

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

第一名

030119

甜蜜方程式

-探討網球拍甜區尋找方法及握拍方式

學校名稱：高雄市立明華國民中學

作者： 國二 邱湘涵 國二 高亮家 國二 葉柏輝	指導老師： 吳德儀 趙爵煥
---	-----------------------------

關鍵詞：甜區、碰撞中心、握拍方式

得獎感言

猶如夢境般的科展時光

能夠在這次科展如此的佳績，我們心中充滿了感謝。相信能獲得這樣耀眼的成績，我們認為指導老師們一定是不可或缺的，在我們遇到困難時，他們提供了許多建議；在我們遭遇瓶頸時，他們也給了我們許多的鼓勵，讓我們可以繼續往前邁進。也感謝同組的隊友，一路上一起度過許許多多喜悅、挫折、煎熬的時刻，終於同心協力的完成了這份報告，度過這有如夢境般的時光。

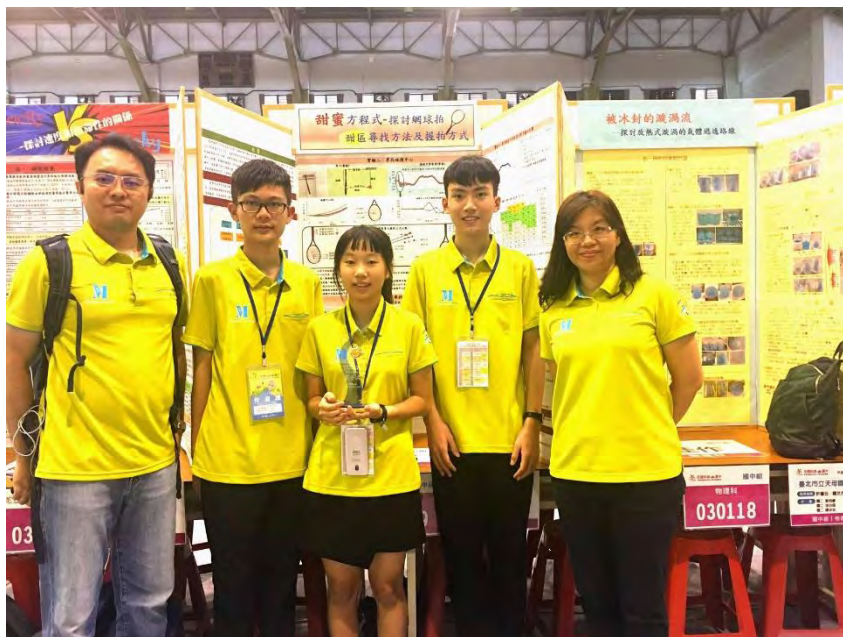
回想起研究過程中我們創造的故事，有歡笑、也有淚水，這都是我們無法忘卻的回憶。在這次實驗中，我們為了探討網球拍甜區三點不同的物理意義，總共使用了四個完全不同的裝置，都有著奇特的演進歷程：強力中心的裝置從一開始的窗台到角鋼架；節點從觀測水波、使用衣架擴大震動，到使用力矩分析；碰撞中心使用的手臂模擬裝置則從門弓器到鋁管加萬象接頭。雖然四個裝置截然不同，但無論哪一個裝置都是我們在假日、午休思考出來的心血結晶，在實驗結束後，我們仍無法將他們拆除。

從我們的裝置取得數據後，接著就進入了分析，在電腦前一組接著一組分析，彷彿沒有盡頭似的，雖然有些枯燥乏味，不過這也更增添了完成時的成就感。尤其在跑出線性關係式時，真的令我們開心不已，因為只要有它就可以快速的把球拍上最不會受傷的位置找出來，可以幫助眾多跟我們一樣的網球初學者。

在本次位於臺中的全國科展使我們拓展眼界、增廣見聞，也讓我們認識許多在不同領域鶴立雞群的高手，學到許多的知識。在公開展覽時，雖然有被絡繹不絕前來的老師、專家們嚇到，不過這是我們五天來最愉快的時段，因為我們可以與許許多多的人交流、讓大家更認識我們的作品、幫助到更多的人。當我們看到「國中組學校團體獎，第一名明華國中」的那一剎那，我們的開心之情難以言喻。接著又聽到我們獲得了國中組物理科全國第一，我們興奮得猶如衝破雲霄一般，欣喜若狂，一切的努力都獲得了肯定。

在這段有如夢幻般的日子裡，我們學習到幫助的重要，除了我們要互相合作補足各自的缺點之外，我們也受到了許多老師的幫助，包括對作品呈現的建議、指證我們的錯誤。這些都讓我們的作品能夠更加進步。此外，我們也發現遇到困難並非壞事，因為在解決困難時往往都會發現許多沒有注意到的細節，而這些都是可以使作品更加完善的養分。

在經歷這段恍如夢境般的時光後，我們得到了許多人未曾有過的經驗。雖然未必每個人都會成為科學家，但探索科學的精神絕對終身受用。



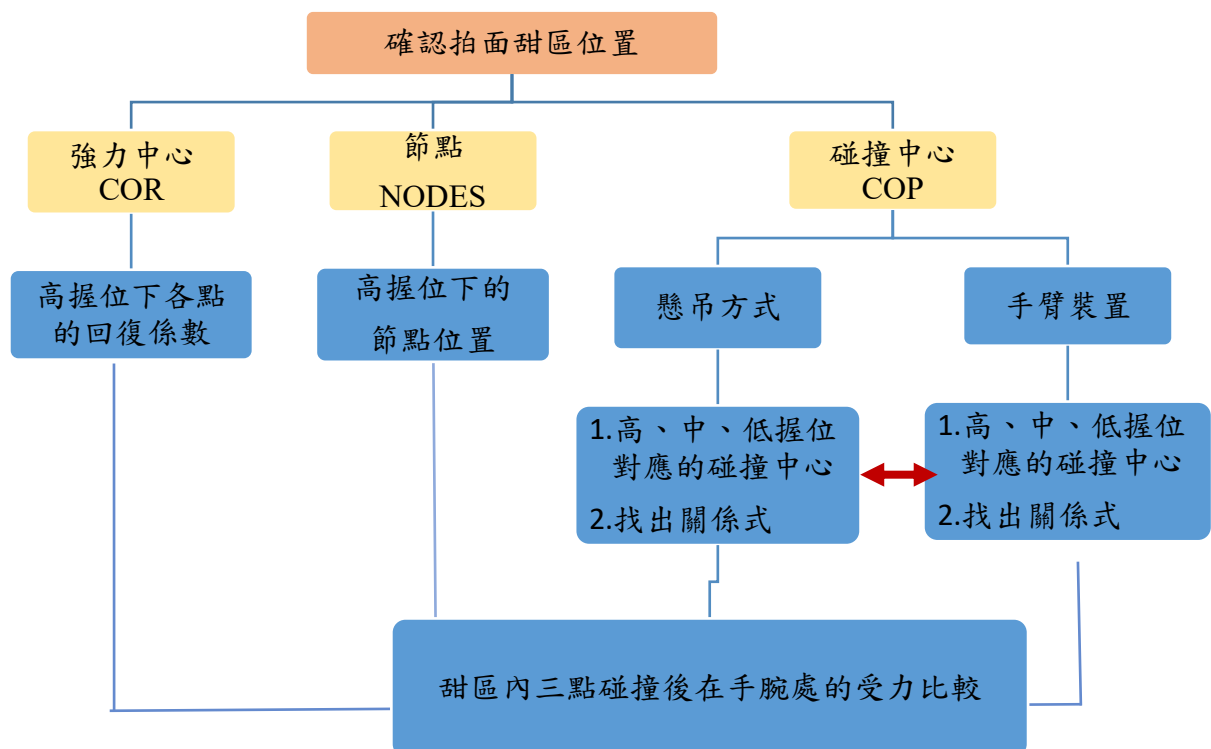
壹、摘要

我們採用不同架設並結合力度計記錄握把及手腕處的受力變化，找出網球拍甜區內的重要三點：節點(NODE)、碰撞中心(COP)及強力中心(COR)，協助初學者快速找到甜區並了解適當落點對手腕的重要。首先，由回復係數得知強力中心位於拍面的喉區中央；再來，以懸吊(鬆握)及連結手臂(緊握)兩種方式，分別搭配慢動作錄影及力度計找到三種握位下對應的碰撞中心位置，並模擬單擺運動，得到碰撞中心距離與週期平方的線性關係式，作為鬆握與緊握的甜區範圍參考。在節點實驗中，由能量守恆找出節點位置，與手測結果相符。最後，發現三點中又以碰撞中心最能降低手腕受力。因此，建議初學者採鬆握短拍方式，不僅甜區上移、放大，擊球強度獲得提升，也有效增加手腕舒適度。

貳、動機

我們從去年世大運活動中欣賞到精彩的網球比賽，查閱了網球的相關資料，得知網球是所有運動球種中使用拍面最大的，其拍面的甜區特別有意義，以正確的位置揮拍，不僅強勁，對手腕的負擔也較小。但網路上查閱的甜區位置差異頗多，引起我們想一探究竟的好奇心，也因此展開了一系列的探究。

參、研究流程圖



肆、研究目的

- 一、測量高握位下各點的回復係數
- 二、測量高握位下的節點位置
- 三、測量高、中、低種握位下的碰撞中心位置
 - (一) 懸吊方式下三種握位對應的碰撞中心位置
 - (二) 連結手臂下三種握位對應的碰撞中心位置
 - (三) 懸吊方式及連結手臂兩種方式比較
- 四、探討甜區內三點對手腕受力的影響

伍、實驗裝置

1. 實驗器材：萬向接頭、鋁管、鐵棒、銅製 T 型管、力度計、網球拍、網球。
2. 實驗裝置：手臂裝置、撞擊裝置。
3. 使用軟體：tracker

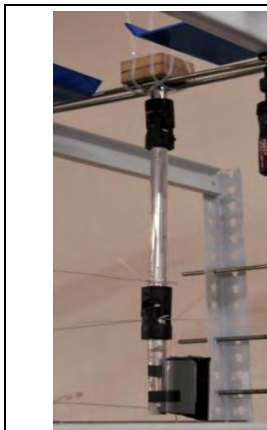


圖 5-1 利用萬向接頭和鋁管製成符合尺寸的手臂裝置。

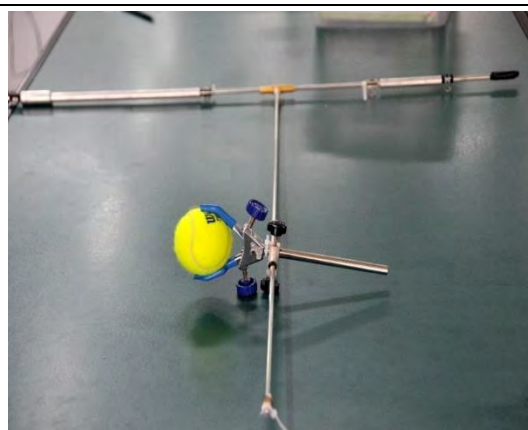


圖 5-2 以兩支鐵棒、銅製 T 型管及鐵夾製作撞擊裝置。



圖 5-3 球以模擬單擺方式，撞擊拍面上的指定位置。



圖 5-4 力度計



圖 5-5 網球拍
Head Challenge Pro

陸、實驗設計與名詞解釋

一、實驗用網球拍相關數據

Head Challenge Pro 網球拍					
穿線後質量	長度	拍面大小	縱線數	橫線數	穿線磅數
311 公克	685mm	100 平方英吋	16	19	46 磅
1. 我們選用的球拍線床由 16 條縱線以及 19 條橫線構成。而縱線與橫線並非均勻分布，而是縱線與橫線均採由密而疏的穿線方式自中央向周圍調整的方式。		2. 球拍各區名稱			

二、名詞解釋

(一) 甜區：

查閱文獻，網球拍的甜區是指拍面的有效擊球區。

甜區能夠給出足夠的威力，控球性和紮實的擊球。

當您使用甜區擊球時，舒適度最佳。

(二) 甜區內三點介紹

1. **節點(NODE)**：擊球後握把無振動感之位置。
2. **碰撞中心(COP)**：擊球時握把無撞擊感之位置。
3. **強力中心(COR)**：擊球後產生最高球速的位置。



(三) 拍面落點：

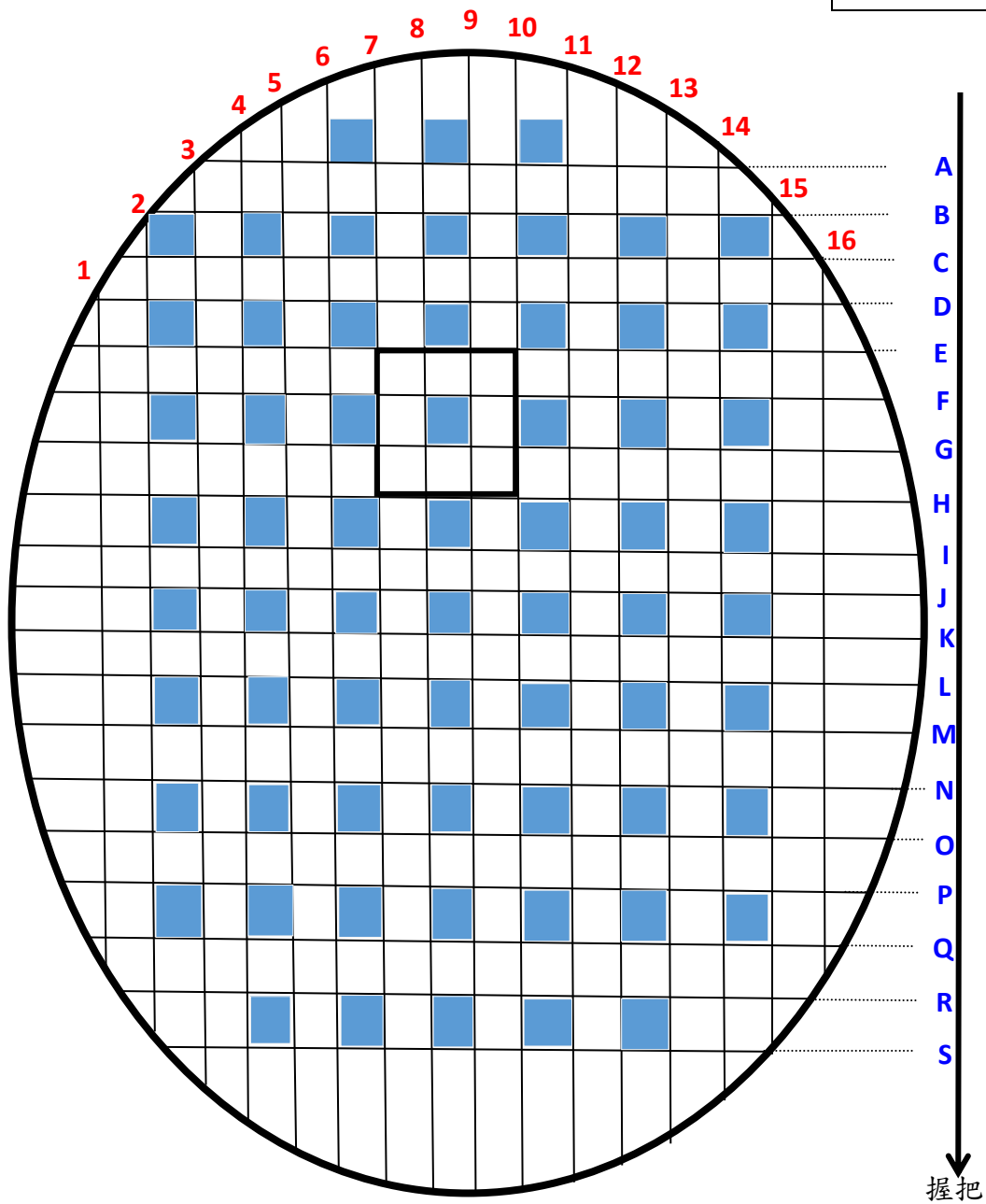
拍頭朝上，將 16 條縱線由左至右編上 1~16 號；橫線由上至下編號為 A~S。再以 9 個網格為 1 個撞擊單位，其中央網格為撞擊點，且每間隔 2 個網格為下一個撞擊

點，共選取了 64 個撞擊點進行實驗。

(四) 握位選擇：

考量手的寬度為 10 公分左右，我們選取了 3 種握位：

1. 高握位：手握位置的中心距離把手末端 5 公分。
2. 中握位：手握位置的中心距離把手末端 10 公分。
3. 低握位：手握位置的中心距離把手末端 15 公分。



柒、實驗步驟與研究結果

一、探討高握位下各點的回復係數

(一) 架設與步驟

1. 於球拍末端 5 公分處，利用兩支 F 夾將球拍固定於角鋼架上。
2. 網球於拍面各測試位置上方 78.85 公分處自由落下，並同時進行錄影，如圖 7-1。
3. 透過 tracker 分析，計算出各點的回復係數 $= v_2/v_1 = \sqrt{h_2/h_1}$ ，其中 V_2 為反彈速度， V_1 為入射速度。 h_2 為反彈高度， h_1 為入射高度。

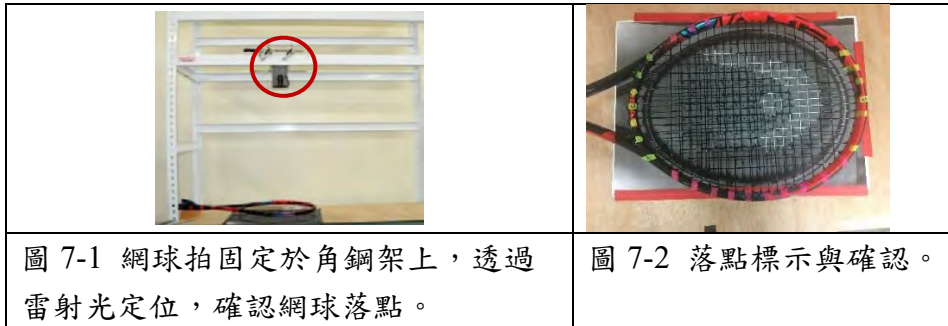


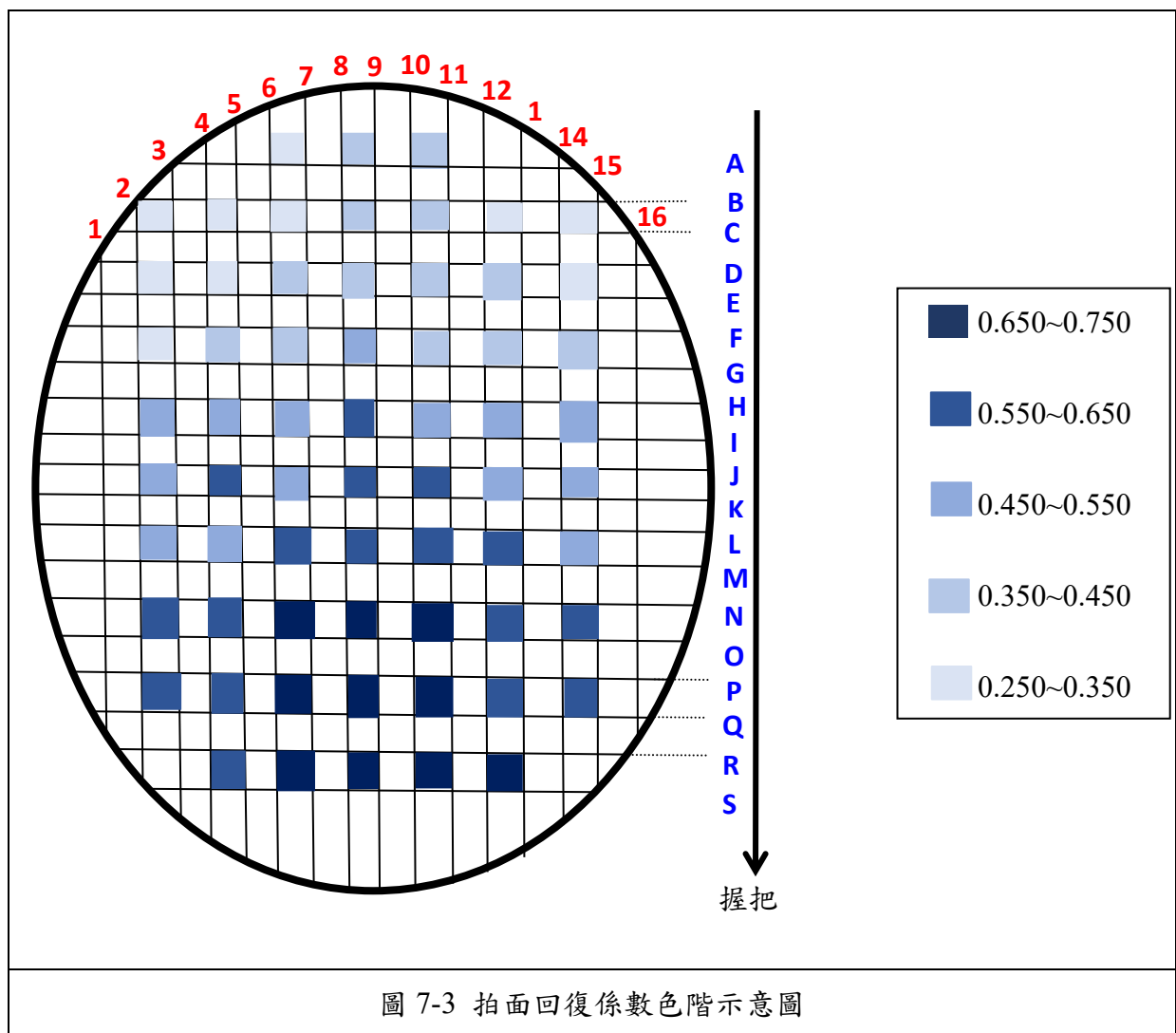
圖 7-1 網球拍固定於角鋼架上，透過雷射光定位，確認網球落點。

圖 7-2 落點標示與確認。

(二) 實驗記錄

1. 我們透過 tracker 分析慢動作影片，確認網球與拍面上各點碰撞後的反彈高度，再代入 $\sqrt{h_2/h_1}$ ，求出各個位置的回復係數。
2. 我們透過表格整理拍面上各撞擊點的回復係數，並塗上漸層顏色顯示回復係數的分布與變化。
 - 0.650~0.750；
 - 0.550~0.650；
 - 0.450~0.550；
 - 0.350~0.450；
 - 0.250~0.350

縱 橫		左 → 右						
		23	45	67	89	1011	1213	1415
上 ↓ 下	XA			0.321	0.396	0.375		
	BC	0.256	0.316	0.323	0.377	0.388	0.309	0.301
	DE	0.295	0.330	0.362	0.400	0.381	0.356	0.262
	FG	0.317	0.359	0.399	0.450	0.386	0.361	0.412
	HI	0.358	0.462	0.529	0.565	0.540	0.508	0.453
	JK	0.454	0.558	0.533	0.582	0.579	0.540	0.510
	LM	0.468	0.497	0.583	0.625	0.636	0.592	0.530
	NO	0.526	0.604	0.675	0.691	0.676	0.571	0.575
	PQ	0.586	0.641	0.690	0.700	0.691	0.643	0.580
RS		0.586	0.677	0.750	0.744	0.702		



(三) 研究結果

1. 考量持反手拍的所需空間，我們採取高握位的位置來進行實驗。
2. 實驗中，我們透過雷射定位，有效提升了網球落點的穩定度及數據的準確度。
3. 線床的回復係數大小為喉區>頂區，中央>兩側。而中央縱線的回復係數大小由頂區的**0.396** 逐漸增加至喉區 **0.750**，故 **RS89** 為此球拍的強力中心，有利於回擊出高速球。
4. 我們從參考資料中得知網球與線床的接觸時間約為 3~5 毫秒間，碰撞時造成球拍本身及線床形變所儲存能量來不及轉移給網球，網球就已離開拍面了。故球拍勁度愈大及線床磅數愈高，形變愈少，將有利於網球的反彈球速。
5. 頂區的位置如預期的具有最小的回復係數，因為球拍握把處為支點時，頂區受力造成的力矩最大導致球拍本身的形變最多，損失最大能量，故回復係數最小。

二、探討高握位下的節點位置

(一)步驟與方法

1. 同一人以手分別握在球拍的高、中、低三種握位，再以網球敲擊拍面各點，感受握位處的振動感覺，以無感覺、有點麻、很麻三種程度描述之。
2. 準備兩根鐵棒夾住球拍的指定握位處，再以束帶將鐵棒兩端固定在角鋼架上。其上方 2 公分處拉線至 1 號力度計；下方 2 公分處拉線至 2 號力度計。
3. 以撞擊裝置進行各點的碰撞 3 次，以力度計紀錄受力情形。

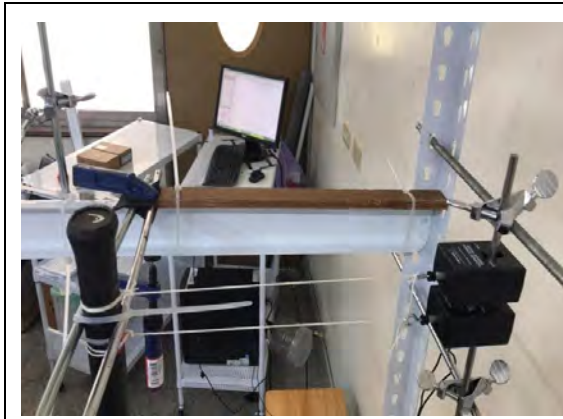


圖 7-4 球拍以兩根鐵綁夾住作為支點，上方 2cm 處拉線至 1 號力度計；下方 2cm 處拉線至 2 號力度計。



圖 7-5 進行中央區域各點的碰撞各 3 次，以力度計紀錄受力變化情形。

(二)實驗記錄與分析

1. 手測感覺

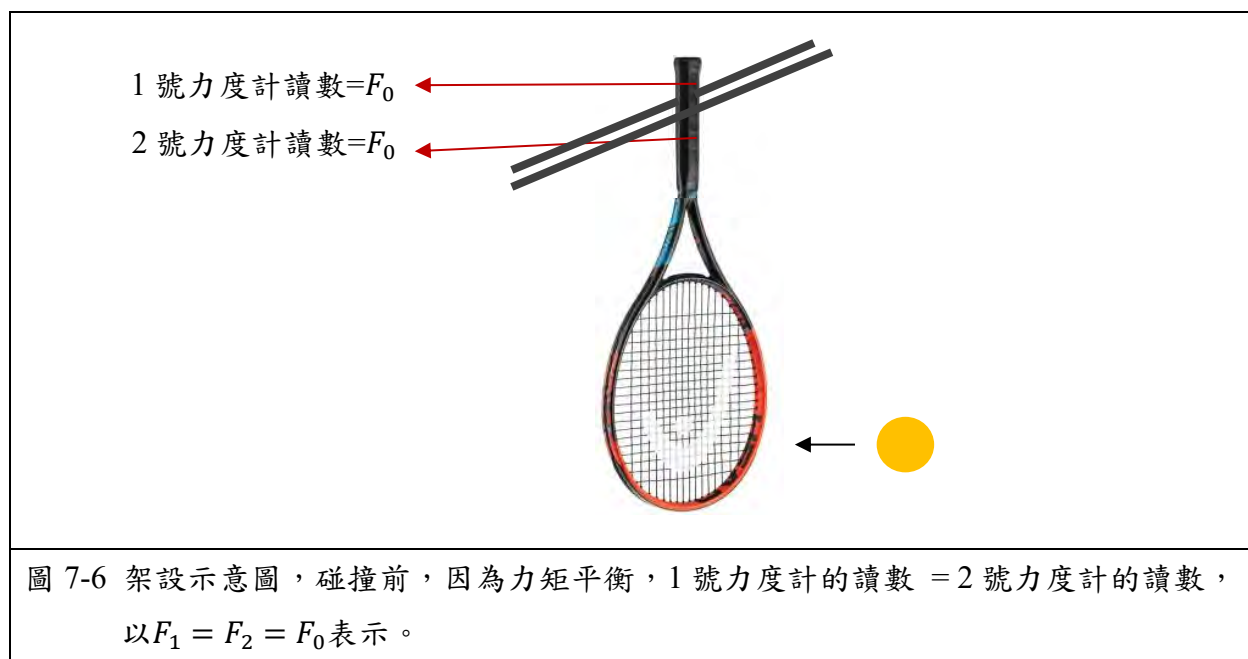
高握位	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA		2	2	2	2	2	
BC	2	2	2	2	2	2	2
DE	2	2	2	2	2	2	2
FG	2	2	1	1	1	2	2
HI	2	1	1	1	1	1	2
JK	1	1	1	0	1	1	1
LM	0	0	1	1	1	0	0
NO	1	1	1	1	1	1	1
PQ	2	2	2	2	2	2	2
RS	2	2	2	2	2	2	2

表 7-3 中握位下各點碰撞感覺紀錄							
	[無感：0]		[有點麻：1]		[麻：2]		
中握位	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA		2	2	2	2	2	
BC	2	2	2	2	2	2	2
DE	2	1	1	1	1	1	2
FG	1	1	1	1	1	1	1
HI	1	0	0	0	0	0	1
JK	2	1	1	1	1	1	2
LM	2	2	1	1	1	2	2
NO	2	2	2	2	2	2	2
PQ	2	2	2	1	2	2	2
RS	2	2	2	1	2	2	2

表 7-4 低握位下各點碰撞感覺紀錄							
	[無感：0]		[有點麻：1]		[麻：2]		
低握位	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA		2	2	2	2	2	
BC	2	2	2	2	2	2	2
DE	1	1	1	1	1	1	1
FG	0	1	1	1	1	1	0
HI	1	0	0	0	0	0	1
JK	1	1	1	1	1	1	1
LM	1	1	1	1	1	1	1
NO	2	2	2	2	2	2	2
PQ	2	2	2	2	2	2	2
RS	2	2	2	2	2	2	2

2. 透過力度計紀錄：

(1)分析原理：我們分析球拍力矩，計算出各個位置的碰撞作用力大小以及碰撞力矩。



<p>$F_0 + F_1$</p> <p>支點</p> <p>$F_0 - F_2$</p> <p>$d=2\text{cm}$</p> <p>$d=2\text{cm}$</p> <p>L</p> <p>碰撞作用力 F</p>	<p>先將兩個力度計歸零，紀錄碰撞時的受力變化。</p> <p>F_1 是支點上方 1 號力度計讀數變化數值，</p> <p>F_2 是支點下方 2 號力度計讀數變化數值，</p> <p>F 是網球對該位置的碰撞作用力，</p> <p>d 是力度計至支點的距離，</p> <p>L 是碰撞位置到支點的距離。</p> <p>碰撞時，透過左圖中的順時針力矩 \geq 逆時針力矩，我們可以得到，</p> $(F_0 - F_2) \times d + F \times L \geq (F_0 + F_1) \times d,$ <p>求出，碰撞力矩 $F \times L \geq (F_1 + F_2) \times d$</p> <p>碰撞作用力 $F \geq \frac{(F_1 + F_2) \times d}{L}$</p>
<p>圖 7-7 碰撞時，透過力矩計算出網球對各點的碰撞作用力。</p>	

(2)碰撞時的力度計讀數變化：以碰撞 JK89 為例，我們取第一個峰值代表碰撞當下的球拍受力變化，並代入公式求出碰撞作用力以及碰撞力矩。

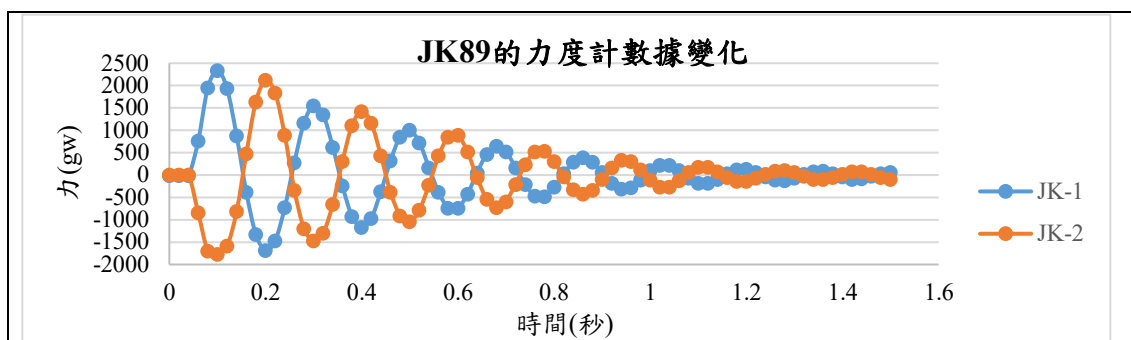



圖 7-8 網球碰撞 JK89 後，兩個力度計記錄的受力變化

(3)作用力及碰撞造成的力矩比較：

	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA			131	132	127		
BC			142	141	137		
DE			149	154	154		
FG			163	164	166		
HI	170	176	176	179	181	174	165
JK	185	190	197	203	200	185	188
LM	186	198	204	202	208	204	193
NO			216	225	218		
PQ			235	244	245		
RS			258	264	273		

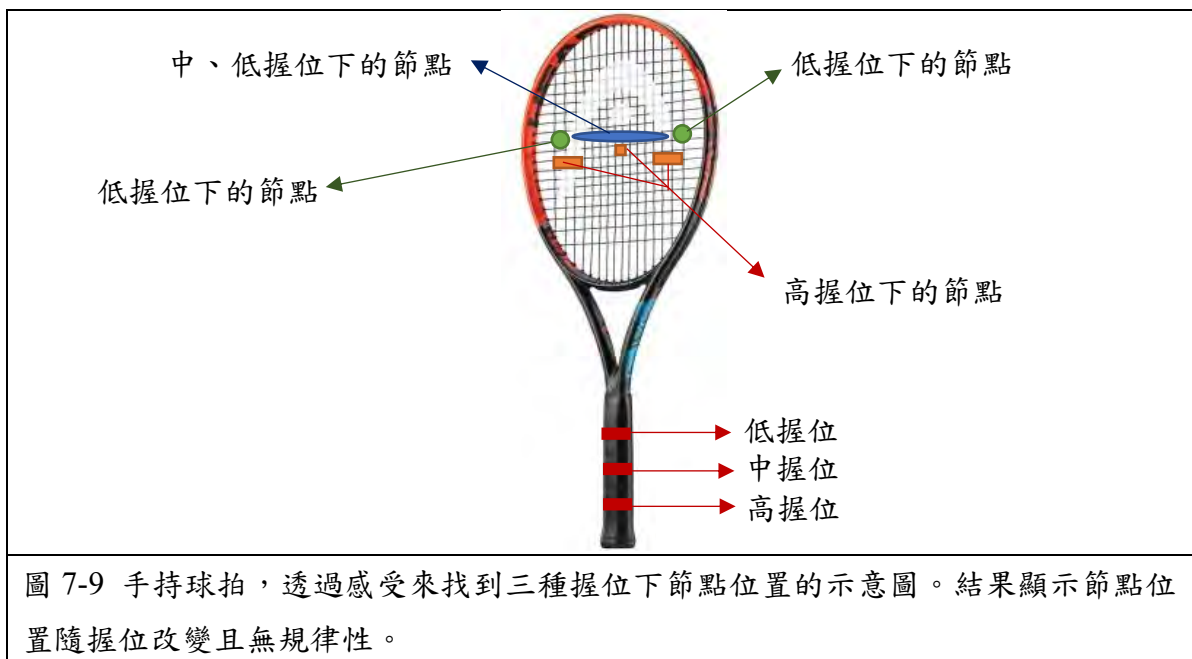
	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA			7164	7188	6929		
BC			7322	7308	7079		
DE			7256	7499	7510		
FG			7509	7575	7677		
HI	7402	7677	7642	7808	7876	7589	7160
JK	7639	7842	8125	8365	8239	7822	7747
LM	7329	7785	8046	7958	8177	7776	7614
NO			7950	8266	8007		
PQ			8018	8211	8098		
RS			8088	8293	8088		

表 7-7 拍面上中央縱線上的回復係數、碰撞作用力及接觸時間比值一覽表

拍面示意圖	位置	F 碰撞作用力 (gw)	碰撞力矩 (gw.cm)	回復係數	$\Delta v = v_{\text{反射}} - v_{\text{入射}}$ 速度變化比值	$\Delta t \propto \frac{\Delta v}{F}$ 接觸時間比值
	XA89	132	7188	0.40	1.40	2.25
	BC89	141	7308	0.38	1.38	2.21
	DE89	154	7499	0.40	1.40	1.65
	FG89	164	7575	0.45	1.45	1.60
	HI89	179	7808	0.57	1.57	1.46
	JK89	203	8365	0.58	1.58	1.00
	LM89	202	7958	0.63	1.63	1.11
	NO89	225	8266	0.69	1.69	1.07
	PQ89	244	8211	0.70	1.70	1.00
	RS89	264	8293	0.75	1.75	1.29

(三)結論：

- 一手持拍，另一手拿網球敲擊線床上的不同位置時，手握之處無振動感所對應的撞擊位置便是節點，而我們發現節點的位置及範圍會隨著握位改變。



2. 我們考量節點位置不隨握位改變，因此只進行高握位的探討，且於架設時將球拍向下垂放，使得球拍重量不會影響力矩。
3. 透過力矩分析，得到 JK89 碰撞力矩最大，具有最大的轉動能量。
4. 我們嘗試由能量傳遞找出節點位置，即 $\text{網球輸入的能量} = \text{球拍振動能量} + \text{擺動能量}$ 。結果顯示當網球碰撞 JK89 瞬間，球拍擺動能量最大，高達 8365gw-cm，故球拍本身的振動能量最小，因此推測 JK89 為高握位下的節點位置，與手測結果相符。
5. 分析過程中發現，此實驗中的碰撞作用力搭配強力中心實驗得到的回復係數，可以得到拍面上各點的接觸時間比。
6. 搭配強力中心實驗得到的回復係數，代入 $F = ma = m \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} \right)$ ， $\Delta t = \frac{m \cdot \Delta v}{F}$ ，在 m 為定值下，我們得出各碰撞點的接觸時間比值，且發現頂區的接觸時間為喉區的 2 倍多，如表 7-7 所示。

三、探討高、中、低三種握位下的碰撞中心

我們查閱文獻後得知，網球正向撞擊球拍後，會造成球拍的移動和以質心為支點的轉動現象，即球拍受到正向力後的運動可以視為移動和轉動的結果總和。因此，拍面上存在著一個位置，在受到正向力後，於握把處的合力為零，也就是握把處感受不到撞擊力，此位置即為碰撞中心(COP)。

然而，我們猜想實際揮拍時，難免因緊張而緊握球拍，導致揮拍過程中的支點向後移，定義中的碰撞中心是否也會向拍面喉區移動？因此，分別以懸吊方式模擬鬆握以及手臂裝置模擬緊握兩種方式來進行實驗。

(一) 懸吊方式下三種握位對應的碰撞中心位置

1. 架設與步驟

- (1) 選定握把的高握位處貼上反光貼紙，利用束帶、棉繩將球拍懸吊起來。
- (2) 利用棉繩網綁網球，固定棉繩長度及擺角，以單擺方式撞擊球拍上的各個撞擊點 5 次，搭配慢動作錄影，進行 tracker 分析。
- (3) 利用兩隻三叉夾夾住球拍的握位處進行小角度擺盪，取得該握位下的震盪週期(T)。
- (4) 再依序將懸吊位置調整為中握位以及低握位，重複(1)~(3)。

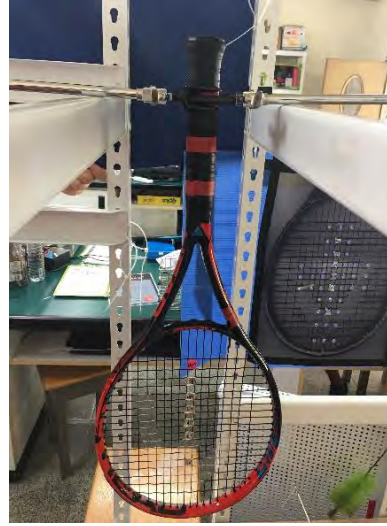


圖 7-10 以兩支三叉夾夾住球拍的握位處，置於鐵架上進行小角度的擺盪，紀錄 5 次震盪時間，取得震盪週期(T)

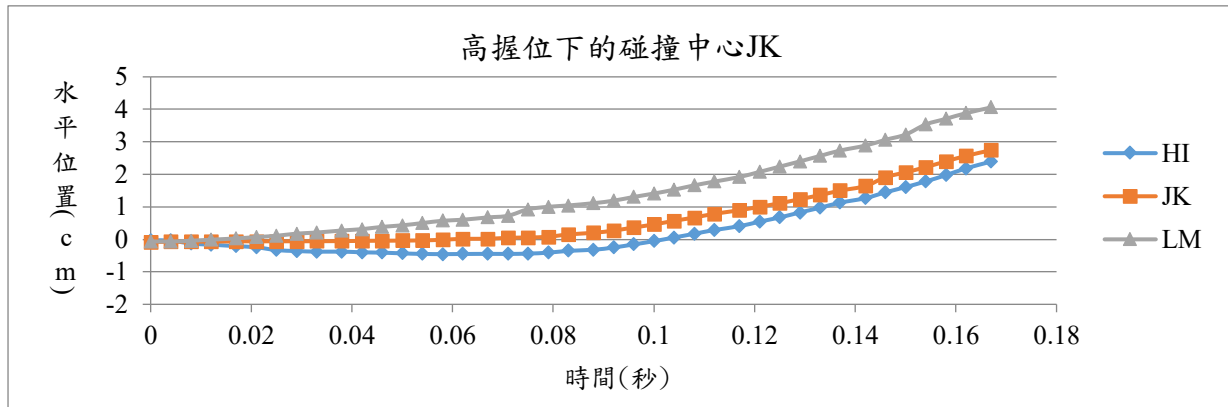
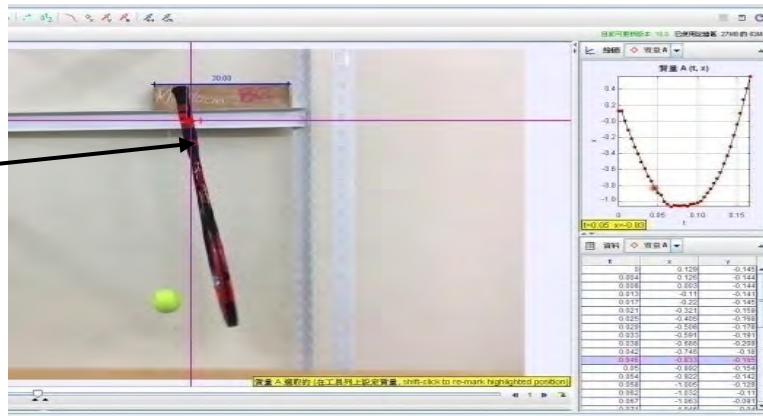


圖 7-12 以 excel 分析撞擊後懸吊處的水平位置變化，找到該握位下的碰撞中心

網球以單擺模式碰撞中央縱線各點，以 tracker 分析慢動作影片追蹤懸吊處碰撞前後的水平位置變化，作出懸吊處得水平位置對時間的關係圖，找到該握位下的碰撞中心(COP)位置。

2. 實驗記錄與分析

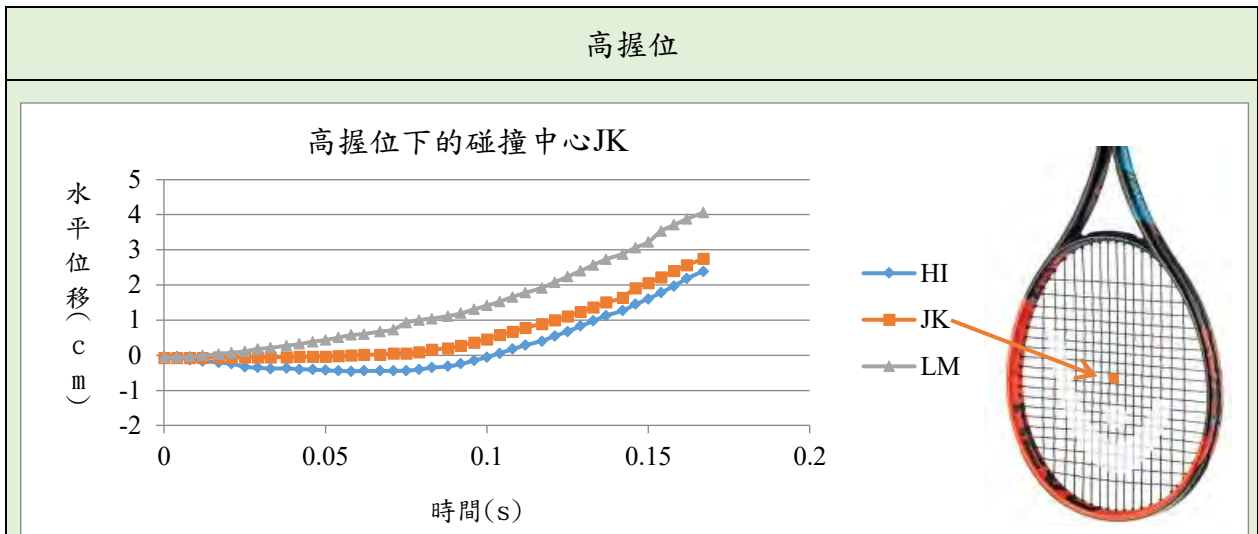


圖 7-13 懸吊於高握位時，當網球碰撞於

HI89 時，懸吊處於碰撞後向後移動，與網球運動方向相反，

JK89 時，懸吊處於碰撞後在原處停留 16 個影格，

LM89 時，懸吊處於碰撞後向前移動，與網球運動方向相同。

因此，JK89 為高握位下的碰撞中心。



圖 7-14 碰撞喉區 RS 後，握位處向前移動的影像疊合圖。

圖 7-15 碰撞 JK 後，握位處不動的影像疊合圖，可知 JK89 為高握位下的碰撞中心。

圖 7-16 碰撞喉區 RS 後，握位處向前移動的影像疊合圖。

結果：

1. 碰撞 JK 後，懸吊的握位處位置在原地停留了 16 個影格，可以確認 JK 為高握位下的碰撞中心，佐以重疊的影像也可看到懸吊處因合力為 0 而靜止。
2. 喉區 RS 的重疊影像中可看出懸吊處瞬間向前運動的趨勢；頂區 XA 的重疊影像中可看出懸吊處瞬間向後運動的趨勢。

中握位

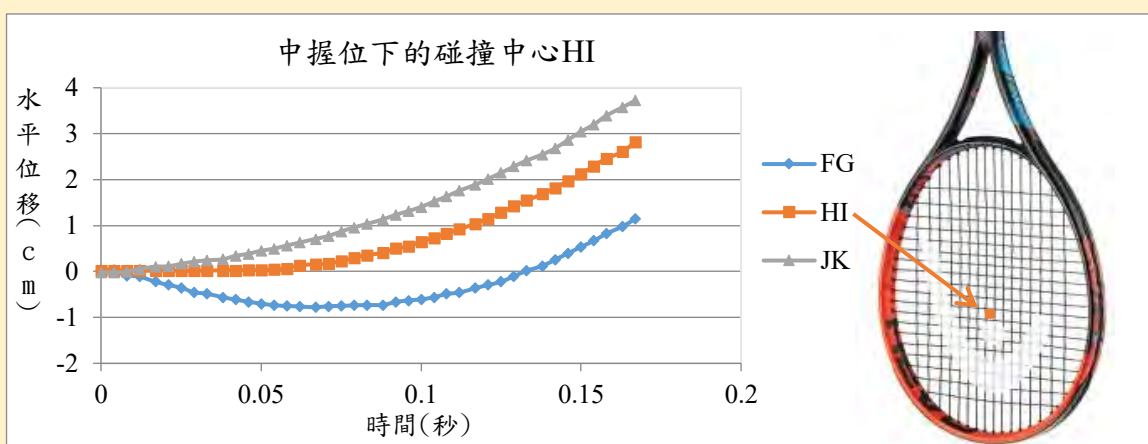


圖 7-17 懸吊於中握位時，當網球碰撞於

FG89 時，懸吊處於碰撞後向後移動，與網球運動方向相反，

HI89 時，懸吊處於碰撞後在原處停留 15 個影格，

JK89 時，懸吊處於碰撞後向前移動，與網球運動方向相同。

因此，HI89 為中握位下的碰撞中心。

<p>圖 7-18 碰撞喉區 RS89 後，握位處向前移動的影像疊合圖。</p>	<p>圖 7-19 碰撞 HI89 後，握位處不動的影像疊合圖，可知 HI89 為高握位下的碰撞中心。</p>	<p>圖 7-20 碰撞喉區 BC89 後，握位處向前移動的影像疊合圖。</p>

結果：

1. 碰撞 HI89 後，懸吊的握位處位置停留了 15 個影格，為中握位下的碰撞中心。
2. 搭配影像疊合圖，也可以觀察到網球碰撞 HI89 瞬間，握位處的位置做為支點沒有移動，為此握位下的碰撞中心。

低握位

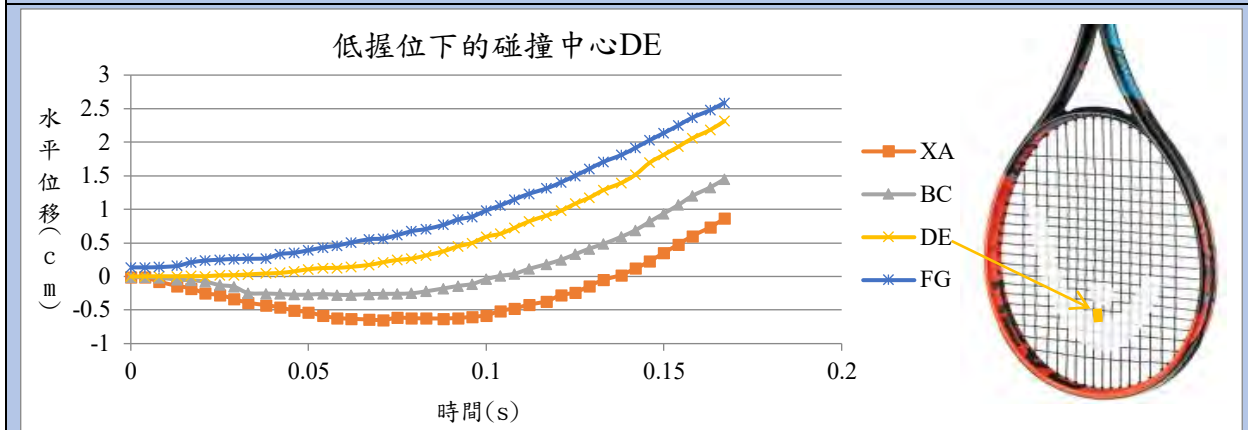


圖 7-21 懸吊於低握位時，當網球碰撞於

FG89 時，懸吊處於碰撞後向前移動，與網球運動方向相同，

DE89 時，懸吊處於碰撞後在原處停留 8 個影格，

BC89 時，懸吊處於碰撞後向後移動，與網球運動方向相反。

XA89 時，懸吊處於碰撞後向後移動，與網球運動方向相反。

因此，DE89 為中握位下的碰撞中心。

<p>圖 7-22 碰撞喉區 RS89 後，握位處向前移動的影像疊合圖。</p>	<p>圖 7-23 碰撞 DE89 後，握位處不動的影像疊合圖，可知 DE89 為高握位下的碰撞中心。</p>	<p>圖 7-24 碰撞喉區 XA89 後，握位處向前移動的影像疊合圖。</p>

結果：

1. 碰撞 DE89 後，懸吊的握位處位置停留了 7 個影格，為低握位下的碰撞中心。
2. 搭配影像疊合圖，可以觀察到網球碰撞 DE89 瞬間，握位處的位置作為支點沒有移動，為此握位下的碰撞中心。

3. 懸吊下的碰撞中心距離與週期平方之關係

	高握位	中握位	低握位
週期(s)	1.33	1.31	1.31
週期平方(s ²)	1.78	1.71	1.71
碰撞中心位置編號	JK89	HI89	DE89
碰撞中心到握位距離(cm)	45.61	43.03	43.03

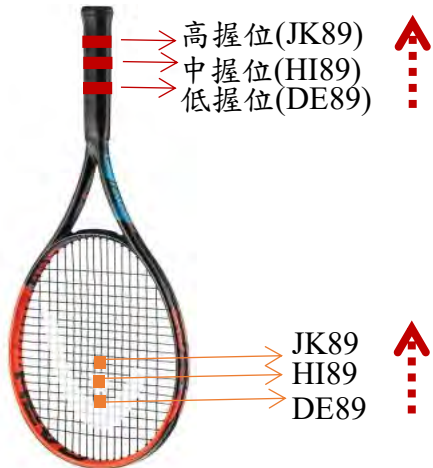


圖 7-25 懸吊下，碰撞中心隨著握位改變示意圖

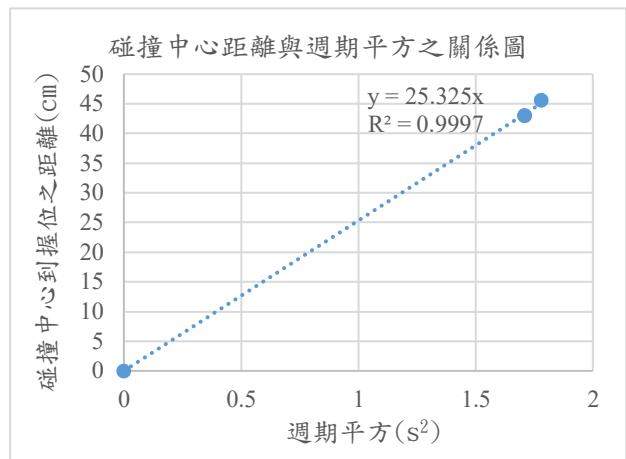


圖 7-26

1. 透過懸吊模擬鬆握的持拍方式。
2. 數據顯示，碰撞中心位置隨握位移動而改變，且移動方向相同。高握位時的碰撞中心接近拍面中心 JK89，握位向下移動時，對應的碰撞中心也向下(頂區)移動。
3. 我們以握位處為支點，取得小角度振盪的週期(T)，**模擬單擺的運動狀態，得到線性的關係式為：碰撞中心到握位的距離 = 25.33 × T²。**
4. 握拍方式由高握位逐漸改為低握位的過程中，碰撞中心同方向地往拍頭頂區移動。



圖 7-27 碰撞中心則隨著握位同方向移動。

(二) 連結手臂方式下三種握位對應的碰撞中心位置

1. 架設與步驟

- (1) 標示握把上高、中、低握位的範圍。
- (2) 將裁切的 PVC 水管套在指定握位處，模擬手握球拍的狀態。
- (3) 將球拍黏附在手腕關節前的鋁管(模擬手掌)上，再將肘關節後的鋁管固定在角鋼架上。
- (4) 測量球拍以手腕關節為支點的小角度震盪，取得高、中、低握位下的振盪週期。
- (5) 在模擬手臂的手腕關節前、後方拉線至力度計，測量此握位下受撞擊後的受力大小。



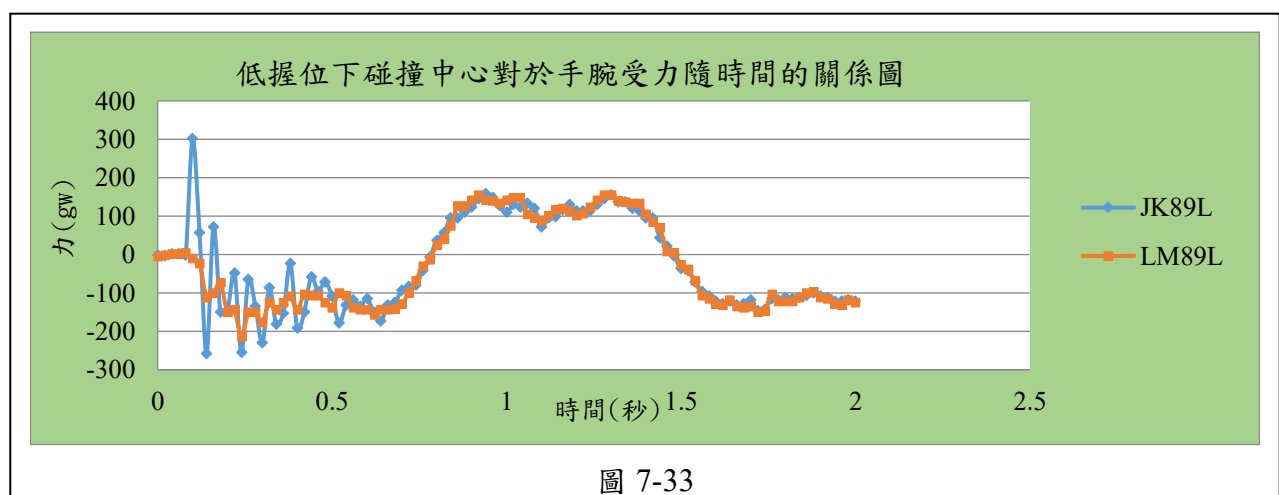
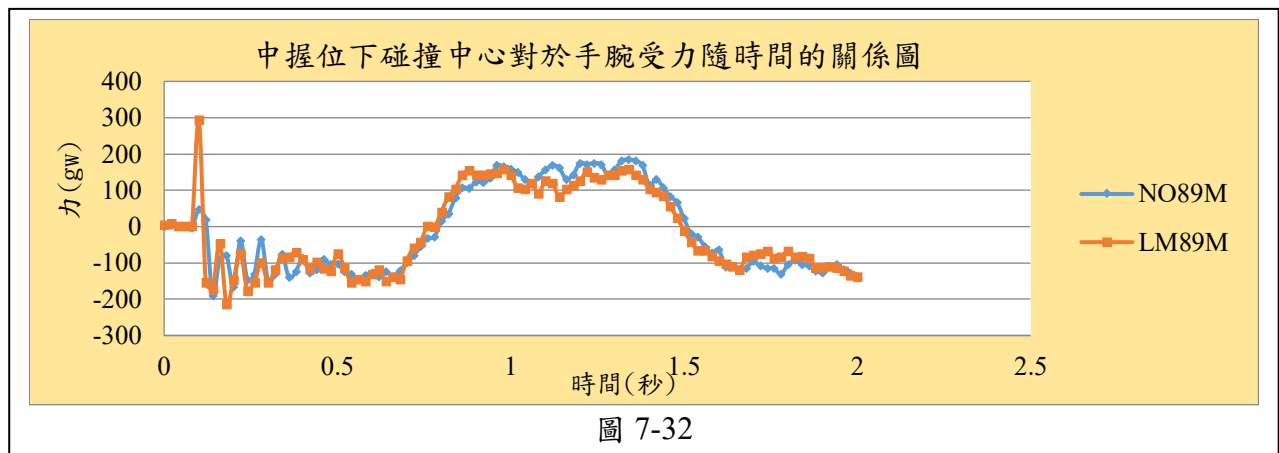
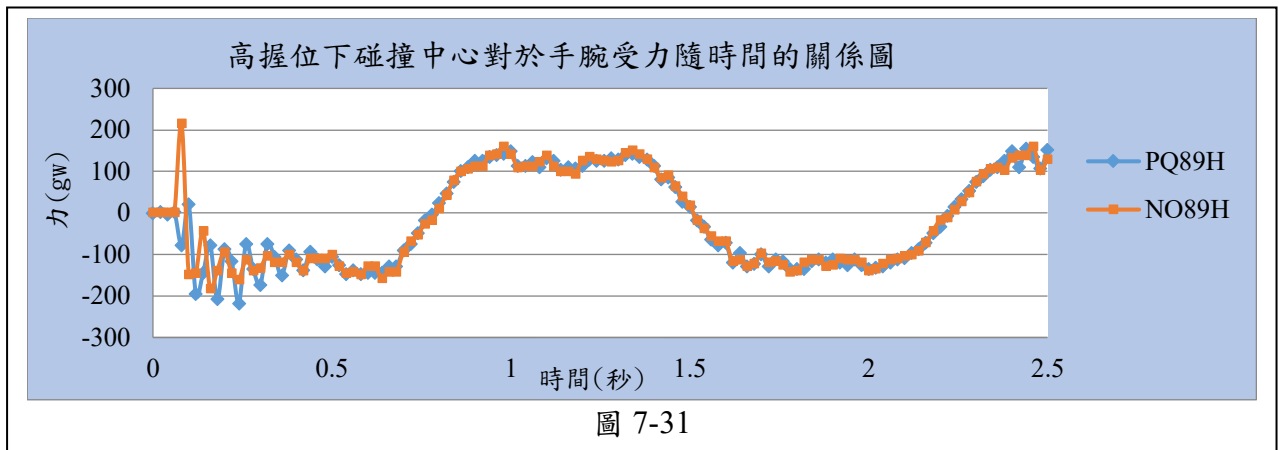
2. 數據與結果

球拍連結手臂裝置後，對中央縱線各點進行碰撞，透過力度計記錄手腕的受力，手腕受力最接近零所對應的碰撞位置，即為該握位下對應的碰撞中心。

(1) 採高握位時，碰撞 PQ89 對手腕受力最接近零，故 PQ89 為高握位下的碰撞中心。

採中握位時，碰撞 NO89 對手腕受力最接近零，故 NO89 為中握位下的碰撞中心。

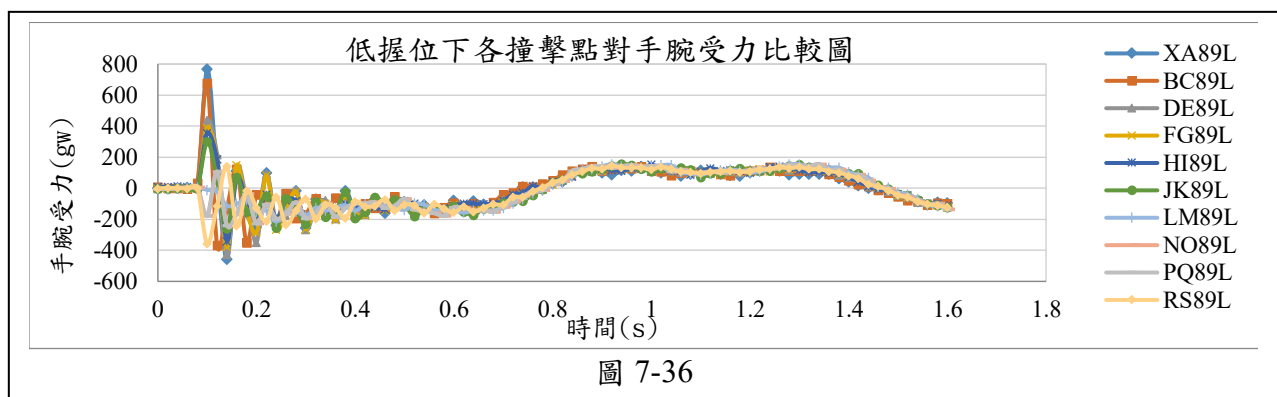
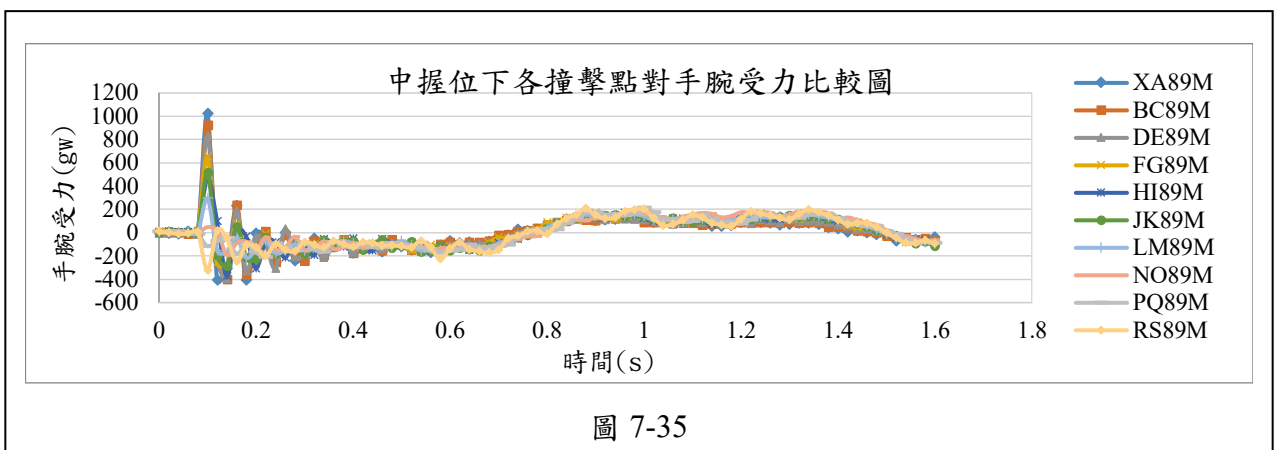
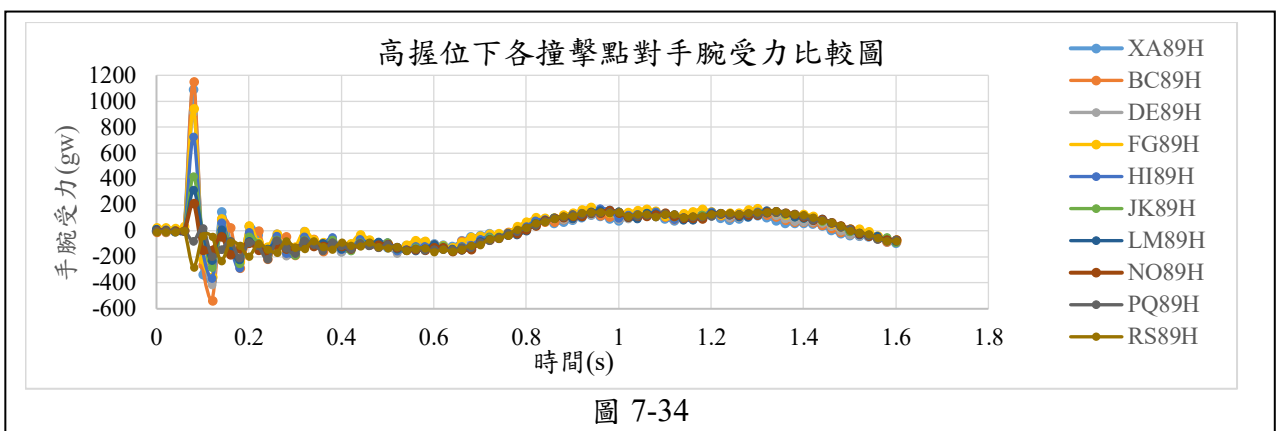
採低握位時，碰撞 LM89 對手腕受力最接近零，故 LM89 為低握位下的碰撞中心。



(2)以碰撞中心為基準，當擊球位置往頂區移動時，手腕處受力與球的前進方向相反，導致力度計的讀數增加；當擊球位置往喉區移動時，手腕處受力與球的前進方向相同，力度計的讀數減少。

(3)下圖 7-34 顯示，採高握位，擊球位置落在頂區 XA89 時，手腕受力值高達約 1200gw，負擔很大；往喉區的移動過程中，手腕受力隨之下降，而後呈現負值。而振盪週期與碰撞位置無關，均為 1.48 秒左右，且振幅大小也都相似。

(4)下圖 7-36 顯示，低握位時的碰撞造成手腕的受力為三種握位中最小，頂區 XA89 造成手腕受力約 800gw。



3. 連接手臂裝置的碰撞中心距離與週期平方之關係

	高握位	中握位	低握位
週期(s)	1.37	1.32	1.28
週期平方(s ²)	1.87	1.75	1.64
碰撞中心位置	PQ89	NO89	LM89
碰撞中心到握位距離(cm)	39.10	36.50	34.50



圖 7-37 連結手臂裝置，碰撞中心隨著握位改變示意圖

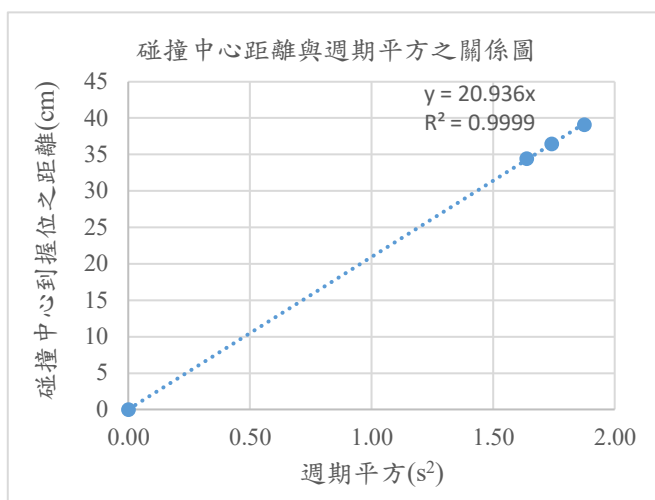


圖 7-38

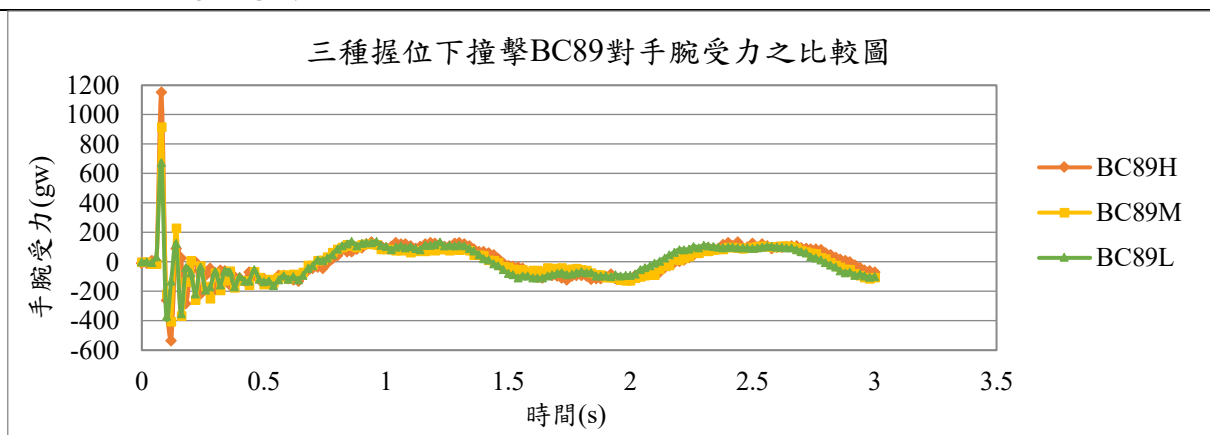


圖 7-39

結論：

1. 透過連結至手臂裝置，模擬緊握導致支點後移的情形。
2. 上圖 7-39 顯示，碰撞拍面頂區 BC89，高握位下對手腕的受力最大，低握位最小。
3. 連結手臂後，碰撞中心的位置亦會隨著握位改變，但位置變動較少且位在拍面中下方。
4. 我們以握位處為支點，取得小角度振盪的週期(T)，模擬單擺的運動狀態，得到線性的關係式為：碰撞中心到握位的距離 = $20.94 \times T^2$ ，握位的影響減少。

(三) 懸吊方式及連結手臂兩種方式比較

	連結手臂(模擬緊握)				懸吊方式(模擬鬆握)			
	週期(s)	T ² (s ²)	COP 位置	COP 到握位的距離(cm)	T(s)	T ² (s ²)	COP 位置	COP 到握位的距離(cm)
高握位	1.37	1.87	PQ89	39.10	1.33	1.78	JK89	45.61
中握位	1.32	1.75	NO89	36.50	1.31	1.71	HI89	43.03
低握位	1.28	1.64	LM89	34.50	1.31	1.71	DE89	43.03

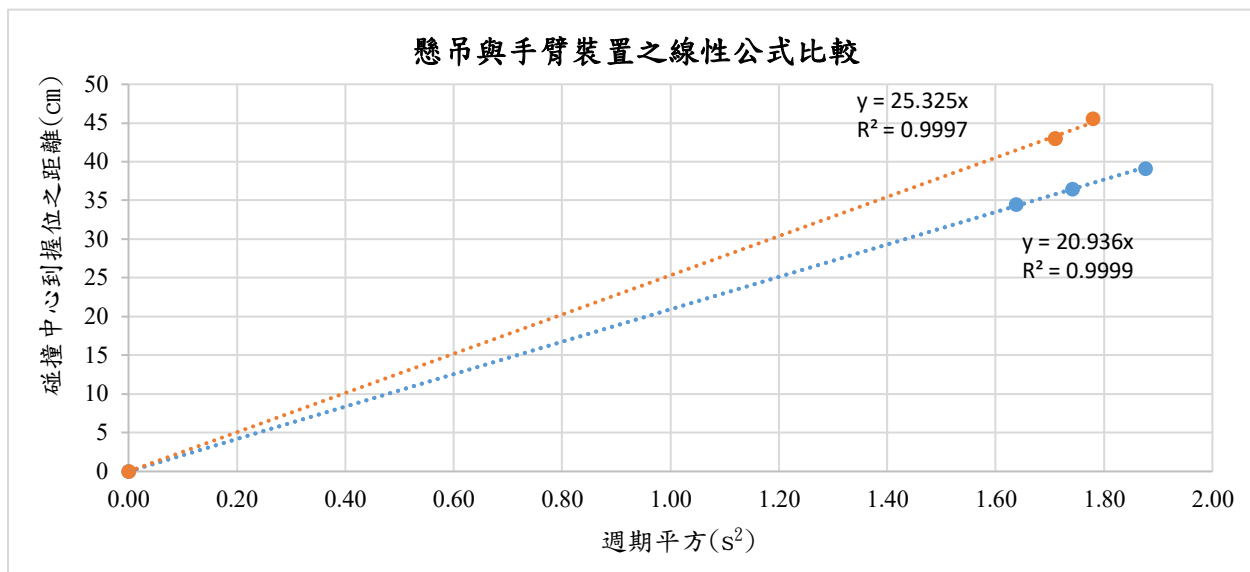


圖 7-40

1. 實驗中，以懸吊模擬鬆握狀態，連結至手臂裝置模擬緊握狀態。
2. 連結手臂後，因球拍的重心及支點均向後移動，碰撞中心如同預期的也向後移動，更接近位於喉區的強力中心。
3. 連結手臂後，
 - 高握位的碰撞中心由 JK89 後移兩個位置到 PQ89；
 - 中握位的碰撞中心由 HI89 後移兩個位置到 NO89；
 - 低握位的碰撞中心由 DE89 後移三個位置到 LM89。

碰撞中心到握位距離與週期平方的比值 = $\frac{\text{碰撞中心到握位的距離}}{\text{週期}^2}$ 由 25.33 下降至 20.94。

4. 透過關係式，可初步判斷碰撞中心位置。例如：以拇指和食指輕夾住球拍，求出小角度震盪時的週期 T，再將週期平方 T² 乘以 20.94 即為碰撞中心距離握位的距離了。

5. 連結手臂後，甜區內的三點分布均為節點在上、碰撞中心居中、強力中心在下的分佈，如圖 7-39 所示。



圖 7-41 連結手臂裝置，三種握位下的甜區示意圖

四、探討高握位下拍面各點受力對手腕的影響

甜區包含的節點、碰撞中心以及強力中心。但甜區範圍頗大，其內部三點受力後對手腕造成的影響應該也不相同，因此我們進一步探討拍面上各點受力後對手腕的影響，試著找出最佳位置。

(一) 架設與方法

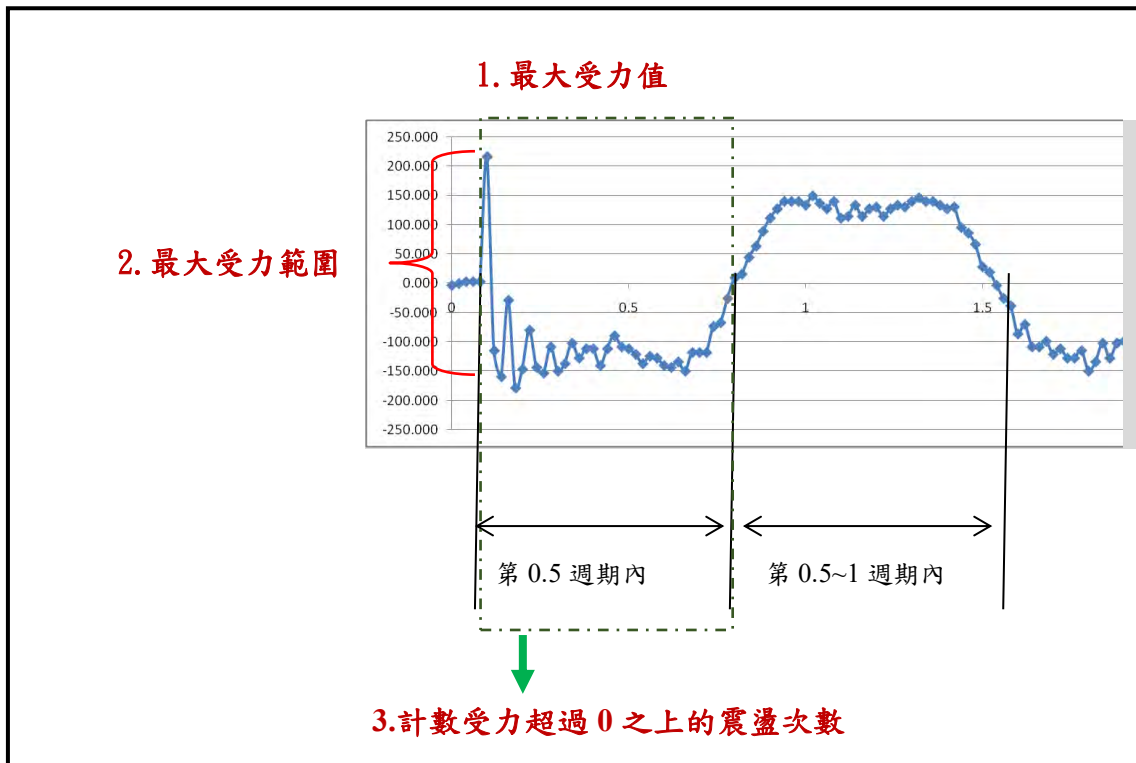
將實驗手臂連結至握把的高、中、低三種握位，根據碰撞中心的步驟，進行拍面上 64 個位置的碰撞，每次實驗 3 次，如右圖 7-40 所示。

(二) 實驗記錄與結果

1. 依力度計記錄的受力變化，計算各位置碰撞瞬間的
 - (1) 最大受力值
 - (2) 最大受力範圍
 - (3) 碰撞後，手腕受力超過 0 的次數，用以表示手腕瞬間受力程度。
2. 計算第 0.5 週期內的受力大小總和進行比較，並以顏色表達變化趨勢。



圖 7-42



3. 不同三種握位下，碰撞中央縱線各點造成手腕受力之比較

(1) 高握位下(碰撞中心為 PQ89)，碰撞中央縱線各點造成手腕受力之比較

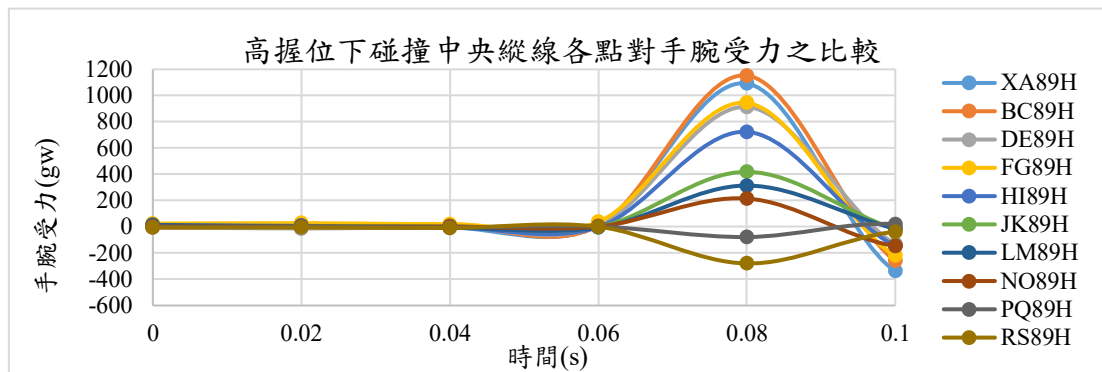


圖 7-41

(2) 中握位下(碰撞中心為 NO89)，碰撞中央縱線各點造成手腕受力之比較

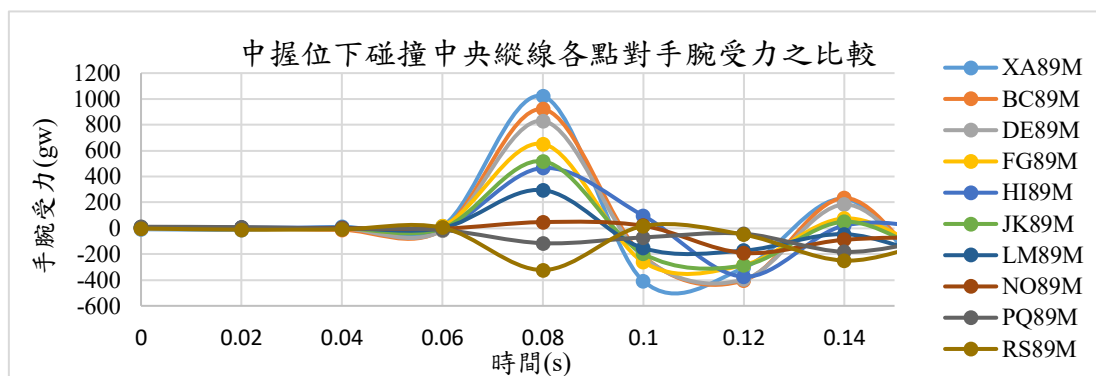


圖 7-42

(3)低握位下(碰撞中心為 LM89)，碰撞中央縱線各點造成手腕受力之比較

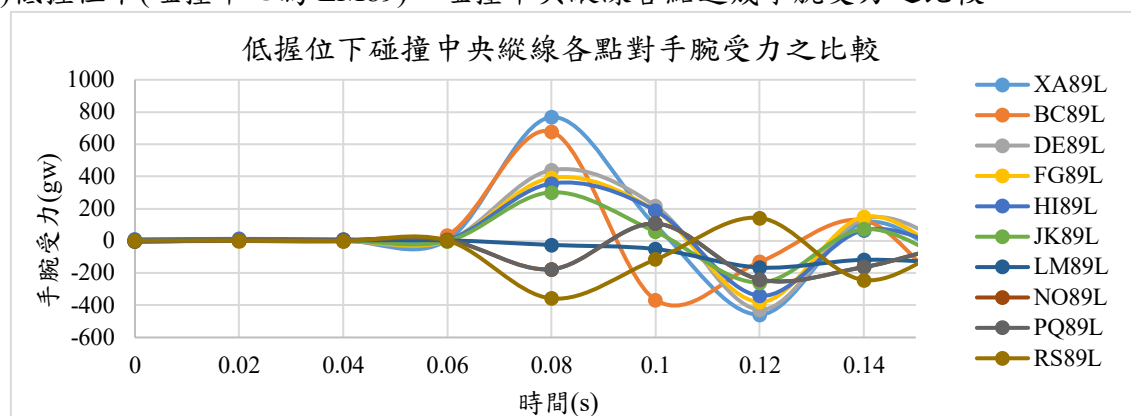


圖 7-43

(4)結果

三種握位碰撞結果具有相同趨勢：離碰撞中心愈遠的碰撞點，造成手腕受力也愈大。

4. 三種握位下，拍面上各點碰撞後對手腕造成的受力變化

	低握位	中握位	高握位
XA89	1226	1429	1644
BC89	1044	1137	1642
DE89	223	1054	1500
FG89	204	914	1130
HI89	169	369	993
JK89(節點)	245	716	930
LM89	25(碰撞中心)	449	899
NO89	283	29(碰撞中心)	662
PQ89	283	44	299(碰撞中心)
RS89(強力中心)	242	341	141

碰撞後，手腕瞬間受力變化愈大，則手腕前後晃動程度愈大，對球拍的操控愈差。而

三種握位碰撞結果具有相同趨勢：碰撞中心造成手腕的受力變化最小，對手腕的負擔最小，有利於完整揮拍的動力傳遞，考量篇幅有限，以高握位的全拍面數據進行分析。

5. 高握位下，全拍面各點碰撞後手腕受力的最大差值探討

	表 7-9 碰撞後手腕受力的最大差值(gw)						
	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA			1694	1644	1780		
BC	1035	1483	1095	1642	1158	1342	1177
DE	1004	1307	1044	1500	1289	1483	1352
FG	966	1025	1143	1130	1135	1231	1365
HI	745	971	1026	993	1143	1233	1202
JK(NODE)	770	997	1196	930	812	1167	1121
LM	620	590	990	899	761	781	980
NO	346	574	657	662	702	648	682
PQ(COP)	100	134	299	299	291	410	307
RS(COR)		307	208	141	115	120	

高握位下，撞擊各點造成手腕受力的最大手腕受力的最大差值(gw)差值以拍頭的頂區最大，往下至碰撞中心時最小，再下移至喉區又再增加。

6. 高握位下，各點碰撞後造成手腕受力值大於零的次數

表 7-10 高握位下，中央縱線各點撞擊後造成手腕受力		
	次數	手腕受力與時間關係圖
XA89	3	
HI89	3	

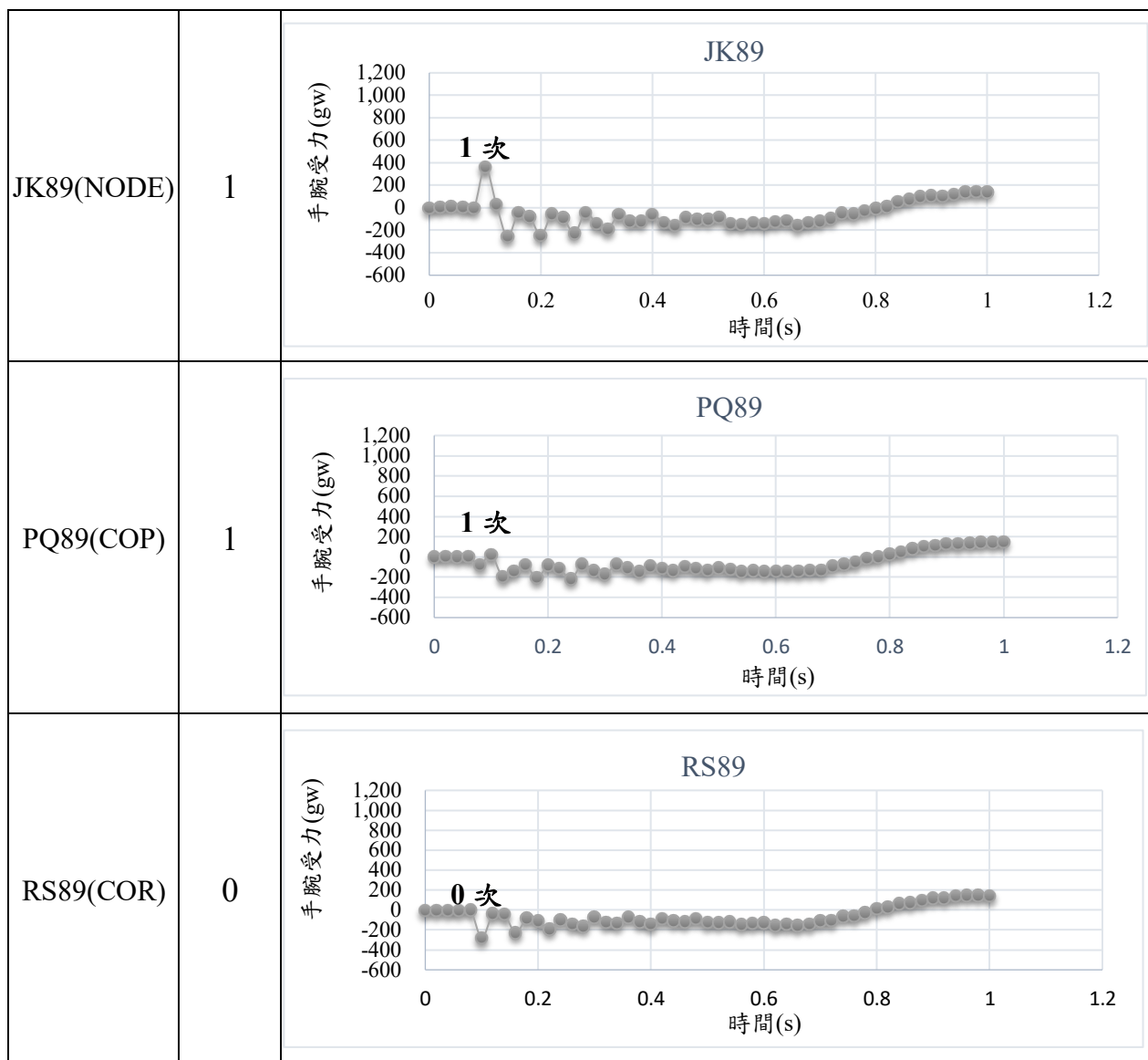


表 7-10 顯示，碰撞拍面頂區造成手腕晃動次數多、時間久，碰撞中心只有 1 次，有利於揮拍的動力傳遞。

7. 高握位下，第 0.5 週期內的受力總和

	23	45	67	89	1011	1213	1415
XA			-2372	-2625	-2551		
BC	-2304	-2476	-2595	-2950	-2905	-2712	-2302
DE	-2556	-2950	-3192	-3215	-3069	-2792	-2383
FG	-2707	-2821	-3295	-3369	-3344	-2855	-2264
HI	-2735	-3258	-3374	-3635	-3432	-3313	-2876
JK(NODE)	-3024	-3064	-3280	-3797	-3591	-3237	-2589
LM	-3002	-3084	-3594	-3933	-3703	-3364	-3091
NO	-2874	-3492	-3781	-3853	-3631	-3043	-2504
PQ(COP)	-2821	-3676	-4034	-4017	-3841	-3559	-2615
RS(COR)		-2620	-4043	-4186	-3748	-3461	

8. 結果

- (1) 碰撞於拍面頂區對手腕產生的瞬間受力變化最大，高達 1700gw 左右。往中央區域移動便會遞減，碰撞節點位置已降為 6 成左右，而**碰撞於碰撞中心時受力不到頂區的二成，手腕擊球舒適度增加。**
- (2) 透過計數碰撞瞬間手腕受力超過 0gw 的次數，結果顯示與拍面中上區域的碰撞造成手腕受力較大也較久，容易造成手腕的負擔，而與拍面中下區域的碰撞，受力和時間均大幅減少，對手腕的負擔最少。
- (3) **擊球點落在碰撞中心附近時，手腕瞬間受力最小，有利於揮拍時先轉腰後肩再擺臂一系列的弧形軌跡動作。**相反的，若是落點在頂區，手腕受到的向前作用力，造成揮拍負擔。
- (4) 由 0.5 週期內的受力總和得知拍面頂區對手腕的受力較喉區增加 1300gw 以上。
- (5) **甜區內的三點對手腕的受力舒適程度為：**
碰撞中心最佳，受力最小且時間也短；
強力中心次之：受力變化小，時間短，但手腕受力較大一些；
節點最差：受力變化最大，時間短，且手腕受力也較大一些。

捌、結論

1. 網球拍面積為相關運動中最大的，網球與拍面的碰撞與球拍的材質、勁度、穿床磅數、拍面大小等因素都有關聯，而碰撞位置的好壞更直接反應到手腕的受力負擔、揮拍過程的舒適度。
2. 我們採取不同的架設並搭配力度計記錄碰撞後的手腕受力情形，找出甜區內的重要三點：節點(NODE)、碰撞中心(COP)以及強力中心(COR)，讓使用者能快速找到拍面的甜區，了解此區對於揮拍的重要性。
3. 為了更真實模擬手緊握球拍下的揮拍是否造成手腕的負擔，我們自行設計一組與人類手臂尺寸相符的手臂裝置，由兩個萬向關節及鋁管組成，其中的萬向關節即為手腕關節及肘關節。將此手臂裝置和球拍連結後，便可記錄手腕處的受力變化，比較手腕的負擔程度。
4. 強力中心：
 - (1) 透過網球的反彈高度，取得拍面的強力中心位於拍面下端的中央(RS89)，此區有利於回擊出高速球。

(2)與拍面頂區的碰撞造成球拍本身的形變，能量來不及傳遞給網球，故反彈球速僅有4成左右。

5.節點：

(1) 查閱的文獻採用加速規搭配高價專業軟體，是我們無法取得的，因此嘗試透過力度計找出節點位置。

(2) 手握球拍，感覺網球碰撞後對握位處造成的振動感覺，初步得到節點會隨握位而些微改變。

(3) 分析力矩得到各位置的碰撞力矩最大值出現在 JK89 區。

(4) **考量** $\boxed{\text{網球輸入的能量} = \text{球拍振動能量} + \text{振盪能量}}$ 。由實驗結果顯示當網球碰撞 JK89 瞬間，力度計得到最大的受力，得知能量以最大比例轉換成球拍的振盪能量，最小比例轉換成球拍的共振，我們因而初步推測 JK89 為拍面的節點，與手測結果相符。

6.碰撞中心：

(1) 碰撞中心的位置會隨握位而改變。

(2) **以懸吊方式模擬鬆握**，取得三種握位下的碰撞中心位置分散(甜區較大)且位於拍面中上方，其週期平方的關係式為：**碰撞中心到握位的距離 = $25.33 \times T^2$** 。

(3) **連結手臂裝置模擬緊握**，取得的碰撞中心範圍較懸吊方式集中且位於拍面中下方，如預期的向喉區移動，其關係式為：**碰撞中心到握位的距離 = $20.94 \times T^2$** 。

(4) 詢問專家後得知，實際揮拍時多以拍面的中上方擊球。這與我們鬆握時的數據相符，即鬆握時的碰撞中心上移、甜區較大，擊出的球不僅有威力，對手腕負擔也小，因此**鬆握效益大於緊握**，故建議初學者採鬆握短拍方式。

(5) **透過這條線性關係式**，可提供初學者快速找到鬆握下的碰撞中心位置。例如：以拇指和食指輕夾住球拍，求出小角度振盪時的週期 T，再將週期平方 T^2 乘以 25.33 即為碰撞中心距離握位的距離。

7.甜區內三點對手腕的影響：

(1)碰撞中心最佳，受力最小且時間也短。

(2)強力中心次之：受力變化小，時間短，但手腕受力較大一些。

(3)節點最差：受力變化最大，時間短，且手腕受力也較大一些。

8.根據實驗結果，**我們建議初學者採鬆握短拍的方式**，不僅甜區上移到拍面的中上方、範圍更大，也因力臂較大，提高了回擊球的強度。

9.過程中，我們也有針對一款高價位的球拍進行碰撞中心實驗，顯示碰撞中心位置和握位的關聯性小，位置多為一致的。但學校、個人初學階段多為中低價位的球拍，因而握位對碰撞中心的影響很多，我們希望實驗結果能提供初學者快速掌握甜區位置進而提升學習成效。

玖、未來展望

實驗過程中曾經拉線嘗試模擬反手拍時的外側伸肌施力，進而取得數據討論對伸肌的影響，但因肌肉束運作太精細無法以如此簡易的模擬呈現而中斷，未來若有機會，期望能再進一步探究拍面受力對肘關節的影響。

壹拾、參考資料

1. 魏紫芸、楊甯安、郭愉瑄(2013)。探究棒球棒的甜蜜點。中華民國第53屆中小學科學展覽會作品。2017.12.25。 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/senior01.htm>
2. 張立群(2014)。尋找完美的打擊器。2018.1.10。
<http://lichun.camel.ntupes.edu.tw/ezcatfiles/t025/download/attdown/0/1032-13-%B4M%A7%E4%A7%B9%AC%FC%A5%B4%C0%BB%BE%B9.ppt>
3. 網球拍「甜區」中的物理。from
<https://read01.com/zh-tw/6G62D4n.html#.WqTezR1uaM8>
4. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations。Center of Percussion。2018.1.29。
<https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/center-percussion>

【評語】 030119

研究設計合理，能延續前人的研究選擇不同的題材，做出趣味、科學、實用兼具，結合學生喜好的運動題材。

報告書內容層次分明，數據分析符合科學表達的正確性

甜蜜方程式。這個工作主要是研究網球撞擊網球拍時，在受力區的位置與受力大小對手腕及手肘的負擔關係。手腕對握位的高低與反擊的角度，其實對球的撞擊反應時動量及能量的轉換、削減是相當大的。討論自由拍面（握把不受力）及連接手肘手腕整體系統的撞擊，也相當不同。

研究主題清楚且聚焦，對相關研究領域有貢獻。可用科學方法檢驗。具創意、學術或實用價值，對科學、社會或經濟有產生影響

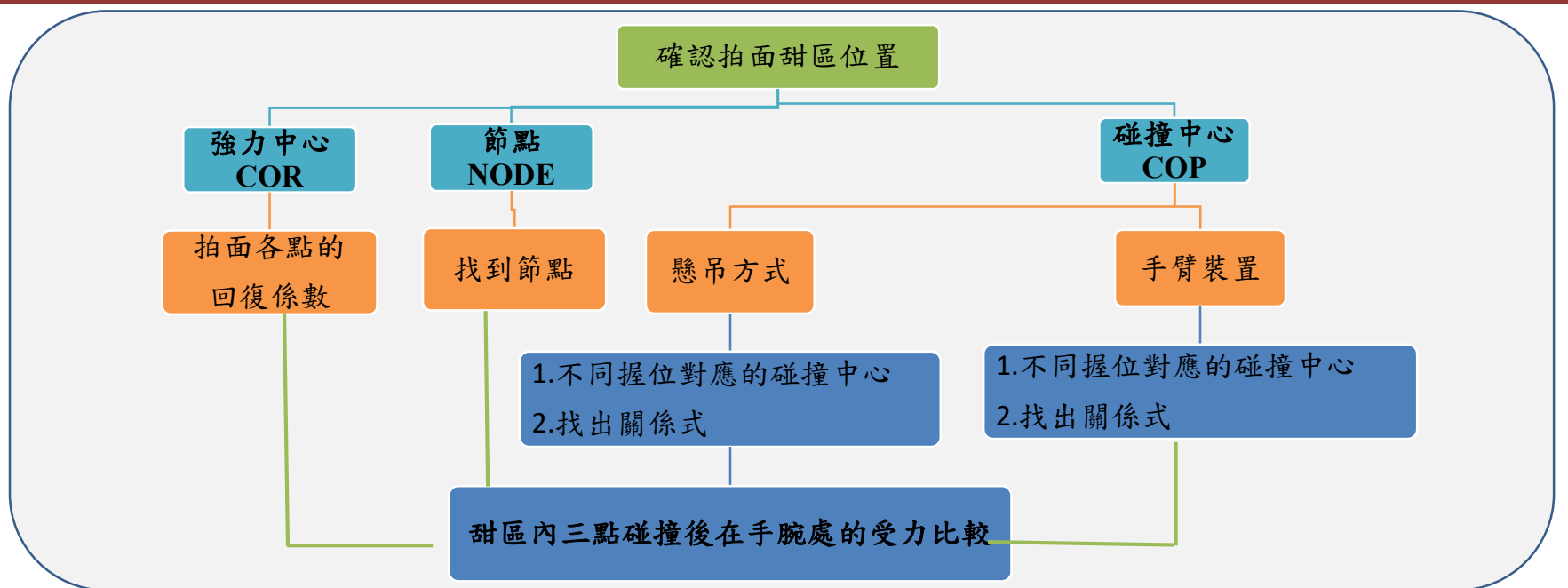
摘要

我們採用不同架設並結合力度計記錄握把及手腕處的受力變化，找出網球拍甜區內的重要三點：節點(NODE)、碰撞中心(COP)及強力中心(COR)，協助初學者快速找到甜區並了解適當落點對手腕的重要。首先，由回復係數得知強力中心位於拍面的喉區中央；再來，以懸吊(鬆握)及連結手臂(緊握)兩種方式，分別搭配慢動作錄影及力度計找到三種握位下對應的碰撞中心位置，並模擬單擺運動，得到碰撞中心距離與週期平方的線性關係式，作為鬆握與緊握的甜區範圍參考。在節點實驗中，由能量守恆找出節點位置，與手測結果相符。最後，發現三點中又以碰撞中心最能降低手腕受力。因此，建議初學者採鬆握短拍方式，不僅甜區上移、放大，控球時間延長，也有效增加手腕舒適度。

壹、研究動機

我們從去年世大運活動中欣賞到精彩的網球比賽，查閱了網球的相關資料，得知網球是所有運動球種中使用拍面最大的，其拍面的甜區特別有意義，以正確的位置揮拍，不僅控球時間增加，對手腕的負擔也較小。但網路上查閱的甜區位置差異頗多，引起我們想一探究竟的好奇心，也因此展開了一系列的研究。

貳、研究流程圖與目的



參、實驗裝置與名詞解釋



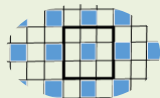
圖 1 甜區三點及握位示意圖

● 甜區

為拍面的有效擊球區域，能給出足夠威力的擊球，不僅控球性佳，揮拍時的舒適度最佳。

● 撞擊點

9 個網格為 1 個撞擊單位，其中中央網格為撞擊點



● 握位說明

低握位：距離把手末端 15cm
中握位：距離把手末端 10cm
高握位：距離把手末端 5cm

● 三點說明

節點(NODE)：擊球後握把無振動感之位置
碰撞中心(COP)：擊球時握把無撞擊感之位置
強力中心(COR)：擊球後產生最高球速的位置



圖 2 碰撞中心實驗裝置

肆、結果與討論

實驗一：尋找強力中心

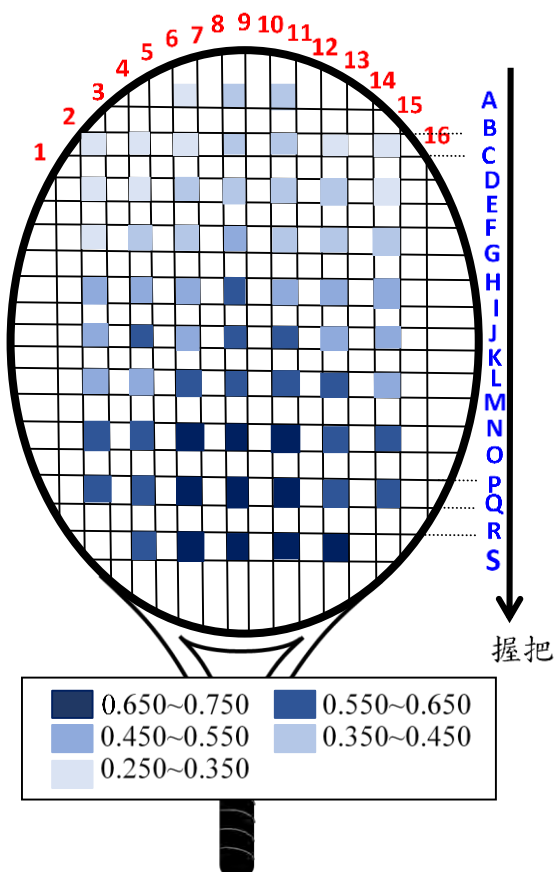
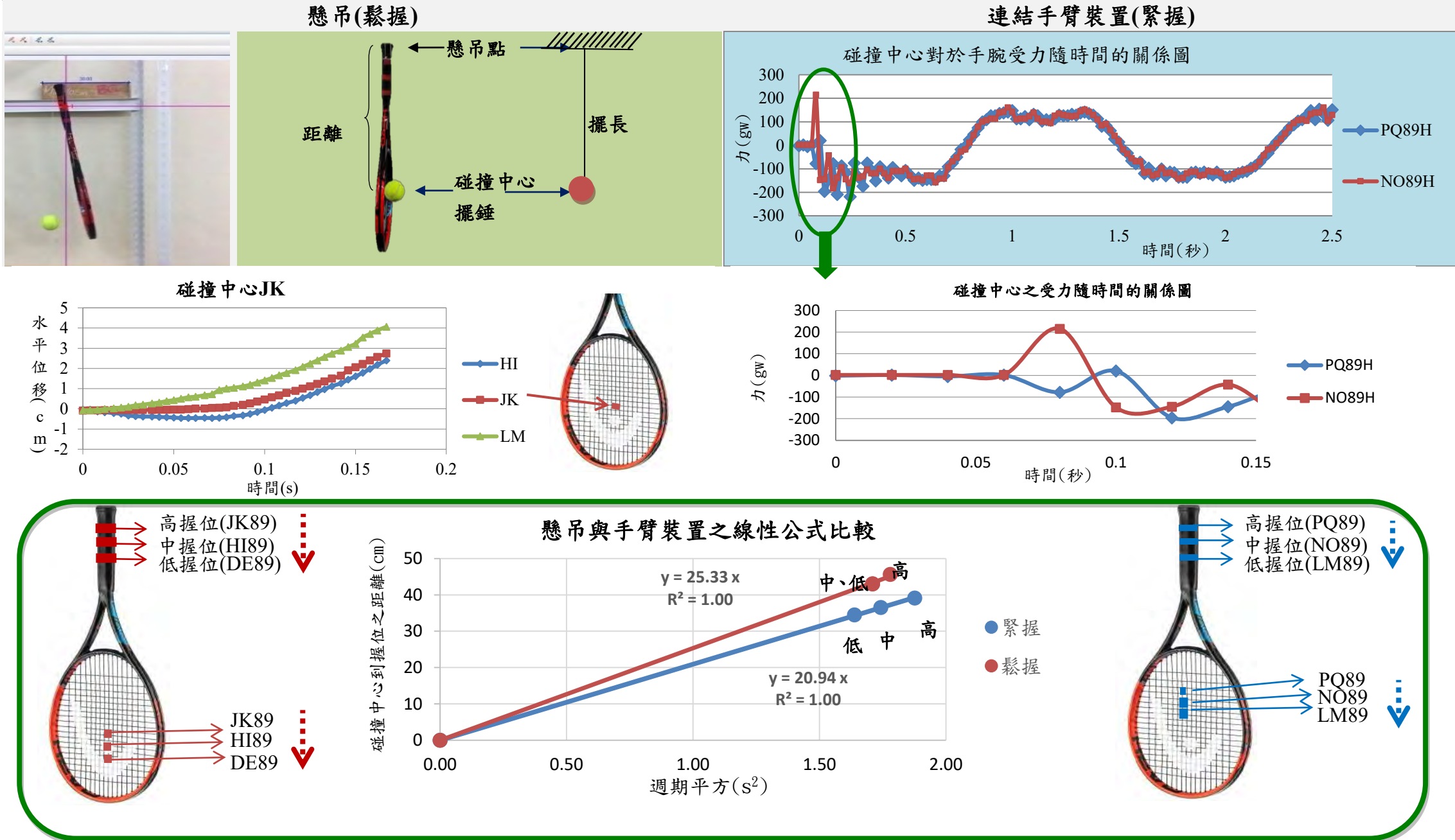


圖 3 拍面示意圖

1. 我們透過 tracker 分析慢動作影片，確認網球與拍面上各點碰撞後的反彈高度，再代入 $\sqrt{h_2/h_1}$ ，求出各個位置的回復係數。
2. 考量持反手拍的所需空間，我們採取高握位的位置來進行實驗。
3. 實驗中，我們透過雷射定位，有效提升了網球落點的穩定度及數據的準確度。
4. 線床的回復係數大小為喉區>頂區，中央>兩側。而中央縱線的回復係數大小由頂區的 0.396 逐漸增加至喉區 0.750，故 RS89 為此球拍的強力中心，有利於回擊出高速球。
5. 我們從參考資料中得知網球與線床的接觸時間約為 3~5 毫秒間，碰撞時造成球拍本身及線床形變所儲存能量來不及轉移給網球，網球就已離開拍面了。故球拍勁度愈大及線床磅數愈高，形變愈少，將有利於網球的反彈球速。
6. 頂區的位置如預期的具有最小的回復係數，因為球拍握把處為支點時，頂區受力造成的力矩最大導致球拍本身的形變最多，損失最大能量，故回復係數最小。

實驗二：尋找碰撞中心



1. 實驗中，以懸吊模擬鬆握狀態，連結至手臂裝置模擬緊握狀態。
2. 根據碰撞中心的定義，球碰撞在碰撞中心時，握位處的合力為零。我們將此時球拍的運動模擬成單擺的運動狀態，得到了碰撞中心到握位的距離與週期平方的線性關係式。透過關係式，可初步判斷碰撞中心位置。
3. 懸吊下的關係式為：碰撞中心到握位的距離 = 25.33 × 週期平方；連結手臂後的關係式為：碰撞中心到握位的距離 = 20.94 × 週期平方。
4. 連結手臂後，因球拍的重心向後移動，碰撞中心如同預期的也向後移動，更為接近位於喉區的強力中心。
5. 懸吊方式對應到球拍的鬆握，連結手臂則為緊握。由實驗結果顯示，鬆握時的碰撞中心在三種握位下的位置分散且落在拍面中上方；緊握時的碰撞中心在三種握位下的位置集中且落在拍面下方。

實驗三：尋找節點

一、裝置說明

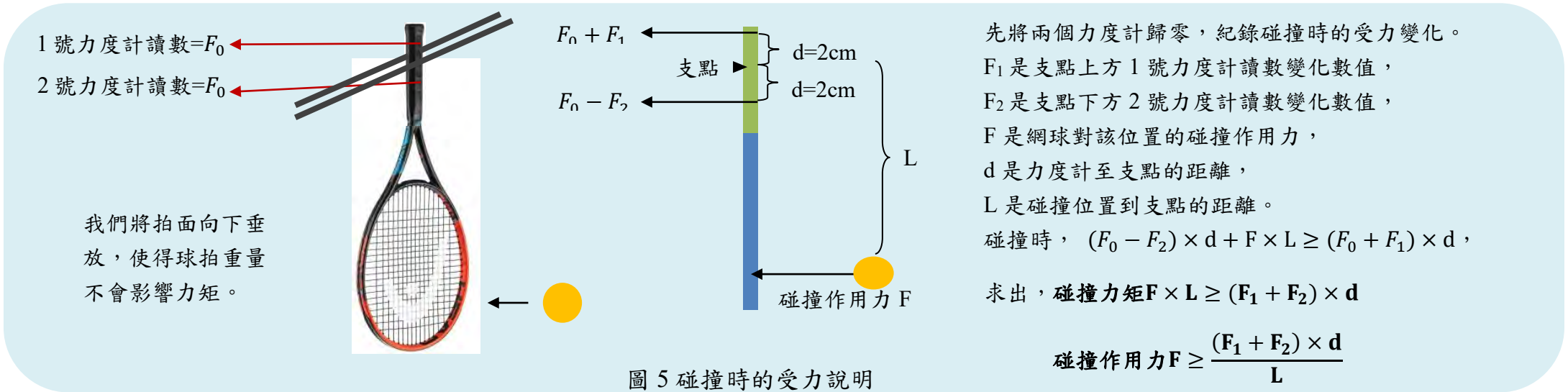


圖 5 碰撞時的受力說明

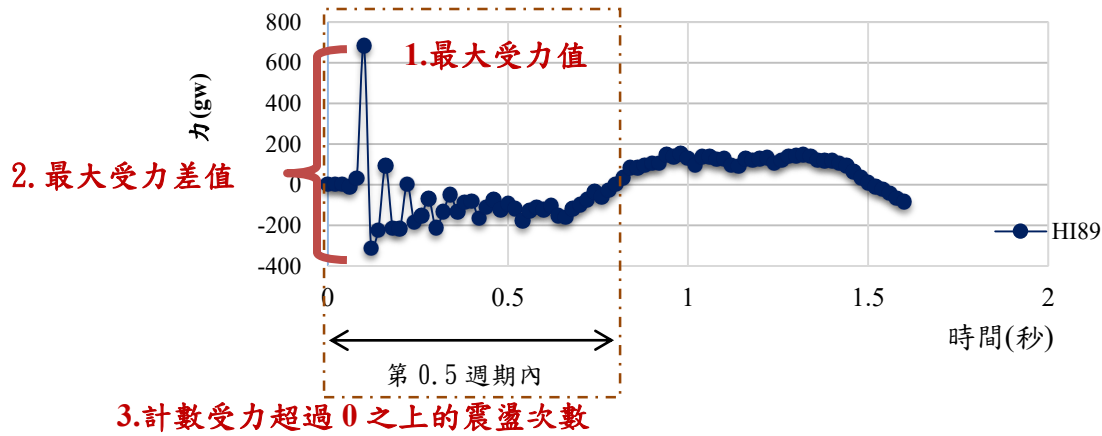
二、數據

表 1 拍面上中央縱線上各點碰撞作用力及碰撞力矩一覽表				表 2 拍面上中央縱線上各點回復係數及接觸時間比值一覽表		
拍面示意圖	位置	F 碰撞作用力 (gw)	碰撞力矩 (gw.cm)	回復係數	$\Delta v = v_{\text{反射}} - v_{\text{入射}}$ 速度變化比值	$\Delta t \propto \frac{\Delta v}{F}$ 接觸時間比值
	XA89	132	7188	0.40	1.40	2.25
	BC89	141	7308	0.38	1.38	2.21
	DE89	154	7499	0.40	1.40	1.65
	FG89	164	7575	0.45	1.45	1.60
	HI89	179	7808	0.57	1.57	1.46
	JK89	203	8365	0.58	1.58	1.00
	LM89	202	7958	0.63	1.63	1.11
	NO89	225	8266	0.69	1.69	1.07
	PQ89	244	8211	0.70	1.70	1.00
RS89	264	8293	0.75	1.75	1.29	

1. 利用合力矩為零的條件，計算出拍面上各點的作用力和碰撞力矩，得到 JK89 的碰撞作用力僅次於 PQ89 與 NO89，而碰撞力矩則是最大。
2. 網球輸入的能量 = 球拍振動能量 + 振盪能量關係，球拍振盪能量最大時，球拍的共振最小。因此，我們判斷出 **JK89 為拍面的節點**。
3. 透過 $F = ma = m \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} \right)$, $\Delta t = \frac{m \Delta v}{F}$ ，在 m 為定值情形下，我們還可得出各碰撞點的接觸時間比。**頂區的接觸時間為喉區的 2 倍多，增加控球時間**，而我們推測球拍本身的形變與線床密度變化為其主要影響因素。

實驗四：探討甜區內各點受力對手腕的影響

撞擊HI89後手腕受力



- 依力度計記錄的受力變化，計算各位置碰撞瞬間的
 1. 最大受力值
 2. 最大受力差值
 3. 碰撞後，手腕受力超過 0 的次數，用以表示手腕瞬間受力程度。
 表示這些碰撞對手腕造成的負擔程度。

(一)數據：

拍面位置	碰撞後手腕受力的最大差值/最大受力 (gw)							較大受力計數(次)
	23	45	67	89	1011	1213	1415	
XA			1694	1644 / 1091	1780			3(時間長)
BC	1035	1483	1094	1642 / 1152	1158	1342	1176	3(時間長)
DE	1004	1307	1043	1499 / 913	1288	1483	1351	3(時間長)
FG	966	1025	1143	1130 / 944	1135	1231	1365	3(時間長)
HI	745	970	1026	993 / 723	1143	1233	1202	3(時間長)
JK(NODE)	770	996	1195	930 / 419	812	1167	1121	1(時間短)
LM	620	589	989	899 / 314	760	780	979	1(時間短)
NO	346	573	656	662 / 215	702	647	681	1(時間短)
PQ(COP)	99	134	298	298 / -78	290	410	307	1(時間短)
RS(COR)		307	208	140 / -279	115	119		0

(二)討論

1. 碰撞於拍面頂區對手腕產生的瞬間受力和受力變化均為最大。受力隨著下移過程遞減：節點處降為 6 成左右；碰撞中心時的受力不到頂區的二成，手腕擊球舒適度增加。
2. 與拍面中下區域的碰撞，受力和時間均大幅減少，對手腕的負擔最少。
3. 擊球點落在碰撞中心以下範圍時，手腕瞬間受力最小或是受力向後(與網球前進方向相同)，有利於揮拍時先轉腰後肩再擺臂一系列的弧形軌跡動作。相反的，若是落點在頂區，手腕受到的向前作用力，造成揮拍負擔。
4. 甜區內的三點對手腕的受力舒適程度為：碰撞中心最佳，受力最小且時間也短；強力中心次之：受力變化小，時間短，但手腕受力較大一些；節點最差：受力變化最大，時間短，且手腕受力也較大一些。

伍、結論

1. 我們採取不同的架設並搭配力度計記錄碰撞後的手腕受力情形，找出甜區內的重要三點：節點(NODE)、碰撞中心(COP)以及強力中心(COR)，讓使用者能快速找到拍面的甜區，了解此區對於揮拍的重要性。
2. 揮拍過程，持拍方式會經歷鬆握與緊握，實驗中的懸吊方式模擬鬆握，而緊握則是透過我們自行設計的手臂裝置進行模擬。此手臂由兩個萬向關節及鋁管組成，其中的萬向關節即為手腕關節及肘關節。將此手臂裝置和球拍連結後，便可記錄手腕處的受力變化，比較手腕的負擔程度。
3. 強力中心：透過網球的反彈高度，取得此拍面的強力中心位於喉區中央的 RS89 區域，此區有利於回擊出高速球。
4. 節點：查閱的文獻採用加速規搭配高價專業軟體，是我們無法取得的，因此嘗試透過力度計找出節點位置。
 - (1) 手握球拍，感覺網球碰撞後對握位處造成的振動感覺，初步得到節點會隨握位而些微改變。
 - (2) **考量網球輸入的能量 = 球拍振動能量 + 振盪能量**。由實驗結果顯示當網球碰撞 JK89 瞬間，力度計得到最大的受力，得知能量以最大比例轉換成球拍的振盪能量，最小比例轉換成球拍的共振，我們因而初步推測 JK89 為拍面的節點，與手測結果相符。
5. 碰撞中心：中低價位的網球拍，碰撞中心位置會隨握位明顯改變。
 - (1) 碰撞中心的位置會隨握位而改變。
 - (2) **以懸吊方式模擬鬆握，取得三種握位下的碰撞中心位置分散(甜區較大)且位於拍面中上方**，其週期平方的關係式為：**碰撞中心到握位的距離 = 25.33 × T²**。
 - (3) **連結手臂裝置模擬緊握，取得的碰撞中心範圍較懸吊方式集中且位於拍面中下方**，如預期的向喉區移動，其關係式為：**碰撞中心到握位的距離 = 20.94 × T²**。
 - (4) 詢問專家後得知，實際揮拍時多以拍面的中上方擊球。這與我們鬆握時的數據相符，即鬆握時的碰撞中心上移、甜區較大，擊出的球不僅有威力，對手腕負擔也小，因此**鬆握效益大於緊握，故建議初學者採鬆握短拍方式**。
 - (5) **透過這條線性關係式，可提供初學者快速找到鬆握下的碰撞中心位置**。例如：以拇指和食指輕夾住球拍，求出小角度振盪時的週期 T，再將週期平方 T² 乘以 25.33 即為碰撞中心距離握位的距離。
6. 甜區內三點對手腕的影響：
 - (1) 碰撞中心最佳，受力最小且時間也短。
 - (2) 強力中心次之：受力變化小，時間短，但手腕受力較大一些。
 - (3) 節點最差：受力變化最大，時間短，且手腕受力也較大一些。
7. **我們建議初學者採鬆握短拍的方式，不僅甜區上移到拍面的中上方、範圍更大，也因力臂較大，提高了回擊球的強度。**

陸、未來展望

實驗過程中曾經拉線嘗試模擬反手拍時的外側伸肌施力，進而取得數據討論對伸肌的影響，但因肌肉束運作太精細無法以如此簡易的模擬呈現而中斷，未來若有機會，期望能再進一步探究拍面受力對肘關節的影響。

柒、參考文獻

1. 魏紫芸、楊甯安、郭愉瑄(2013)。探究棒球棒的甜蜜點。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會作品。2017.12.25。
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/senior01.htm>
2. 張立群(2014)。尋找完美的打擊器。2018.1.10。
<http://lichun.camel.ntupes.edu.tw/ezcatfiles/t025/download/attdown/0/1032-13-%B4M%A7%E4%A7%B9%AC%FC%A5%B4%C0%BB%BE%B9.ppt>