。

較特別的為右下旋球是 153Hz 比例高達 1.69，左下旋球的 153Hz 比例也較高為 0.89，此兩者差異較大，聲音應該會偏低。



[圖 27]不同旋球驅動基頻振動之強度比例，以頻率 200Hz 振幅為 1

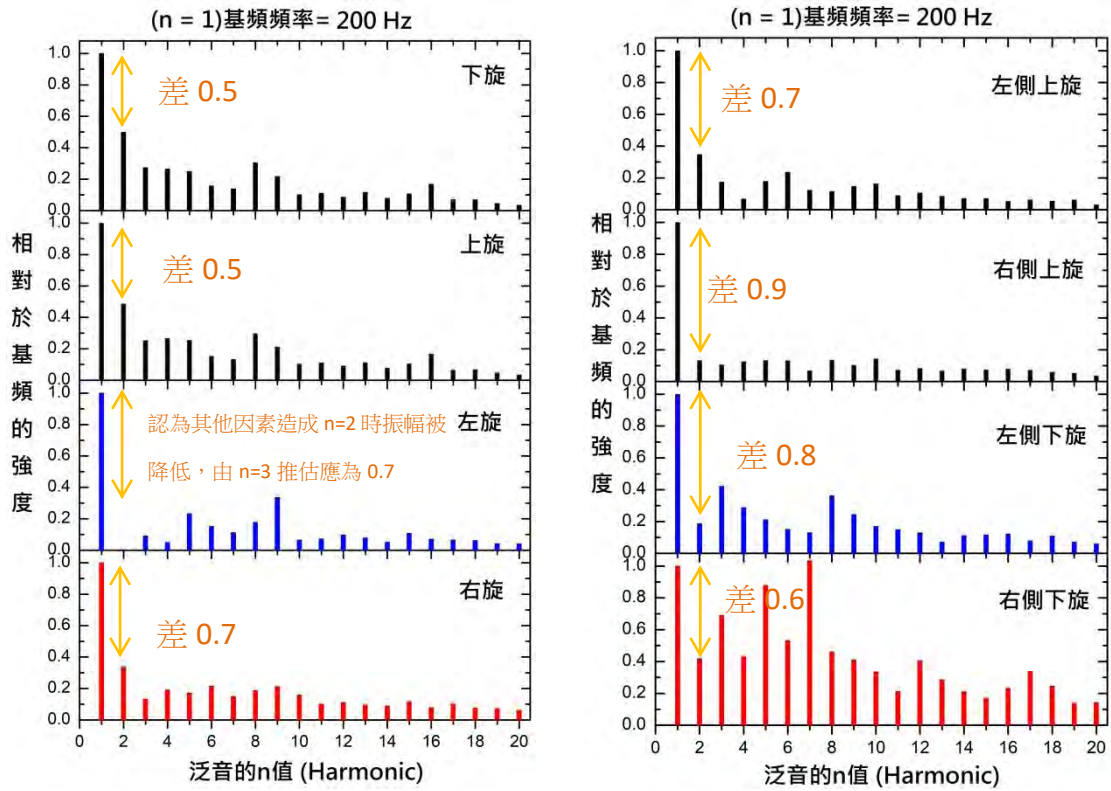
3.不同旋球音色略有不同

我們在訪問時，桌球選手說不同旋球會不同，有時候可以聽桌球撞擊時摩擦的聲音，如果是「扣」一聲代表旋轉的較少，而「抽」則代表旋轉較多，由桌球的選手說法表示不同旋轉的球驅使球桌產生的聲音音色可能有些許不同。

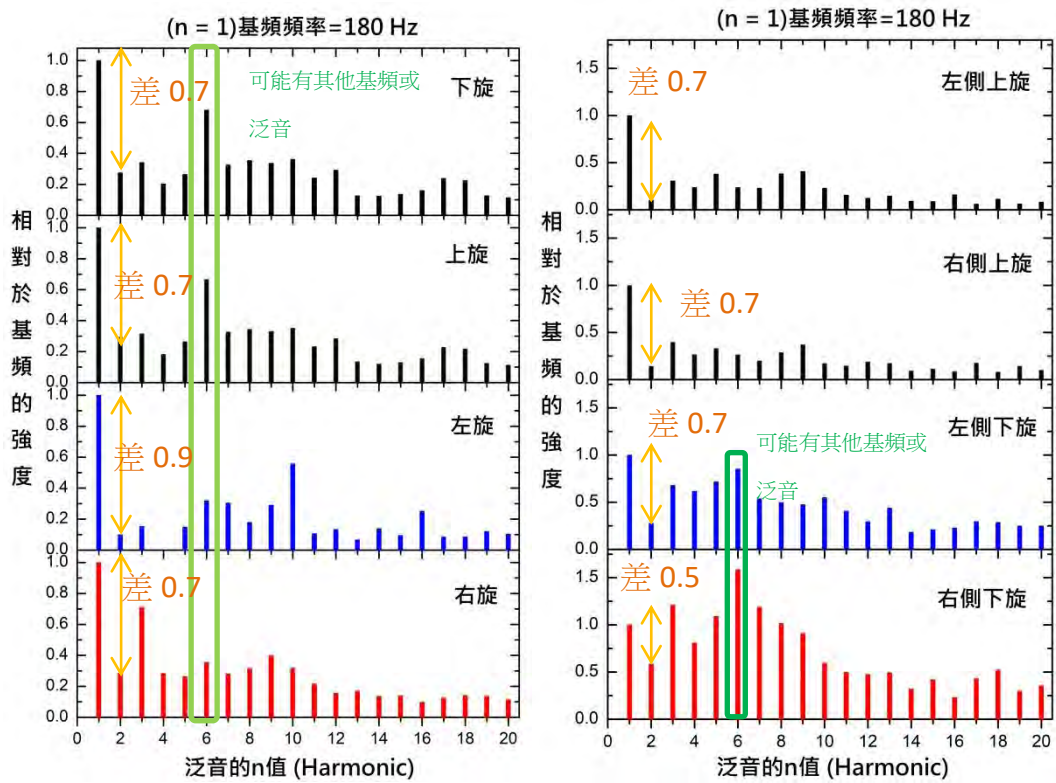
根據文獻探討二，以撞擊聲音評估高爾夫擊球之表現一文中提到「音色為由麥克風蒐集到的聲音訊號，經 FFT 傅立葉轉換後，在頻率域所產生的週期性泛音與基音(即第一個最大峰值)強度比例，即泛音衰減率」，因此我們想探討找到的四種基頻，其泛音振幅與基頻振幅之相對強度關係。

由[圖 28]到[圖 31]我們發現上旋球、下旋球的泛音衰減程度幾乎相同，我們預測左旋

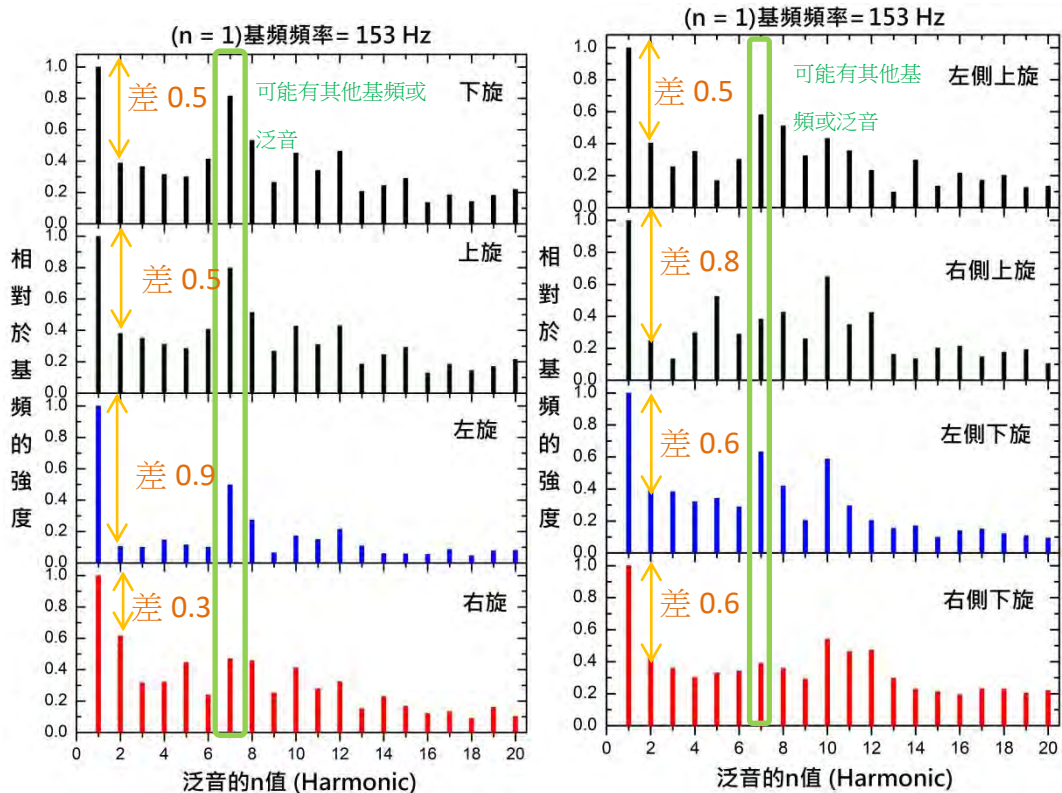
球及右旋球的泛音衰減程度應該也會相似，但左旋球無論在哪個基頻中都看似不太穩定，目前無法判斷影響左旋球的原因。



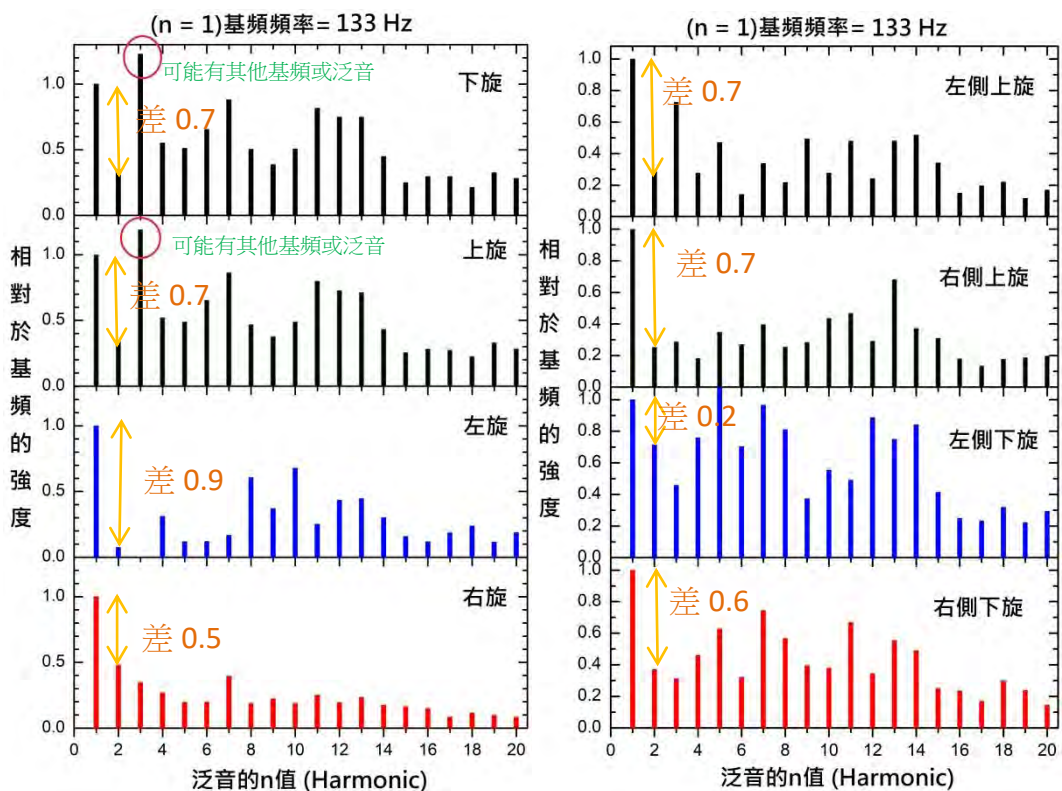
[圖 28] 基頻 200 Hz 的泛音振幅與基頻振幅之相對強度



[圖 29] 基頻 180 Hz 的泛音振幅與基頻振幅之相對強度



[圖 30] 基頻 153 Hz 的泛音振幅與基頻振幅之相對強度



[圖 31] 基頻 133 Hz 的泛音振幅與基頻振幅之相對強度

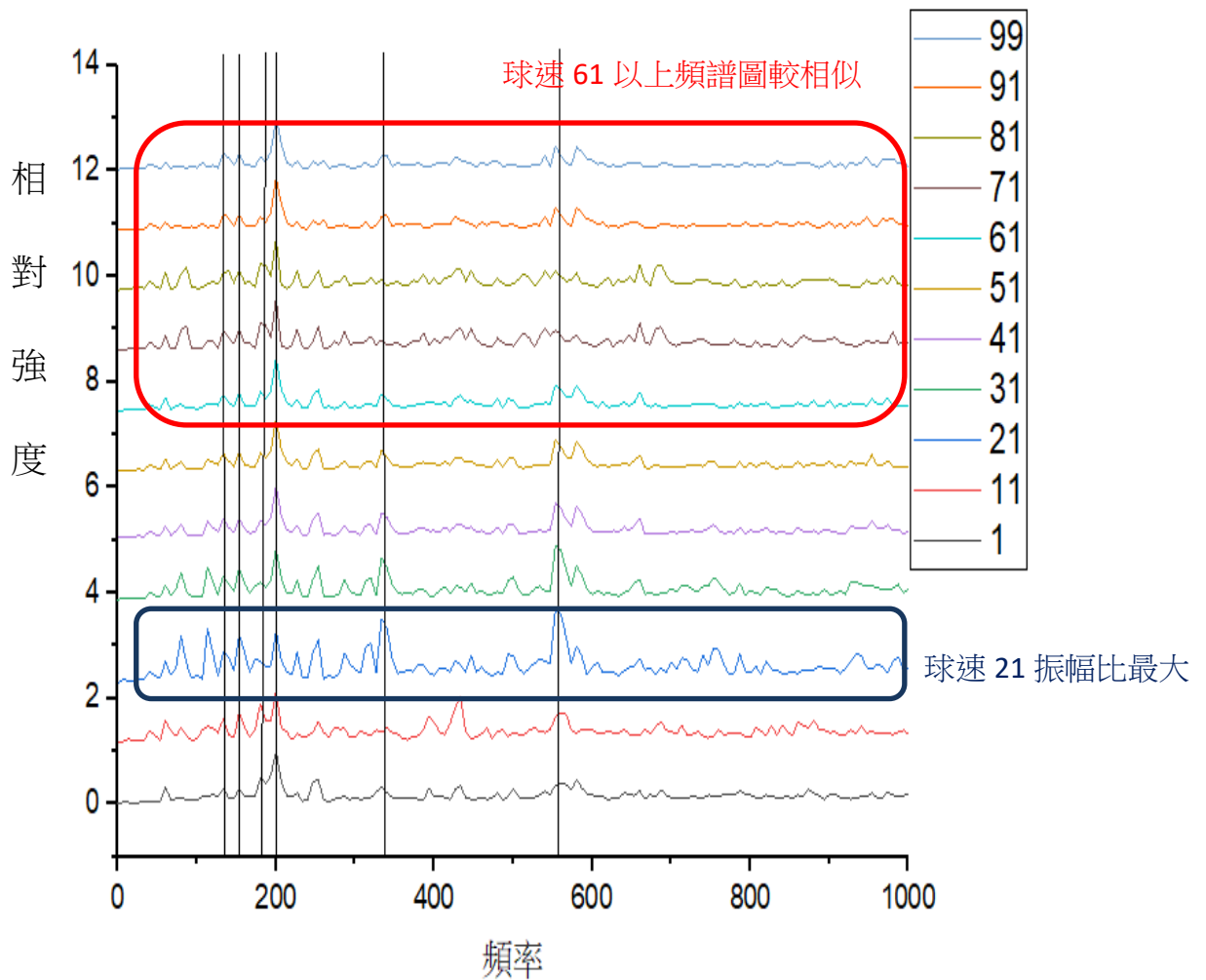
三、探討球速、飛行距離與球桌角度對驅動基頻振動的影響

1.球速造成撞擊位置不同，可看出撞擊點為波峰或節點

從[圖]不同球速的頻譜圖中可以看出頻率分布幾乎相同，差別只在球速 21 時基頻振幅最高，而球速越快，振幅就慢慢減緩。

我們判斷此實驗使用之上旋球，給予球桌的力方向是向上，因球速 1 很慢，撞到球桌時已經微微下墜，可能撞到球桌的位置偏向波峰，所以振幅偏大。

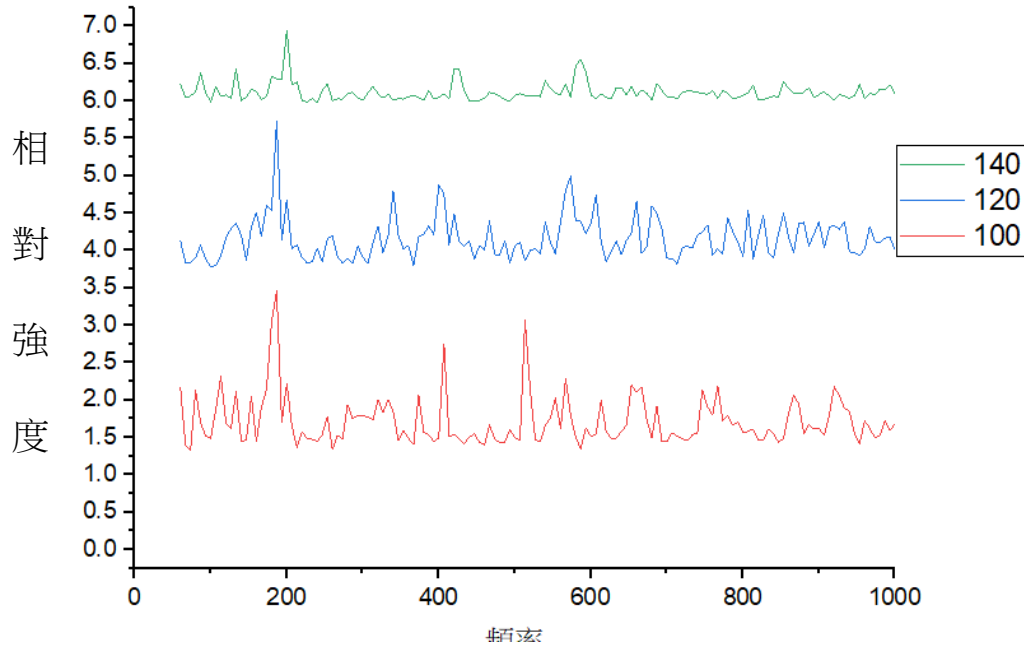
球速大於 61 時，桌球進乎直線打到桌球中心點，而球桌中心點為節點位置，所以振幅較小。



[圖 32]上旋球不同球速的頻譜圖(1-1000Hz)

2.飛行距離不同，受重力時間也不同，造成對球桌施力大小，使基頻的振幅受影響

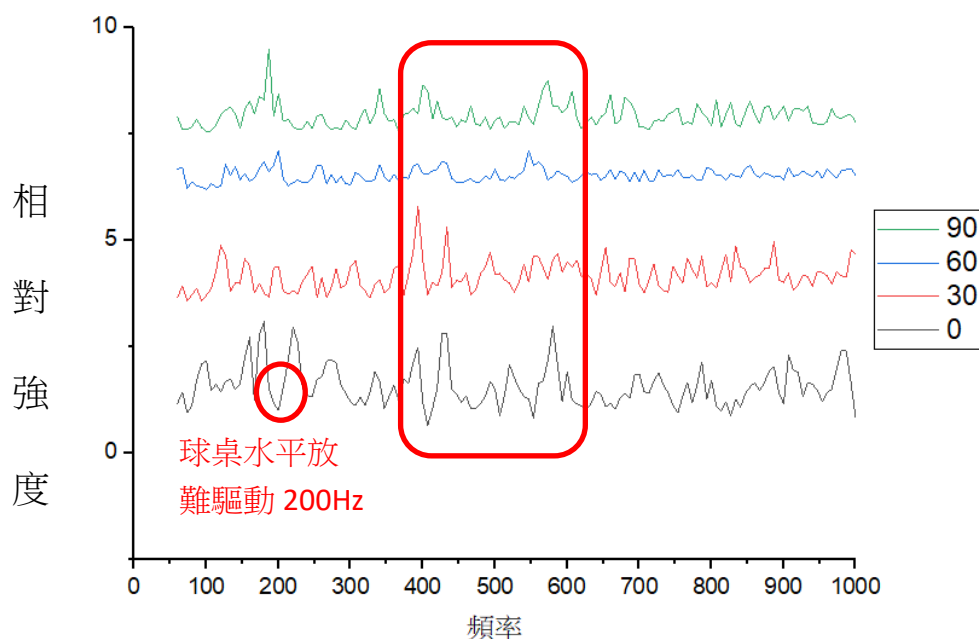
由[圖]可以看出當發球機與桌球間距離 100cm 時，受的重力振幅相距較大，而 140cm 的振幅相距較小。我們推論距離不同時，受重力影響的時間也會不同，因此可推論受重力影響時間較短，桌球施給球桌的力較大，使基頻振幅也較大，而受重力影響時間長，桌球施給球桌的力較小，使基頻振幅也較小。



[圖 33]不同飛行距離的頻譜圖

3.球桌角度不同使撞擊角度不同，驅使的基頻振幅也會不同

由桌球不同角度的頻譜圖中，我們發現前面認為穩定基頻的 200Hz，當桌球呈現 0 度時振幅非常的小，可以推論球桌水平平放時，短邊的頻率較難以驅動。而由頻率約 350Hz-600 Hz 間的頻率，發現 0 度、30 度時的振幅明顯較大，但當球桌越立直，此頻率間的頻率振幅就越小。



[圖 34]不同球桌角度的頻譜圖

四、探討不同旋球撞擊聲的頻譜與接觸時間及接觸面積的關係

由於頻率跟振動的速度有關，所以我們預測不同旋球的基頻比例不同，可能與接觸時間與接觸面積相關，進行測量後結果如[表 35]。

我們初步推論接觸時間與接觸面積的不同，間接影響造成給予球桌的正向力不同，

[表 35]不同旋球的接觸時間與接觸面積

	接觸時間(s)	接觸面積(cm ²)
上旋球	.0112	.382
下旋球	.0158	.331
左旋球	.0156	.298
右旋球	.0378	.355
左上旋球	.0187	.330
左下旋球	.0226	.325
右上旋球	.0213	.399
右下旋球	.0175	.337

五、球桌各個特徵長度經驗證能驅動球桌不同基頻

我們好奇為什麼桌球與球桌的撞擊聲是由 133Hz、153Hz、180Hz、200 Hz 主頻率組成，想到在五年級音樂的單元時，學過打擊樂器有不同的高低音，是因為振動體越短聲音越低，振動體越長聲音越高，所以量了球桌長為 152.0cm、寬為 137.5cm(如下圖)。



[圖 36]球桌長寬的實際長度

我們參考了 YOUTUBE 影片清華大學跨領域科學教育中心製作的「測量聲音在鐵棒傳遞的速度」，得知了頻率與波長之間的關係為 $v = f \times \lambda$ (波速=頻率*波長)，嘗試計算共同振幅較大 200 Hz 是否為球桌長邊或短邊所造成的頻率。

(1) 假設「球桌短邊基頻為 200Hz」，求長邊的基頻

$$\begin{aligned}v &= f \times \lambda \\ &= 200 \times 152 \times 2 \\ &= 60800 \\ f_{\text{長邊}} &= 60800 \div 137.5 \div 2 \approx 221.0 \text{ Hz}\end{aligned}$$

(2) 假設「球桌長邊基頻為 200Hz」，求短邊的基頻

$$\begin{aligned}v &= f \times \lambda \\ &= 200 \times 137.5 \times 2 \\ &= 55000 \\ f_{\text{短邊}} &= 55000 \div 152 \div 2 \approx 181 \text{ Hz}\end{aligned}$$

由以上計算結果，可以得知第一種假設「球桌長邊為 200Hz」時，算出來的短邊頻率約為 221Hz

但我們的頻譜上在 221 Hz 附近並沒有明顯的峰值，因此第一種假設應該不是正確的。

所以，我們做了第二種假設「球桌短邊的基頻為 200 Hz」，估算出來的長邊基頻頻率約為 181 Hz，剛好為我們找出的基頻其中之一，所以我們可以推論撞擊聲基頻組成中，200 Hz 為球桌短邊所產生的基頻，而 181 Hz 為球桌長邊所產生的基頻，並求得在球桌桌面傳遞的聲音速率約為 550 m/s。

接著我們試著估算球桌對角線長 204.9cm 是否為 133 Hz 或 153 Hz 所產生的，並做計算如下：

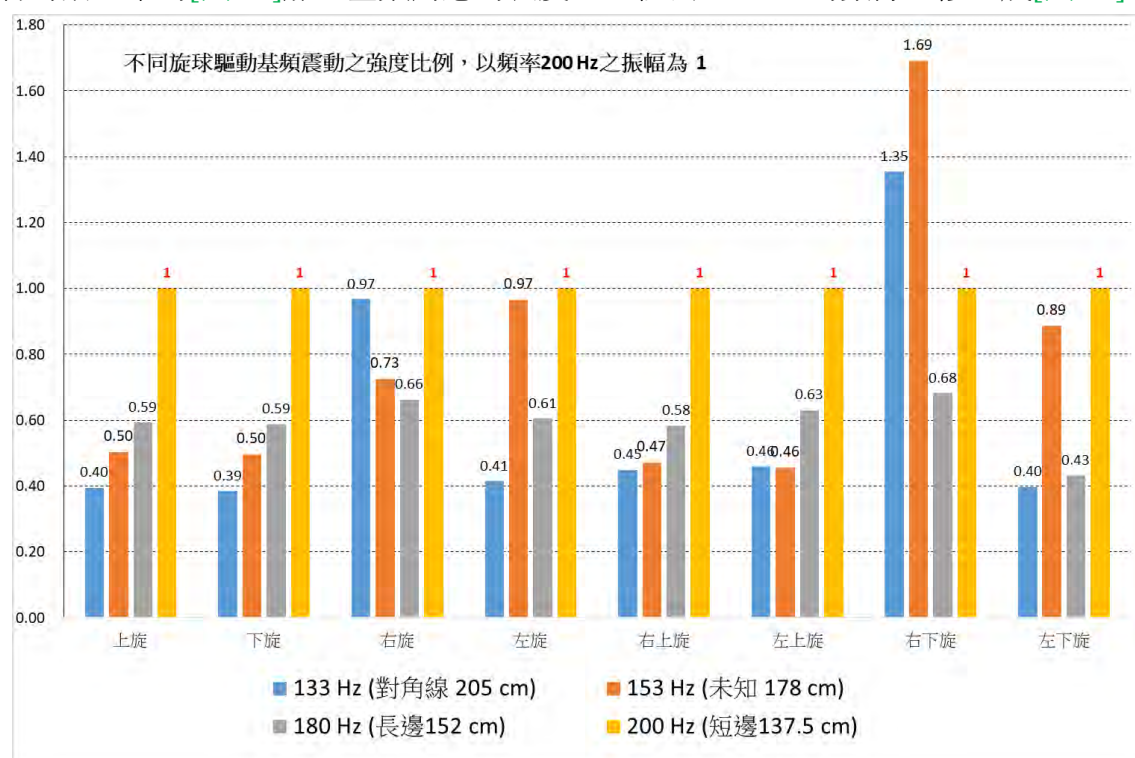
$$\begin{aligned}v &= f \times \lambda \\ f_{\text{對角線}} &= 55000 \div 204.9 \div 2 \approx 134 \text{ Hz}\end{aligned}$$

我們發現撞擊聲頻譜上在 134 Hz 附近明顯的振幅峰值為 133 Hz，因此我們認為 133 Hz 為球桌對角線所發出的基頻，並整理如下表

[表 37] 球桌各特徵長度發出的基頻頻率對照表

基頻	球桌
133Hz	球桌對角線 205cm
153Hz	尚未找到對應的球桌特徵
180 Hz	球桌長邊 152cm(水平於地面)
200 Hz	球桌短邊 137cm(鉛直於地面)

將討論一中的[圖 27]加上基頻對應的長度，並移去 153 Hz 的數據，修正成[圖 38]



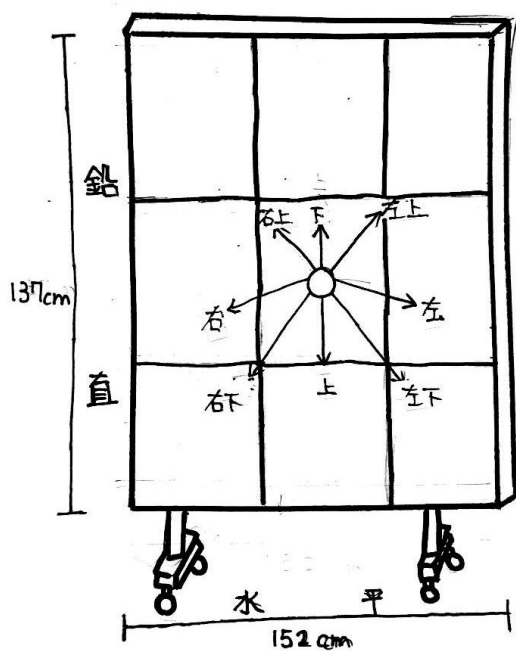
[圖 38]球桌的特徵長度對應基頻的振幅比

我們對應[圖 38]不同球種的四個基頻佔的振幅比例，與其球桌特徵長度產生的頻率進行比較及整理如[表 39]，發現以下幾點:

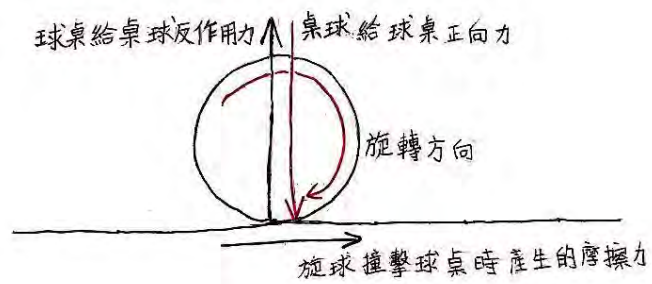
- 1.上旋球、下旋球發出的 200 Hz 振幅較大，對應主要是球桌的短邊 152cm(水平於地面)所造成的，而桌球上下方向旋轉與球桌的長邊(水平於地面)剛好為相同方向。
- 2.左右旋球除了 200 Hz 以外，180 Hz 皆振幅較大，應是額外驅動球桌的長邊(水平於地面)震動所造成的，桌球的旋轉若含有的左右方向的旋轉，則桌球給球桌的力量會包含水平於地面的方向，恰好是長邊(平行於地面)。
3. 右旋球及右下旋球同樣為往右旋轉的球種，發現向右旋轉的球較容易使球桌對角線的頻率振幅較大。

[表 39]不同旋球旋轉方向與對應之球桌的特徵長度

球種	球旋轉方向	較大振幅之基頻	對應之球桌的特徵長度
上旋球	往上	200 Hz	球桌短邊(鉛直)
下旋球	往下	200 Hz	球桌寬(鉛直)
左旋球	往左	180 Hz	球桌長邊(水平)
		200 Hz	球桌短邊(鉛直)
		133Hz	球桌對角線
右旋球	往右	180 Hz	球桌長邊(水平)
		200 Hz	球桌短邊(鉛直)
左上旋球	往左上	200 Hz	球桌短邊(鉛直)
左下旋球	往右上	200 Hz	球桌短邊(鉛直)
右上旋球	往左下	180 Hz	球桌長邊(鉛直)
		200 Hz	球桌短邊(鉛直)
		133Hz	球桌對角線
右下旋球	往右下	153 Hz	尚未得知
		200 Hz	球桌短邊(鉛直)

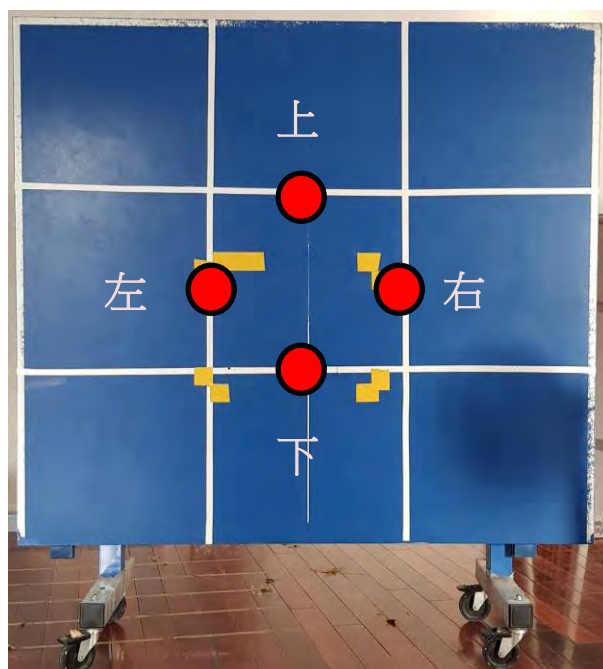


[圖 40]不同旋球對球桌施力的方向示意圖



[圖 41]旋球給球桌力量分析圖

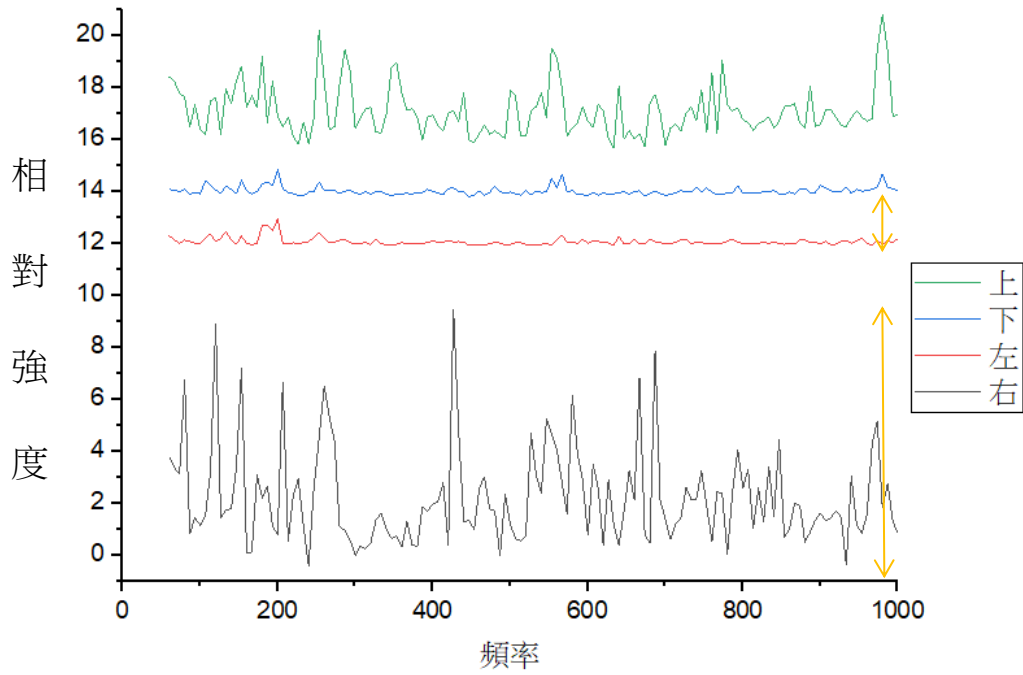
上下旋球驅動的基頻為 200Hz，而左右旋球方向理論上驅動的基頻應也相同，但左旋球卻多了 133Hz 組成，左上旋球及左下旋球也近似相同，而右上旋球及右下旋球在 133Hz 及 153Hz 組成卻不同，我們推論球桌右方有某部分的影響，所以我們測試了不同位置的撞擊聲(如下圖 42)，並進行頻譜分析。



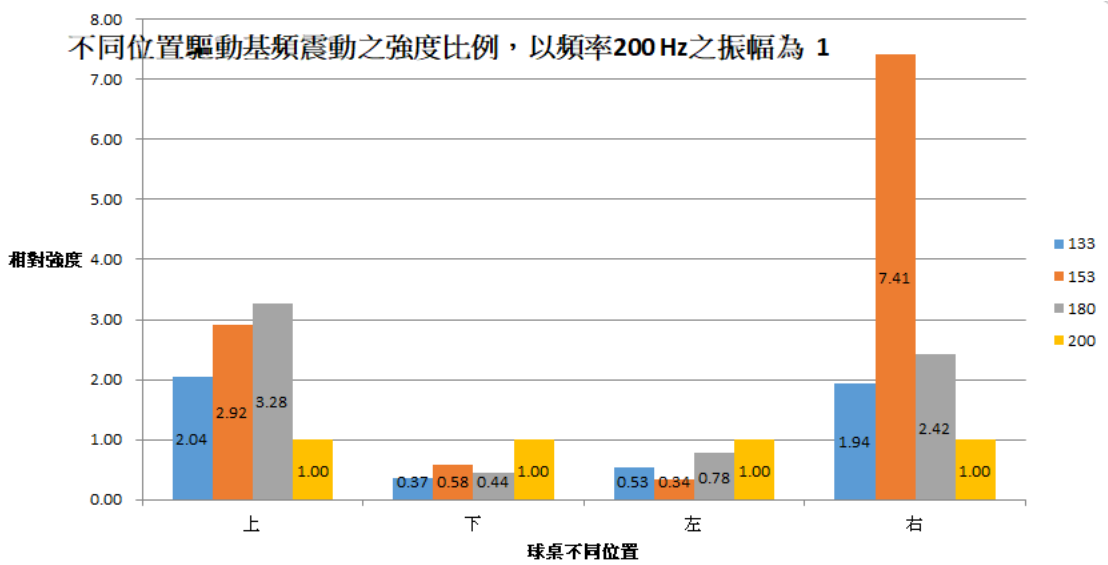
[圖 42]以上旋球撞擊球桌不同位置示意圖

由[圖 43]不同位置的撞擊聲頻譜圖中可以看出振幅比差異很大，而上旋球撞擊球桌中心時，主要區動的基頻為 200Hz，所以我將 200 Hz 振幅為 1，觀察不同位置四種基頻的比例(如下圖 44)發現位置右及位置上振幅較小，而位置左及位置下振幅大很多，進而推測可能是球桌其他因素，造成位置球桌左右方向的聲波，位置右較靠近節點，而位置左靠近波峰，上下方向聲波，位置上較靠近節點，而位置下靠近波峰。

此情形與文獻影片 測量聲音在鐵棒傳遞的速度中，分析敲擊鐵棒時產生的節點會位在鐵棒中間不一致，我們推測可能跟球桌的桌腳，或連結桌面的位置有關係，待未來進一步確認。



[圖 43]撞擊球桌不同位置之頻譜圖



[圖 44]撞擊球桌不同位置之基頻相對強度比例圖

捌、結論

由研究中發現桌球選手能夠由音高及音色判別的不同旋球的撞擊聲，且與年齡及練習時數有關。

而藉由撞擊聲我們找出球桌振動產生的基頻為 133Hz、153Hz、180Hz 及 200Hz，而此基頻產生剛好能對應球桌的短邊、長邊及對角線。

我們研究不同球速、不同飛行距離及不同球桌角度的基頻組成，發現撞擊的位置及施力的大小會使驅動的基頻振幅不同。

除此之外，我們進一步比較發現「桌球旋轉的方向」與「球桌特徵長度的方向」相同，推論桌球旋轉的方向，能夠驅動同方向桌球特徵長度的基頻，並能使其基頻產生較大的振幅。

玖、參考資料及其他

一、維基百科 • *音頻信號處理* • 取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%A2%91%E4%BF%A1%E5%8F%B7%E5%A4%84%E7%90%86>

二、鐘寶弘 • *以撞擊聲音評估高爾夫擊球表現之研究*

三、陳其威、邱薇如 • *測量聲音在鐵棒傳遞的速度* • <https://www.youtube.com/watch?v=PDMC-txEc-c>

四、菁華超音波電子報 • *超音波原理介紹* • <https://webbuilder.asiannet.com/ftp/460/index9810.htm>

【評語】 080111

本實驗設計與收集桌球運動中所產生的球-桌撞擊聲音，並善用多種軟體幫助進行分析數據，嘗試可否判斷出球路，是個有創意想法的運動科學好題目，可以再加以延伸研究。

摘要

在本研究，我們透過問卷調查釐清研究方向，並且使用Origin2018軟體分析球桌基頻振動。而我們從研究中發現桌球的撞擊聲會受到「旋球種類」、「球速」、「撞擊角度」、「撞擊球桌的位置」以及「球桌的特徵長度」影響。

本研究貢獻有

1. 研究方法上，提供「複寫紙測量撞擊接觸面積」、「桌球撞擊形變與振動測量接觸時間」之方法。
2. 研究結果上，初探旋球類型與撞擊聲的關係，往後精進研究能透過此研究成果協助選手進行更準確的判斷與決定擊球策略，獲得更好的成績。

壹、研究動機

在一次的桌球課程中，我們發現這些不同旋轉方式的桌球，撞擊聲不太一樣。

五年級時學過「聲音是由物體振動而產生」。查詢文獻後發現大多在探討不同旋球行進軌跡會有什麼不同？金屬手工具或是汽車的撞擊聲有什麼特徵？但是對於球桌基頻振動的研究卻非常少。

我們期望未來能運用此研究成果協助桌球選手更準確的判斷與決定擊球策略。

因此我們決定透過實驗，探討不同旋轉方式的桌球是否與驅動球桌基頻振動有關。

貳、研究目的

- 一、探討不同旋球是否會有撞擊聲的差異
- 二、探討影響驅動球桌基頻振動的因素
 - (一) 探討不同旋球與球桌基頻振動的關係
 - (二) 撞擊球桌的接觸面積、接觸時間與球桌基頻振動的關係
 - (三) 探討球速、飛行距離與球桌基頻振動的關係
 - (四) 球桌角度與球桌基頻振動的關係
 - (五) 撞擊球桌不同位置與球桌基頻振動的關係

參、名詞解釋

一、不同旋球的定義

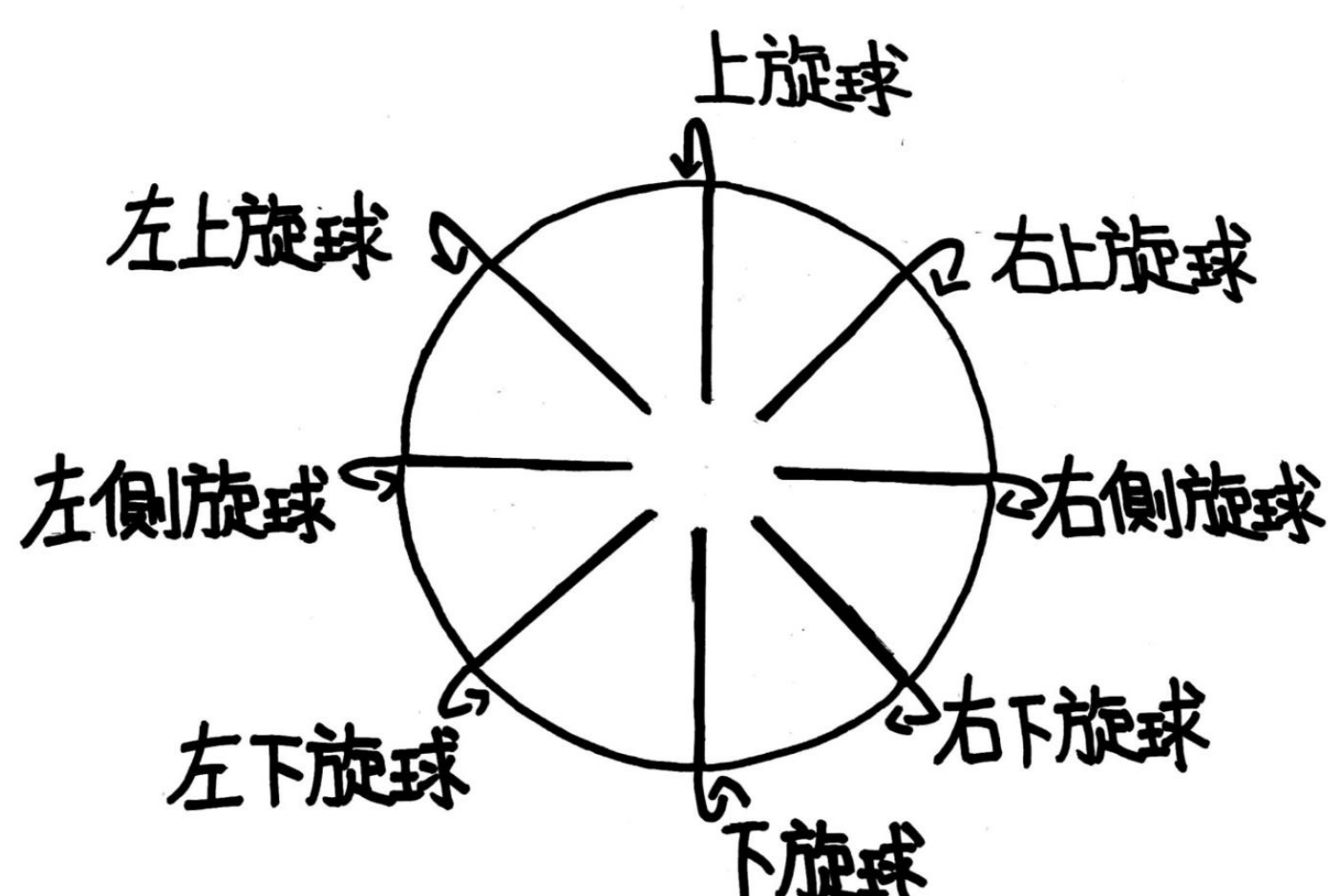
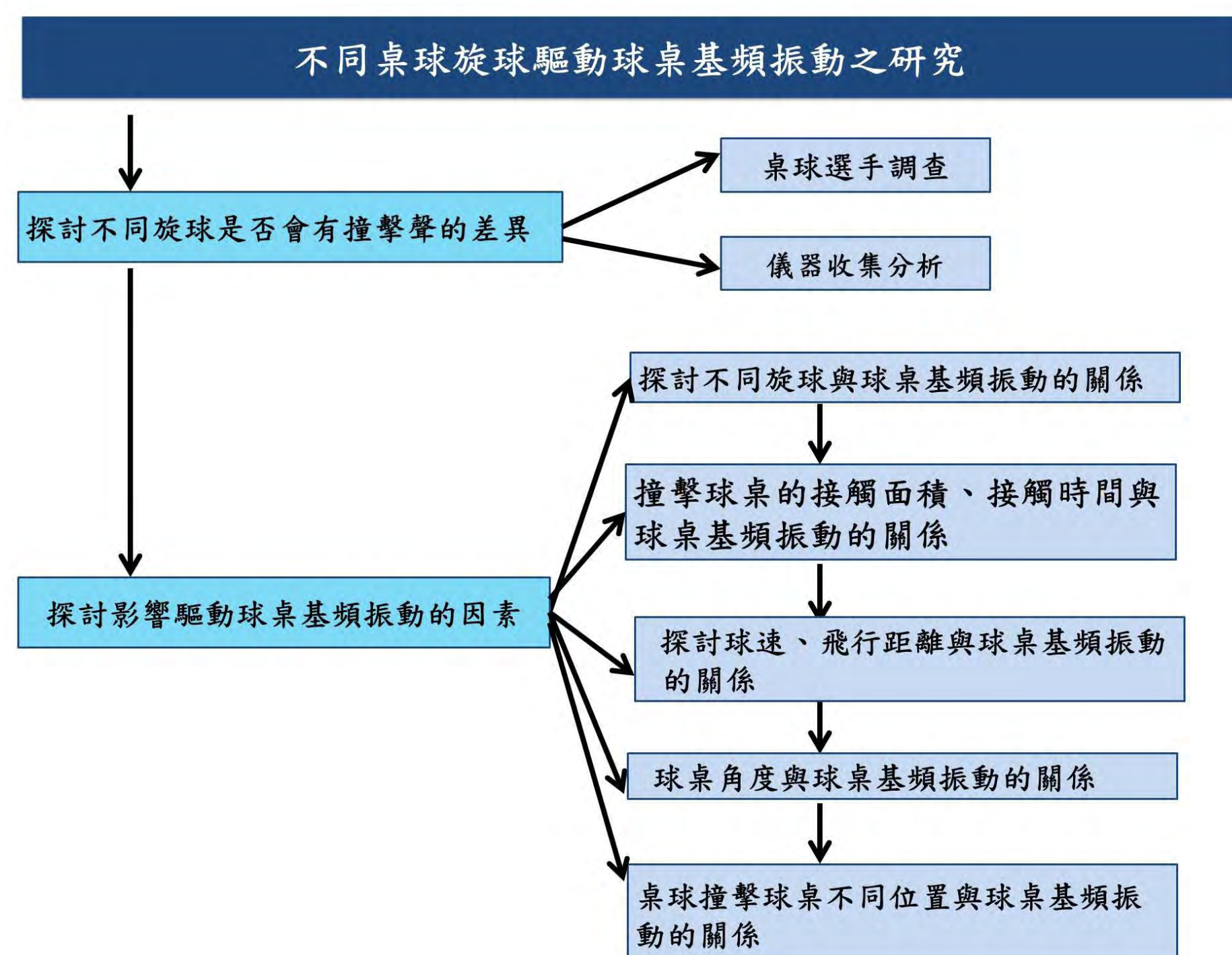


圖1 不同旋球旋轉方向示意圖

二、球桌特徵長度

本研究指球桌短邊、長邊及斜邊的長度。

肆、研究方法與結果



一、探討不同旋球是否會有撞擊聲的差異

(一) 調查桌球選手是否能判別不同旋球的撞擊聲

1. 研究方法

找不同年齡、不同經驗的桌球選手進行調查，調查流程如下圖：

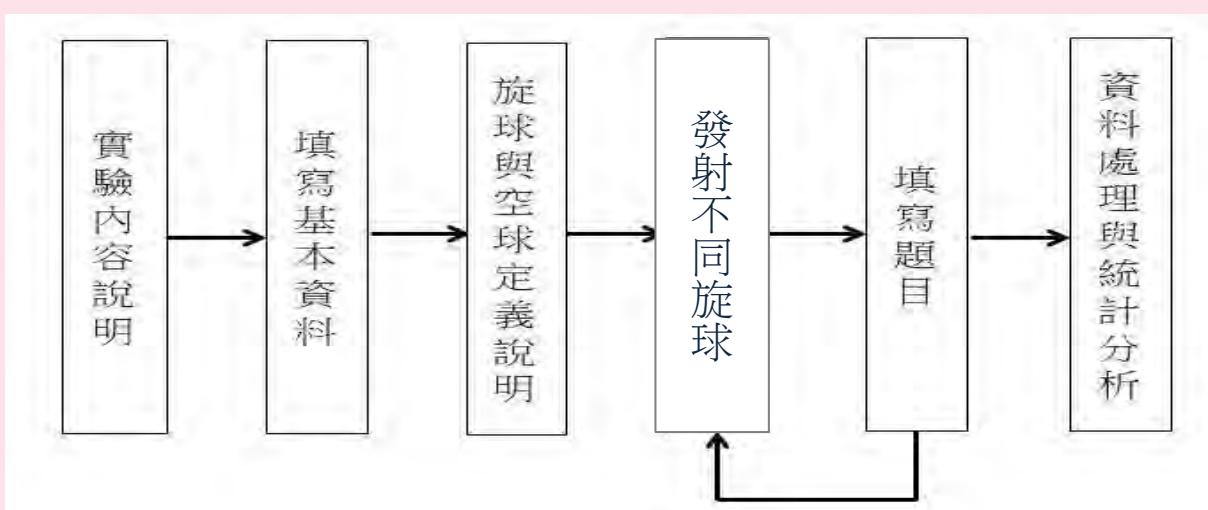


圖2 問卷流程圖



圖3 問卷調查實際情形

(二) 研究結果

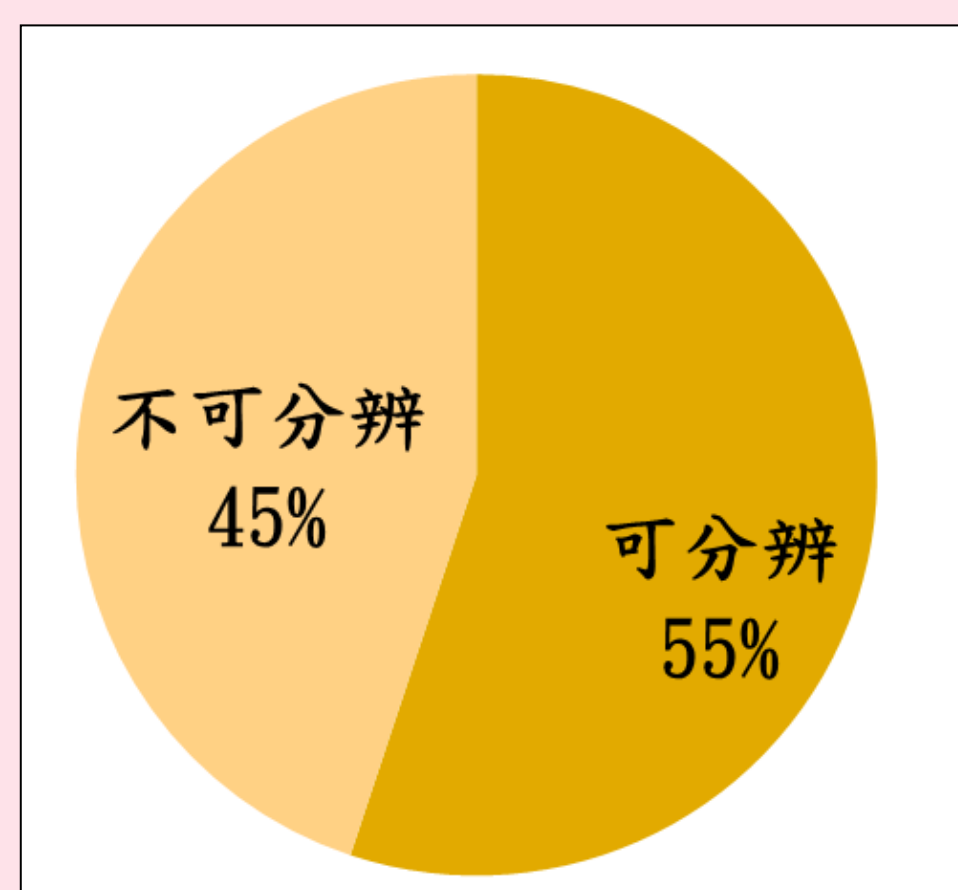


圖4 桌球選手認為可分辨旋球與空球 (n=49)

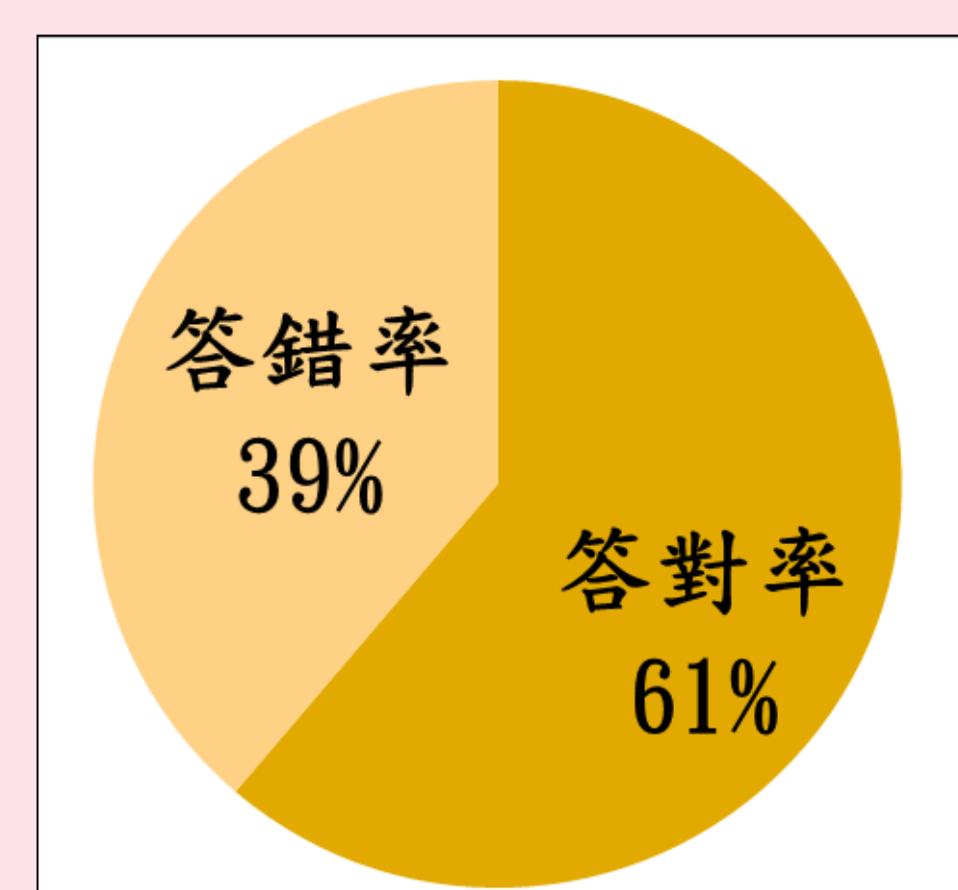


圖5 桌球選手分辨旋球與空球答對率 (n=49)

(二) 使用儀器從撞擊聲判斷是否有差異

1. 研究方法

(1) 錄製撞擊聲：

將發球機球速調為70 (≐ 50 km/hr)，發射各種旋球撞擊球桌中央，並錄製撞擊聲。

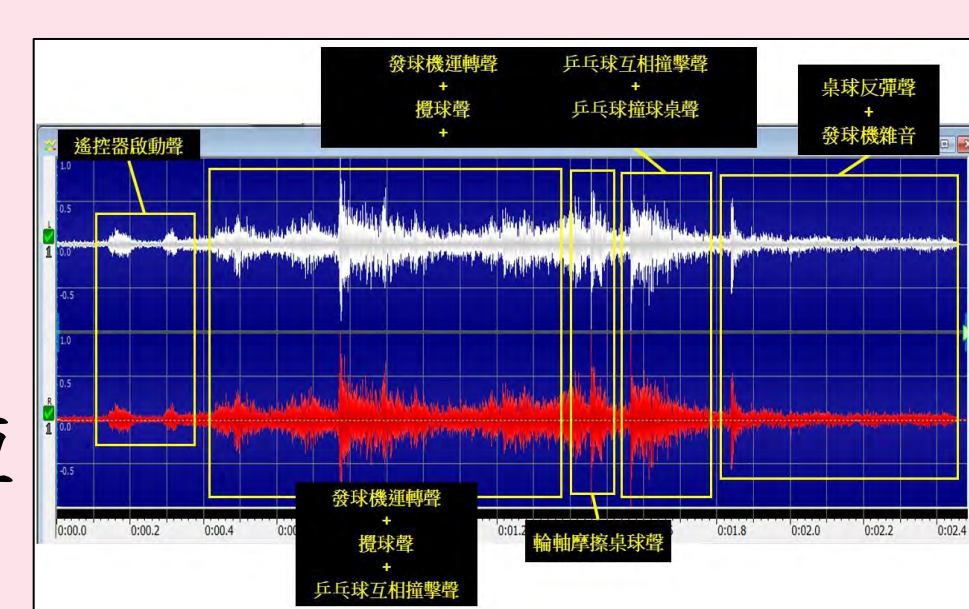


圖6 撞擊聲剪輯畫面

(2) 減少誤差作法：

我們決定錄製撞擊聲100次，用Origin2018轉成頻譜圖，再將100次振幅進行累加，可以使振幅明顯，也能減少誤差。

(3) 減少背景音影響：

錄製背景音轉成頻譜數據，將步驟二的振幅扣掉背景音的振幅值，可以減少背景音造成的誤差。

2. 研究結果

球桌桌面主要產生的基頻

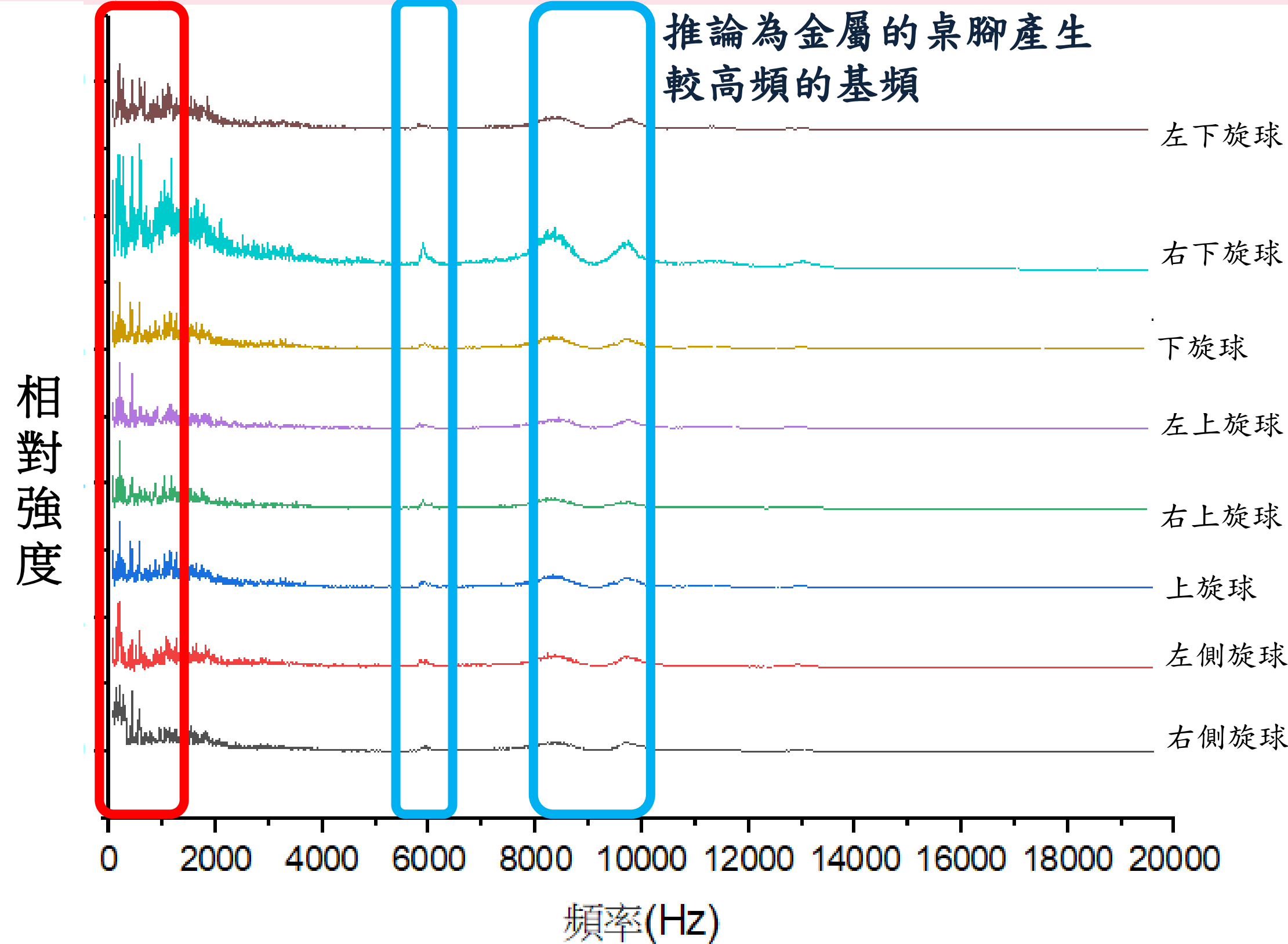


圖7 八種旋球在人耳可聽見的頻率範圍(< 20000 Hz) 之頻譜

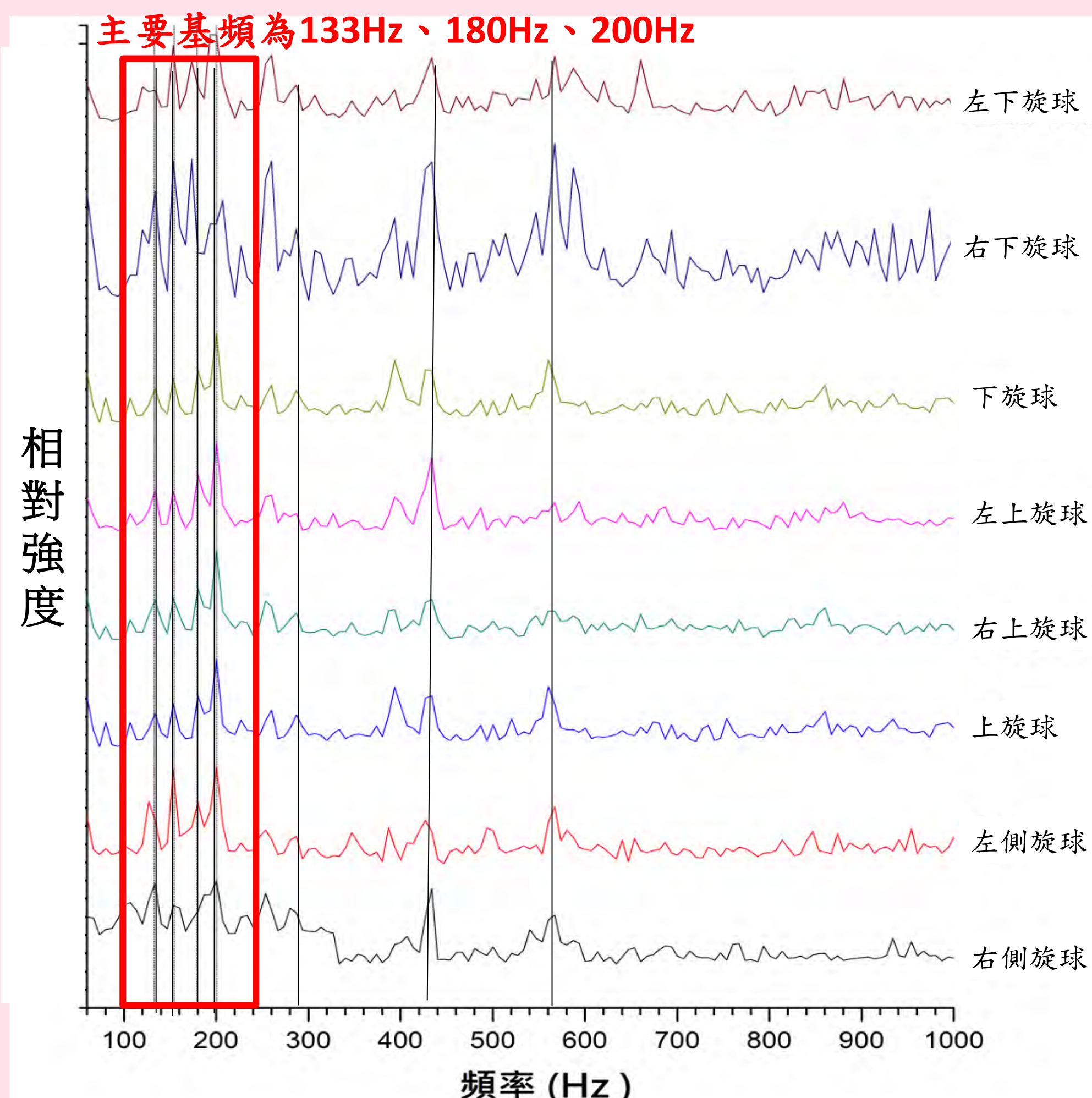


圖8 八種旋球1000 Hz以內的頻譜圖

二、探討影響驅動球桌基頻振動的因素

(一) 探討不同旋球與球桌基頻振動的關係

有其他泛音造成干涉

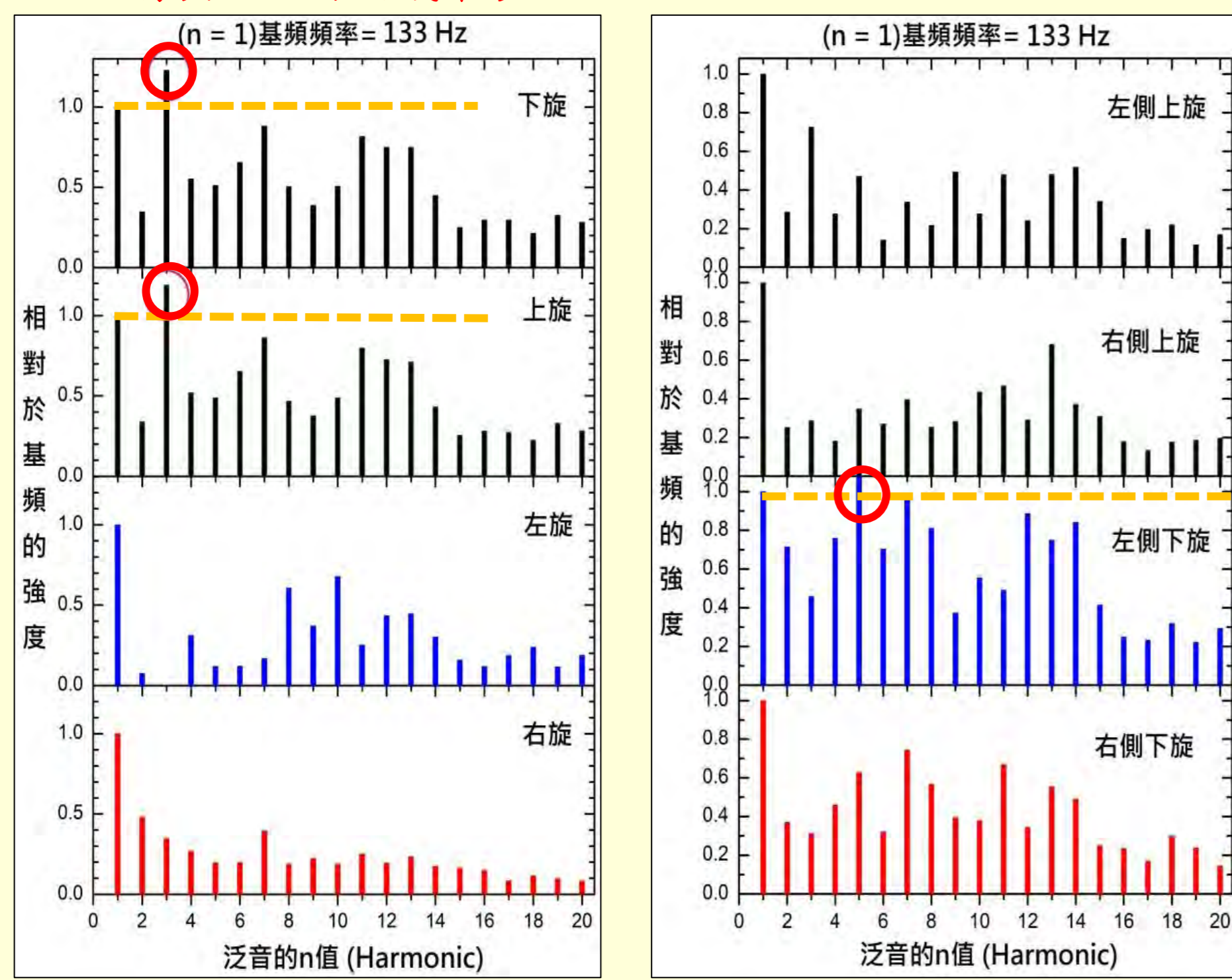


圖9 基頻133 Hz的泛音振幅與基頻振幅之相對強度

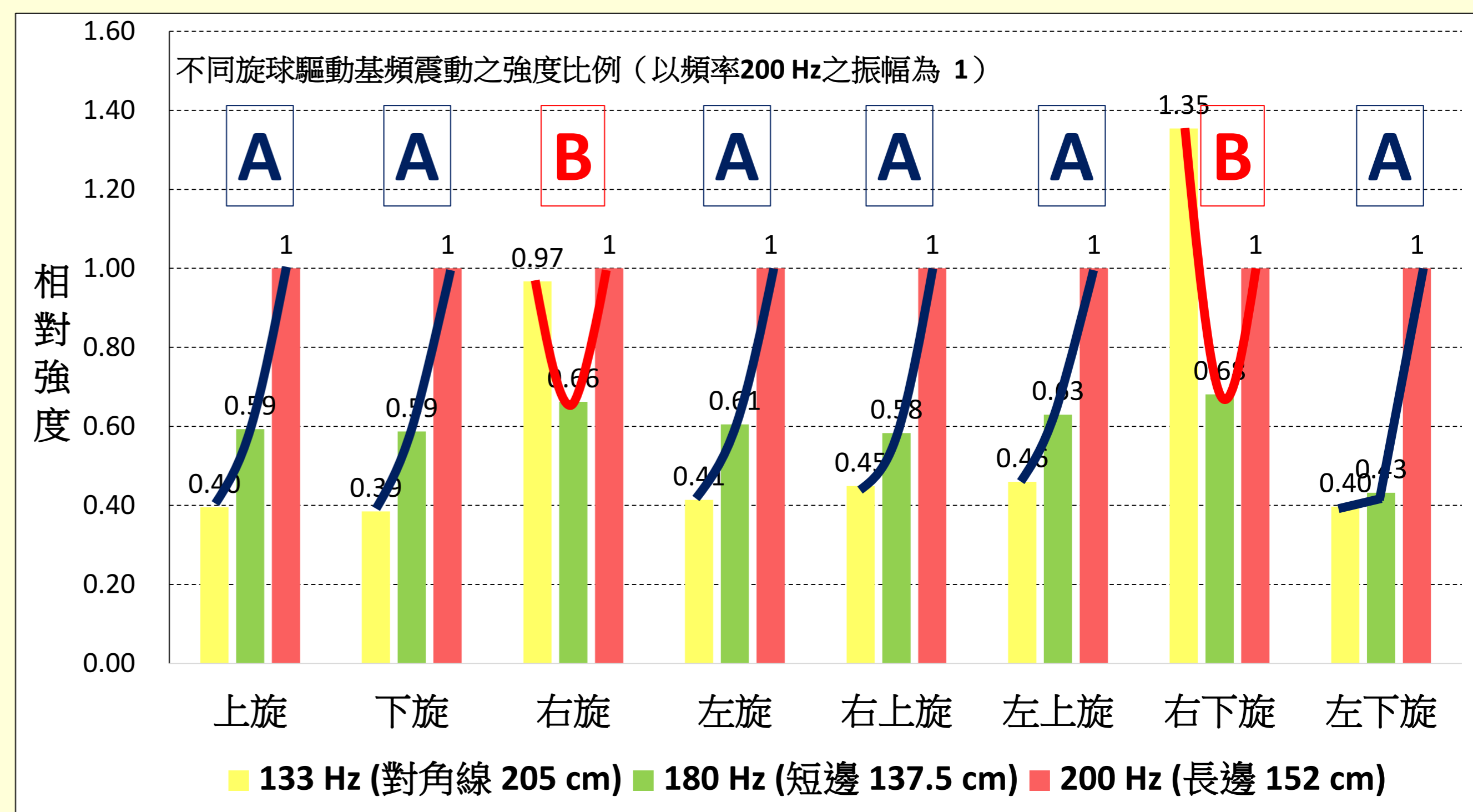


圖10 不同旋球驅動基頻振動之強度比例(以頻率200 Hz振幅為1)

長條圖上方英文字代表組成比例是否相近

(二) 撞擊球桌的接觸面積、接觸時間與球桌基頻振動的關係

1. 研究方法

(1) 不同旋球的撞擊面積實驗

a. 在桌球桌上貼上有複寫紙的白紙，用不同的旋球撞擊複寫紙。

b. 將撞擊留下的痕跡掃描，並利用Image J 計算面積。

(2) 不同旋球的撞擊時間實驗

a. 用發球機發出不同旋球撞擊球桌，並用app軟體iNVH將球桌的振動記錄下來。

b. 將振動的起始點與振動凹陷最大的點時間相減(為了得到兩者間的振動時間)。

c. 將時間乘以2得出接觸時間。

(3) 利用獨立樣本t檢定分析， p 值 $< .05$ 代表兩組數據之間有顯著差異。

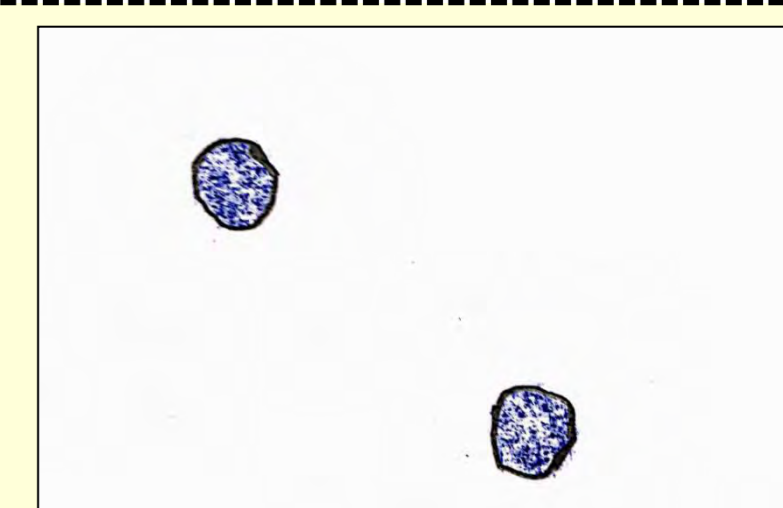


圖11 用複寫紙轉印撞擊面積結果

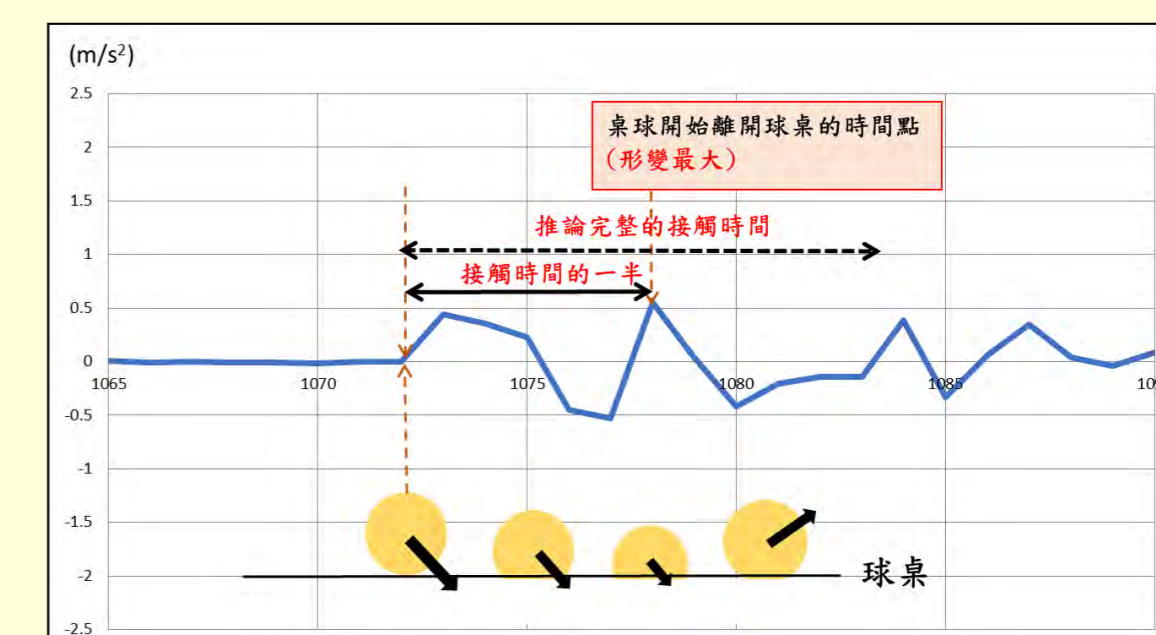


圖12 用振波取撞擊時間之示意圖

2. 研究結果

(1) 平均接觸時間：

$p=.009$ ，基頻模式A和基頻模式B有顯著差異。

(2) 平均接觸面積：

$p=.34$ ，基頻模式A和基頻模式B無顯著差異。

	上	下	左	左上	左下	右上	右	右下
基頻模式分組	F-A				F-B			
平均接觸時間 (s)	0.0168				0.0140			
平均接觸面積 (cm ²)	0.341				0.3378			

表1 接觸時間與接觸面積是否顯著差異結果

(三) 探討球速、飛行距離與球桌基頻振動的關係

1. 研究方法

(1) 改變發球機球速1-99 (15 km/hr ~ 86 km/hr)

(2) 改變發球機與球桌間的距離為100 cm、120 cm、140 cm

* 錄製撞擊聲，用Origin2018轉成頻譜數據，累加振幅並減去背景音。

2. 研究結果

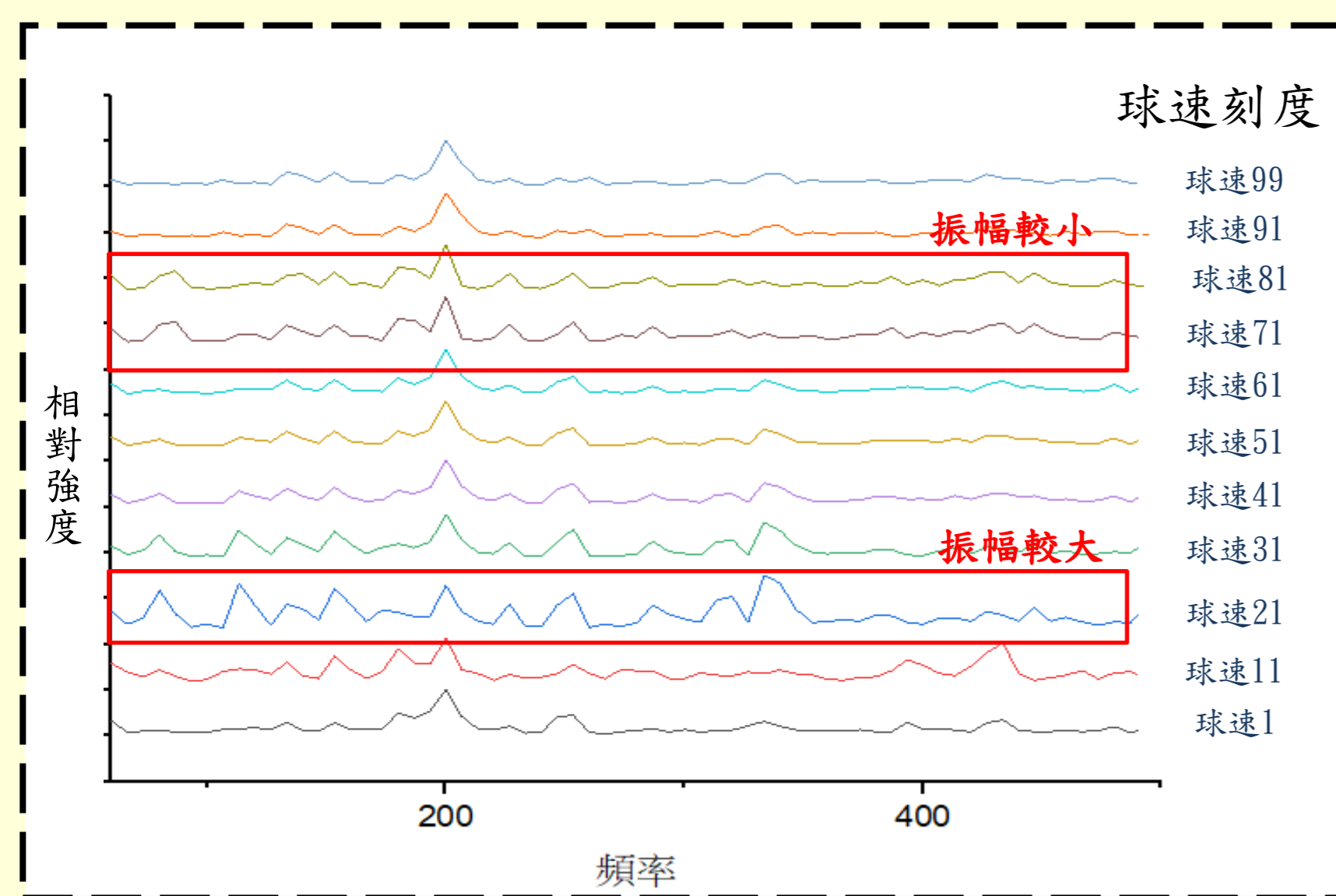


圖14 不同球速的頻譜圖(n=100)

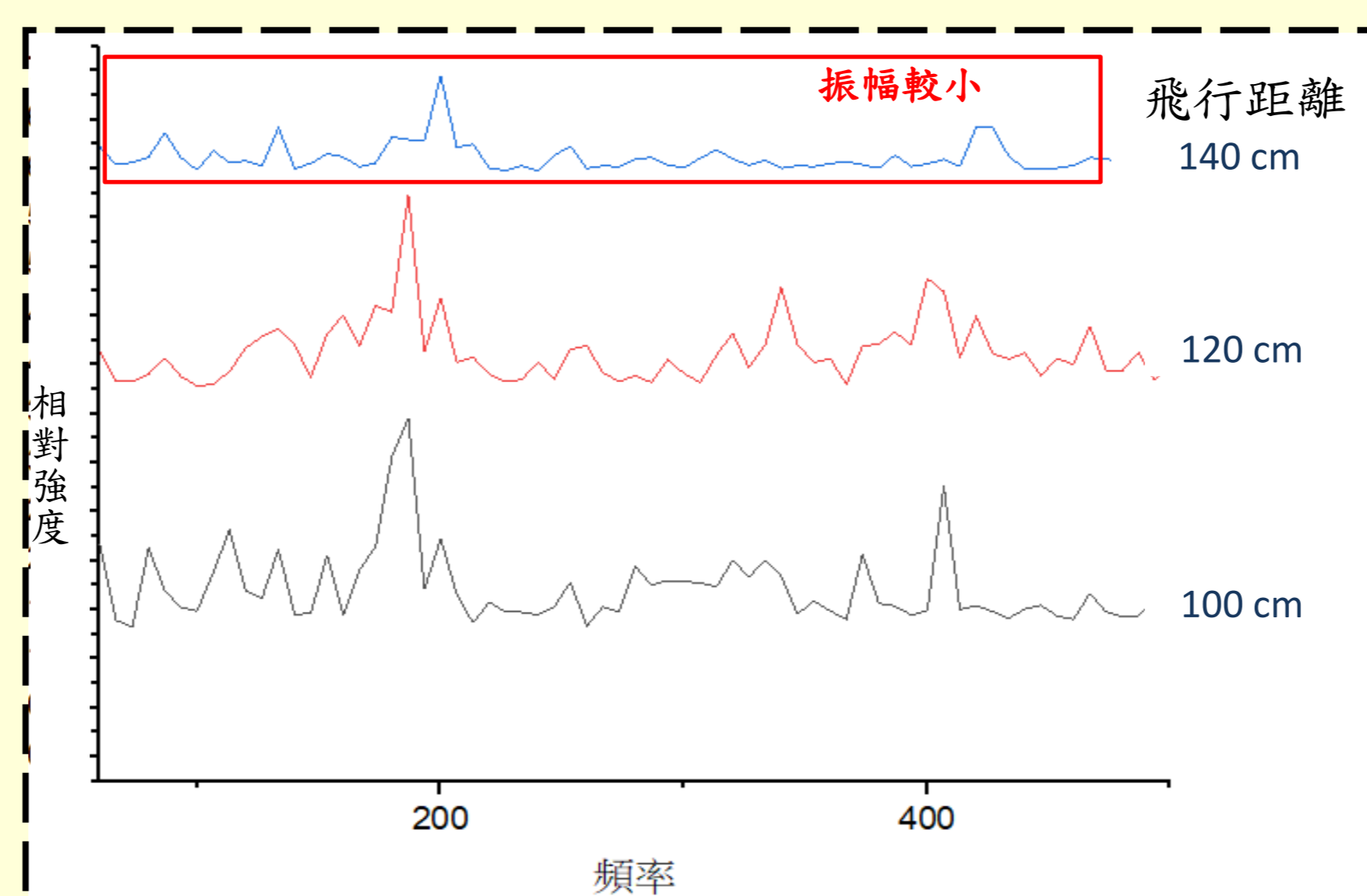


圖15 不同飛行距離的頻譜圖(n=100)

(四) 球桌角度與球桌基頻振動的關係

1. 研究方法與結果

改變球桌角度(0°、30°、60°、90°)

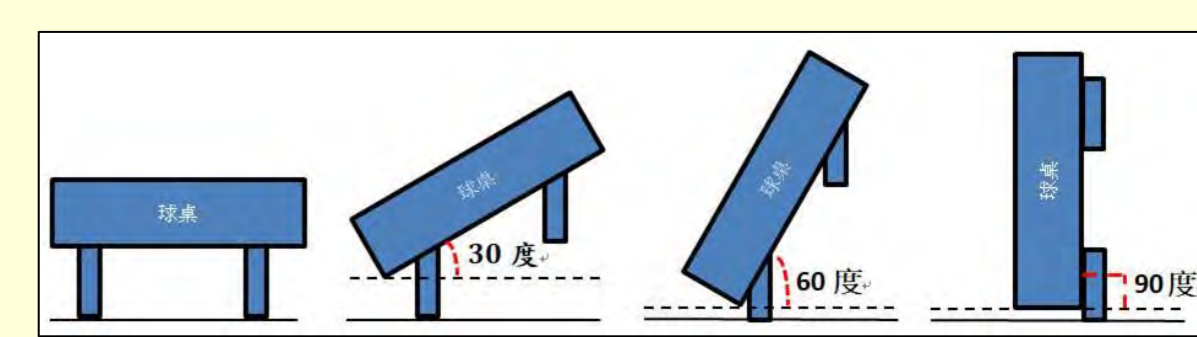


圖13 球撞擊球桌時，球桌角度改變示意圖

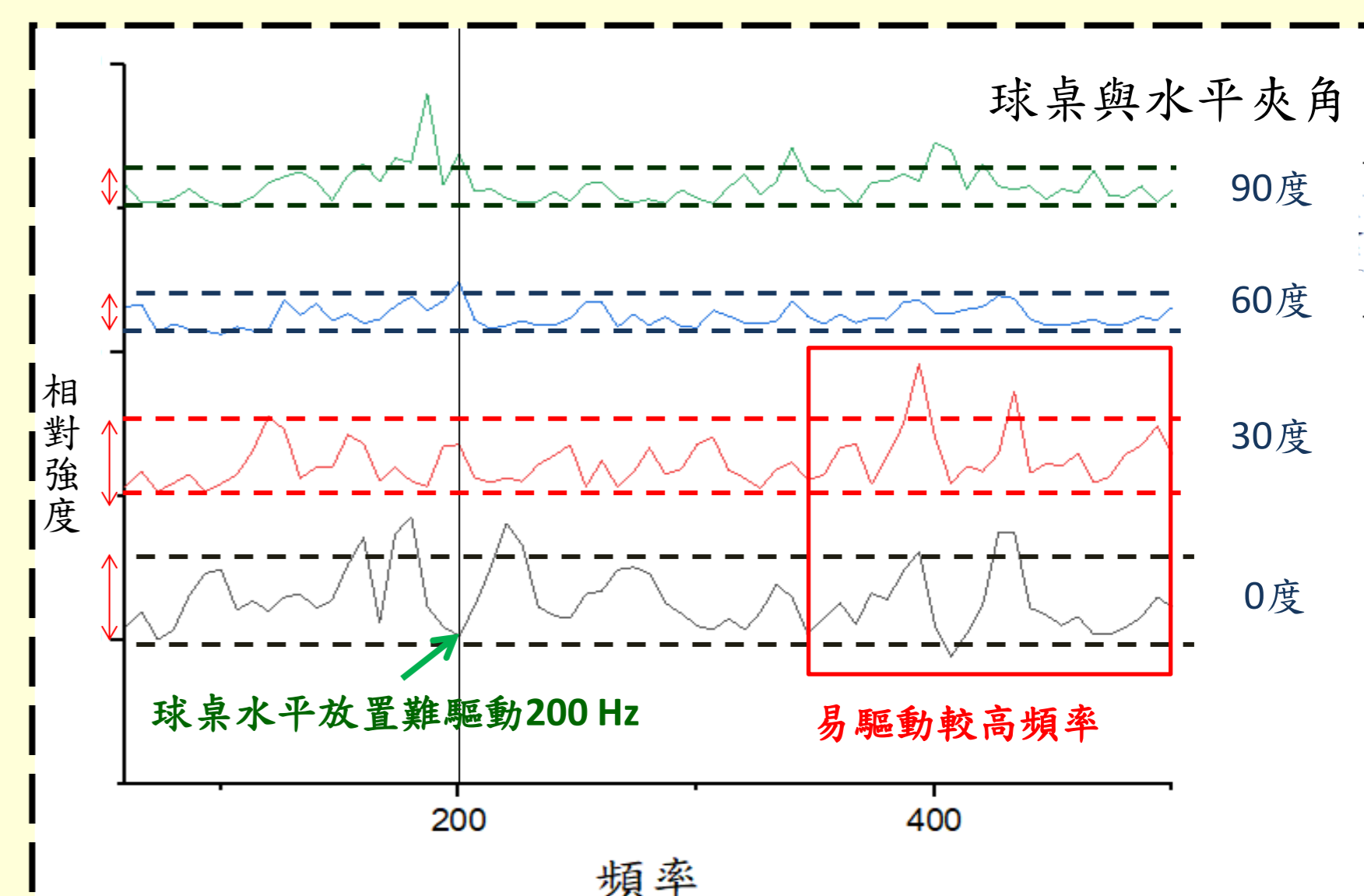


圖16 撞擊不同球桌角度的頻譜圖(n=100)

(五) 桌球撞擊球桌不同位置與球桌基頻振動的關係

1. 研究方法

用桌球撞擊球桌中心框框的五個位置(如下圖)

* 錄製撞擊聲，用Origin2018轉成頻譜數據，累加振幅並減去背景音。

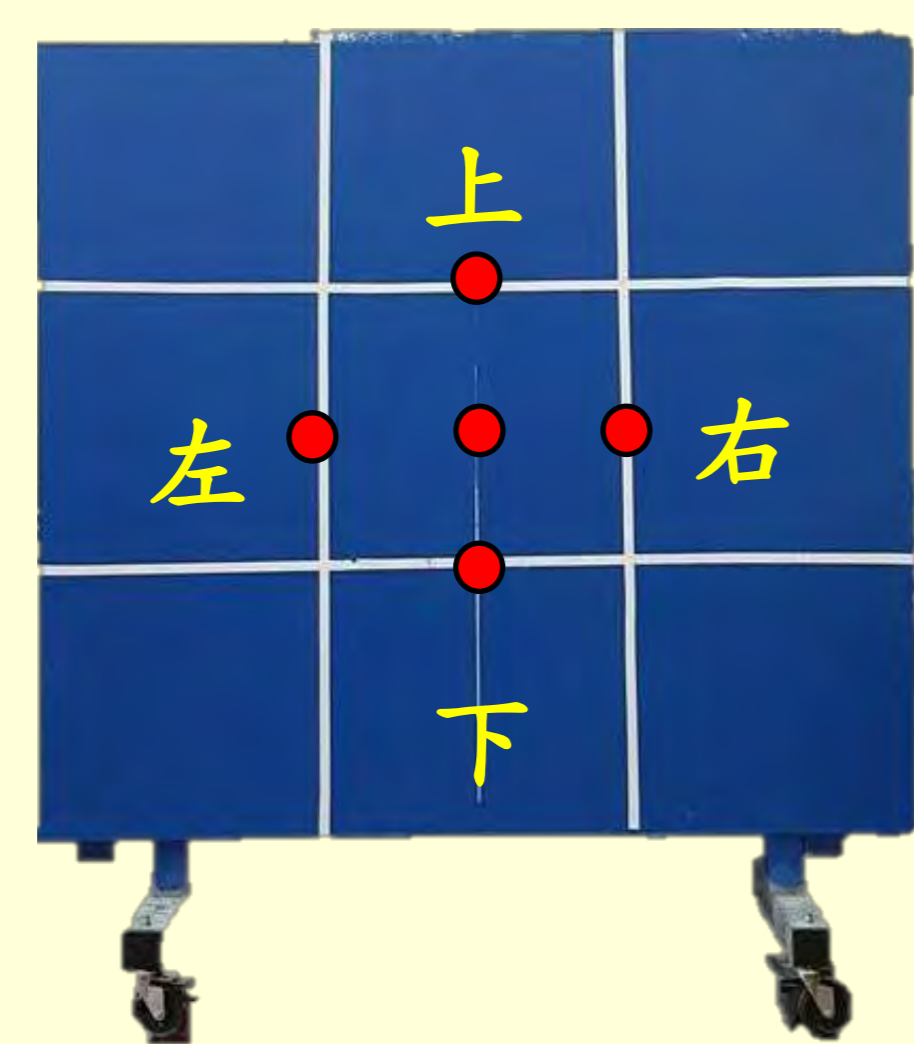


圖17 撞擊球桌四個位置之示意圖

2. 研究結果

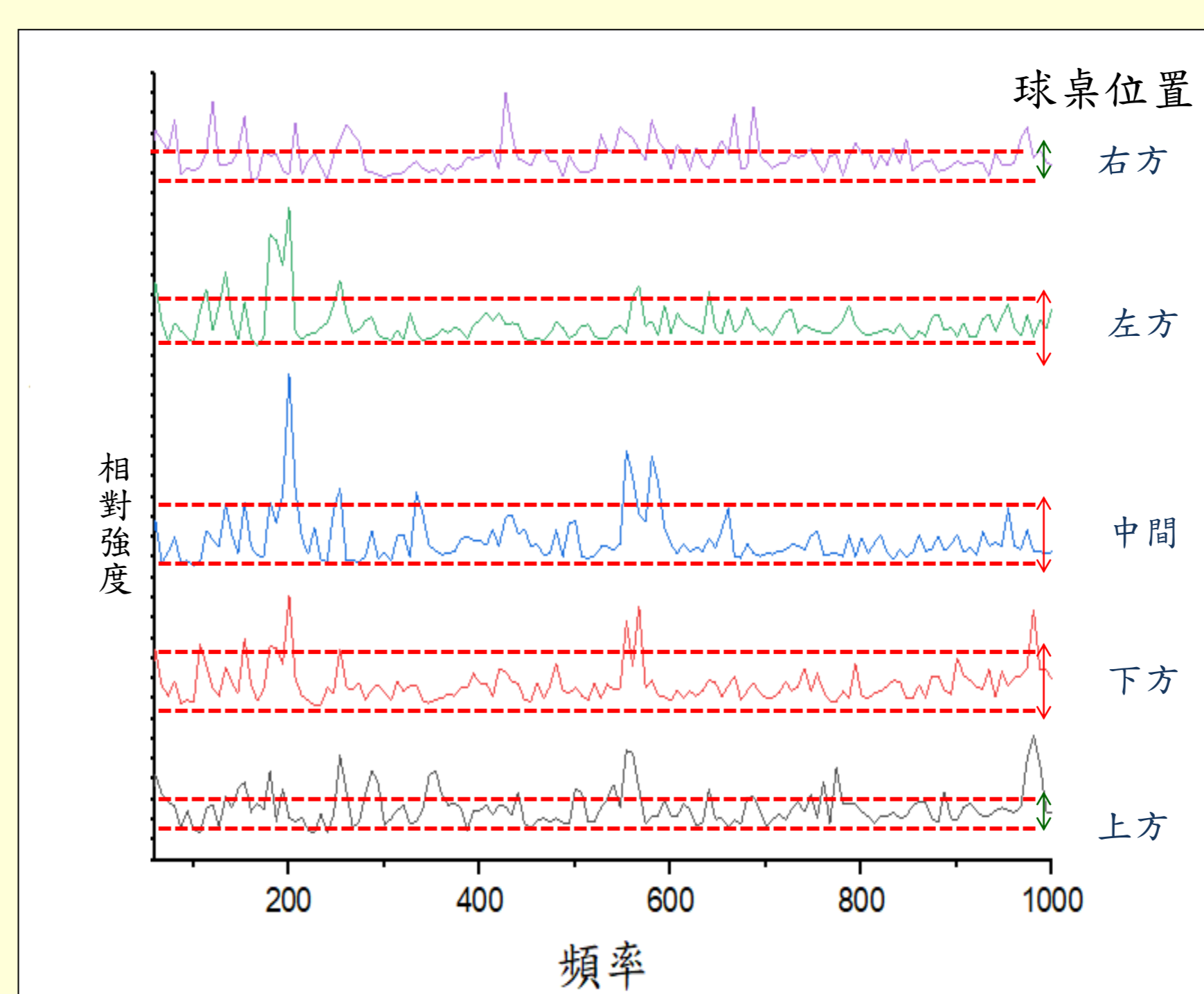


圖18 撞擊球桌不同位置頻譜圖(n=30)

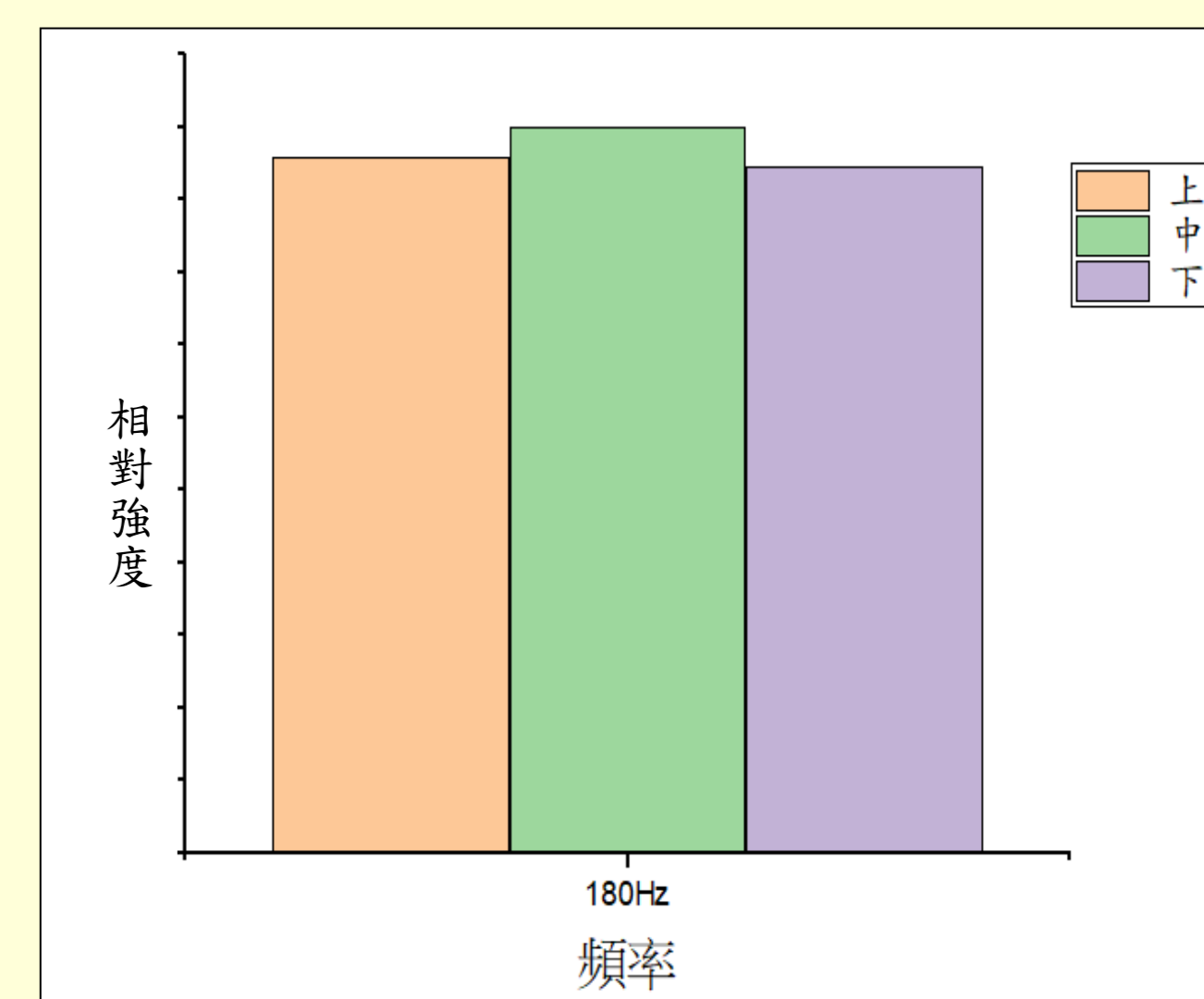


圖19 上中下位置180 Hz的振幅比例(n=30)

伍、討論

一、不同旋球的撞擊聲頻率組成比例不同，推論可以由聲音分辨，與問卷調查結果互相符合

由[圖8]中我們推論撞擊聲基頻為133 Hz、180 Hz、200 Hz。

而從[圖10]中可以推論右旋球、右下旋球的驅動基頻振動之強度比例較不一樣，聲音偏低。

二、球桌長邊驅動180 Hz、短邊驅動200 Hz、斜邊驅動133 Hz

我們量測球桌桌面長度(如下圖20)，假設「球桌長邊產生的基頻為200 Hz」，用 $v = f \times \lambda$ 去推算出短邊的基頻，過程如下：

$$v = f_{\text{長邊}} \times \lambda = 200 \times 137.5 \times 2 = 55000$$

$$f_{\text{短邊}} = 55000 \div 152 \div 2 \approx 181 \text{ Hz}$$

181 Hz剛好為我們找出的基頻之一，故驗證**長邊驅動180 Hz**，而**短邊驅動200 Hz**。接著我們估算出球桌對角線長204.9 cm所產生基頻約134 Hz，因此**133 Hz為球桌對角線所驅動的基頻**。

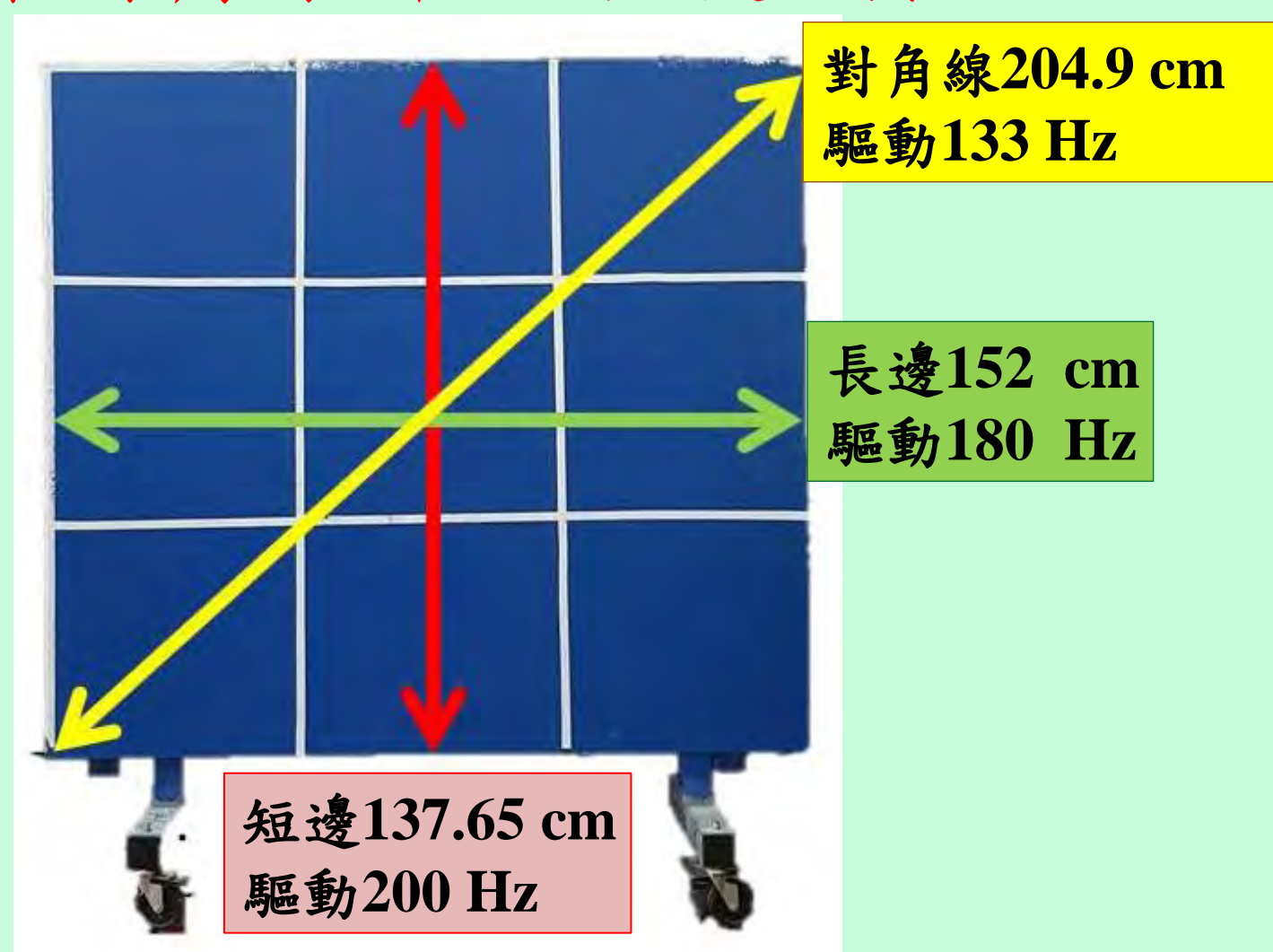


圖20 球桌特徵長度驅動的基頻示意圖

三、旋球施力方向與驅動球桌特徵邊長的方向互相平行，並且與接觸時間有關係

(一) 旋球施力方向與驅動球桌特徵邊長的方向互相平行

由[圖21]發現以下幾點：

1. 推論上、下或偏上旋轉的球容易驅動球桌短邊(鉛直方向)基頻200 Hz。
2. 偏左右方旋轉的球較易驅動球桌長邊(水平方向)基頻180 Hz。
3. 推論向右偏下旋轉的球種較易驅動對角線基頻133 Hz。

所以推論**旋球施力方向與驅動球桌特徵邊長的方向互相平行**。

(二) 不同旋球之基頻模式與接觸時間有關

由[表1]發現兩組基頻模式與接觸時間有顯著差異，而與接觸面積無顯著差異，所以推論**不同旋球的基頻模式與接觸時間較有相關**。

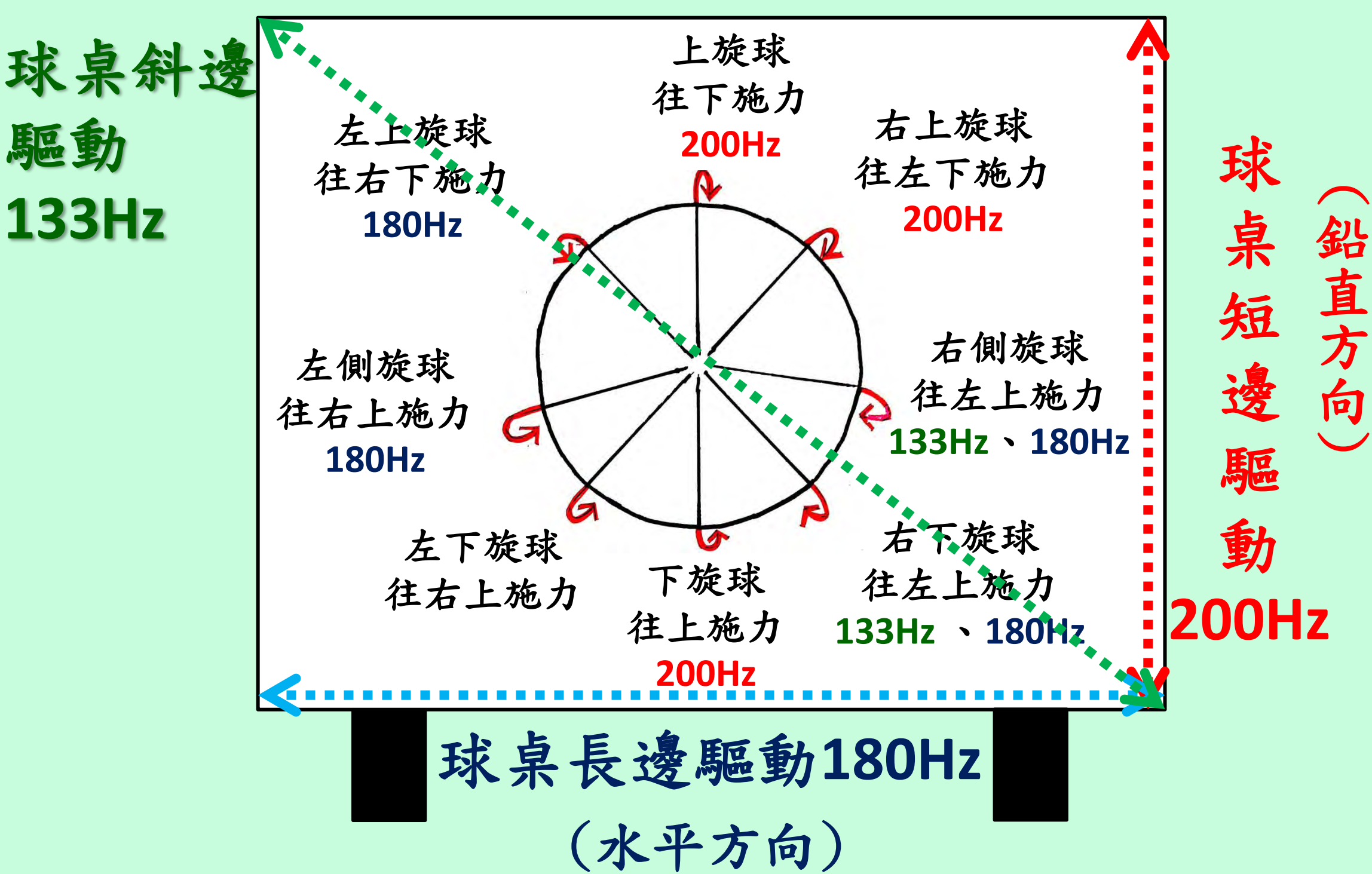


圖21 不同旋球的施力方向與桌球特徵長度方向互相平行示意圖

四、球速不同、飛行距離不同造成撞擊球桌不同位置，影響振幅大小

球速51及距離120 cm撞擊球桌的正中間為基準，球速71及距離140 cm兩個條件下振幅較小，而球速21及距離100 cm振幅較大，所以我們進一步想測試及討論不同位置的振幅大小。

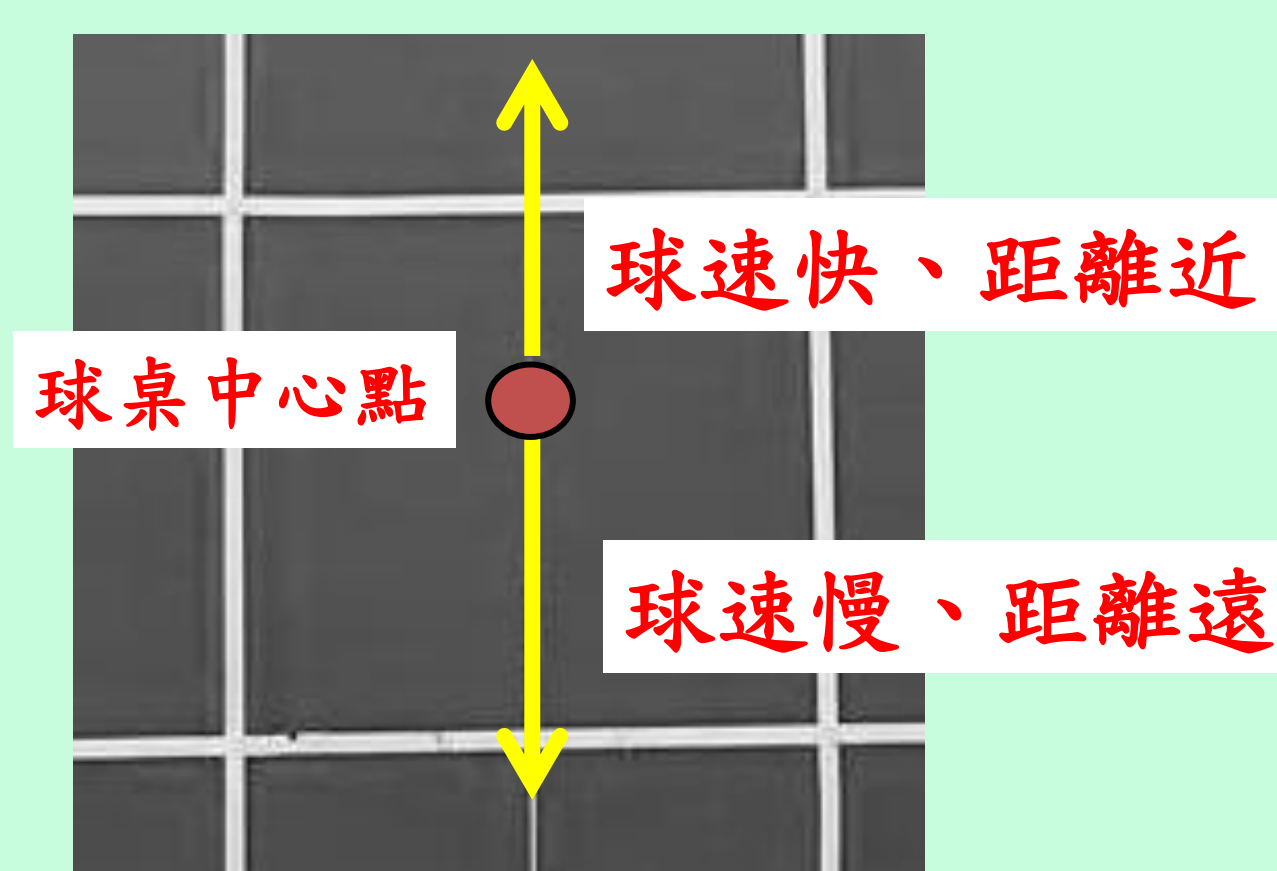


圖22 球速不同撞擊位置不同示意圖

五、撞擊球桌不同位置，可能因撞擊節點位置影響振幅大小

[圖19]發現180 Hz時上、中、下的位置振幅相近，我們參考了清大科教中心影片(2016)指出「基頻的波腹在兩端，而節點在中心的位置」，所以我們推論這三處皆位在長邊振動的節點處(如圖23)。

從整體振幅來討論，[圖18]可看出「位置右」及「位置上」整體振幅較小，而「位置左」及「位置下」整體振幅較大，因此推論**撞擊球桌位置右方、上方的時候，比較靠近節點，而撞擊球桌位置在左方、下方的時候，比較靠近波腹**。

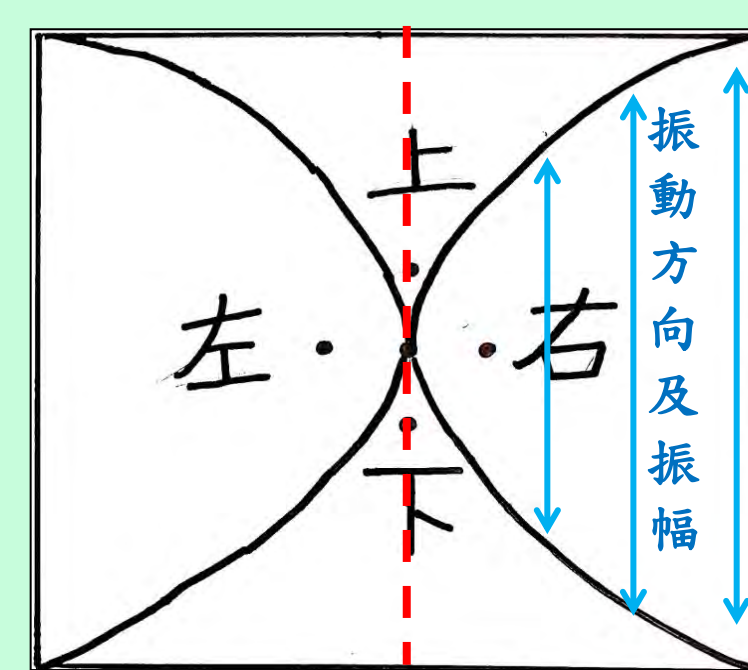


圖23 球桌長邊180Hz振動時產生的駐波示意圖

六、撞擊角度越大，撞擊聲音頻率越高

由[圖16]看出當球桌30°及0°擺放時，200 Hz比例慢慢減少，可推論球桌水平放置較難以驅動短邊200 Hz，但350 - 600 Hz區間的振幅卻增加。推論由於**撞擊角度變大，也使聲音變得較高**。

七、未來展望

(一) 研究驗證與精緻

再蒐集更多結果，並進一步回推研究成果是否正確。

(二) 可輔助選手依撞擊聲判斷擊球策略

短期目標以「發球機」為攻方設定比賽「接發球」的模擬情境，並根據研究成果，提供選手選擇擊球策略。

長期目標希望能實際應用到選手的訓練中。

起始條件		根據研究內容預測的結果		建議擊球策略
攻方起始站位	9號位後接近球桌	發球落點	守方8或9號位	快速移動到守方8或9號位置後面，而且遠離球桌。
球種	左旋球	撞擊聲音高	聲音頻率低	
球速	球速刻度71	撞擊聲音量	大聲	嘗試利用a. 左旋球瞄準攻方3或6號位置b. 左上旋球瞄準攻方9號位置進行回擊。
發球位置	攻方3號位			

圖24 模擬選手判斷擊球策略示意圖

陸、結論

透過研究成果，我們解決了大眾認為桌球撞擊聲一成不變的迷思。

桌球撞擊聲是「複合音」。「不同旋球」、「不同球速」、「不同撞擊角度」及「撞擊球桌的不同位置」都會影響聲音組成，改變最後產生的撞擊聲。

我們設計「複寫紙實驗」，能方便的找出不同旋球撞擊的接觸面積；利用「撞擊時的桌球形變與振動規律」，可以**不需要高速攝影機，也能找出撞擊的接觸時間**。

現今的桌球選手比賽時大多依賴「視覺」決定擊球策略，但容易被「假動作」影響，「聲音」卻「無法造假」。我們會將研究加以修正、改良，未來希望能推廣到選手的訓練中，**協助選手更準確的判斷與決定擊球策略**。