

第二十屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA20-581

作品名稱：運用智能網球拍提升

運動員運動表現

姓名：王祥瑜

關鍵字：運動科學、慣性訊號處理、力度與速度

分析、揮拍軌跡重建

目錄

壹、摘要	1
貳、研究動機	2
參、研究目的	4
肆、研究過程	8
伍、結論	21
六、討論與應用	28
柒、參考資料	29

表目錄

表 1 網球運動員和網球新手之統計分析資料	5
表 2 網球運動員基本資料	6
表 3 網球新手基本資料	7
表 4 網球運動員和網球新手之揮拍穩定度差異	24
表 5 網球運動員和網球新手之揮拍差異	26

圖目錄

圖 1 運動市場及穿戴式裝置產值	4
圖 2 研究方法流程圖	9
圖 3 網球運動員和網球新手實際收案情形	10
圖 4 網球動作收案流程圖	11
圖 5 收案工具：智能網球拍	11
圖 6 揮拍動作訊號	12
圖 7 加速度訊號濾波前後比較	14
圖 8 角速度訊號濾波前後比較	14
圖 9 磁場訊號濾波前後比較	14
圖 10 網球揮拍分期	15
圖 11 參考座標系統方位圖	17
圖 12 座標轉換程序	17
圖 13 重力補償程序	18
圖 14 速度估測與零速度補償程序	19
圖 15 網球揮拍軌跡	20
圖 16 揮拍速度和揮拍力度之相關性(發球)	22
圖 17 揮拍速度和揮拍力度之相關性(正手拍)	22
圖 18 揮拍速度和揮拍力度之相關性(反手拍)	23
圖 19 發球揮拍速度穩定度差異	24
圖 20 發球揮拍力度穩定度差異	24
圖 21 正手拍揮拍速度穩定度差異	24
圖 22 正手拍揮拍力度穩定度差異	25
圖 23 反手拍揮拍速度穩定度差異	25
圖 24 反手拍揮拍力度穩定度差異	25
圖 25 網球運動員和網球新手之揮拍差異(發球)	26
圖 26 網球運動員和網球新手之揮拍差異(正手拍)	26
圖 27 網球運動員和網球新手之揮拍差異(反手拍)	27
圖 28 網球揮拍軌跡	28

壹、摘要

現今國際體壇中，透過科學方法達到精準運動訓練與優異的成績表現，儼然已成為國際運動產業研發趨勢。訓練不再只是依靠教練的教學與經驗，而是可以透過高科技設備的輔助，針對選手的弱項擬定訓練計畫。網球是眾多運動項目中全球聚焦的項目之一，臺灣的網球選手在國際運動賽事中，屢創佳績為臺爭光，網壇女豪傑—謝淑薇，多次在網球四大滿貫賽中拿下雙打冠軍，並在 2014 年登上世界女子雙打排名第一，而有臺灣網球一哥之稱的盧彥勳也不惶多讓，2008 年在北京奧運打入前 16 強，2010 年溫布頓網球錦標賽闖進前 8 強，生涯共贏得 29 座 ATP 挑戰賽單打冠軍，是目前史上最多男單頭銜紀錄保持人。

本研究透過高中的專題研究課程，在指導老師的協助下和本校網球隊與大學實驗室合作，利用大學實驗室所開發的智能網球拍收集網球運動員和網球新手之揮拍動作訊號，並透過物理、資訊科學、運動力學分析方法將網球運動員和網球新手之揮拍動作進行揮拍分期及軌跡重建；同時，透過相關揮拍的速度與力道指標判斷訓練成效。研究對象包含本校 25 位網球運動員和 33 位網球新手，收案工具為智能網球拍，其主要元件包含：微控制器、慣性感測模組和電源供應模組；運動員揮拍動作訊號包含：加速度計所量測的加速度訊號、陀螺儀所量測的角速度訊號、球拍於空間中之三度空間移動軌跡變化和運動特徵物理量、角速度、速度、施力大小等。

研究結果顯示，在三種揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)：(1)揮拍速度和揮拍力度呈顯著正相關。(2)網球運動員的揮拍速度穩定度和揮拍力度穩定度均顯著高於網球新手。(3)網球運動員的揮拍速度和揮拍力度均顯著高於網球新手。(4)網球運動員的揮拍軌跡顯著優於網球新手。針對未來的研究方向與應用，建議運用智能網球拍將網球運動員的運動表現建立客觀指標，例如：在運動員訓練中以不同面向給予評比且長期記錄，形成歷程追蹤記錄，以利後續問題診斷與教練開發適性化訓練課程的重要依據。

貳、研究動機

網球是國際主流的運動，也是我喜愛的運動項目之一。國外媒體(Sports Show)統計指出 2021 年世界上最受歡迎的十大運動中，網球排名第五，約有 10 億人關注度，無論在歐美國家、亞洲或非洲都相當熱門。國內網壇也有表現相當優異的運動員，像是謝淑薇和盧彥勳，都在世界單打上有不錯的排名，尤其是謝淑薇雙打最高排名第 1 名，在國際網壇上綻放光芒，也為臺灣在世界運動競技場上爭光。雖然無法像他們運動表現如此傑出，長期關注國內網球運動賽事的我，也希望能投入運動科學領域，研發能幫助運動員提升運動表現的科技。

我念的高中是升學導向的學校，班上同學有四位網球隊的選手，他們經常代表學校網球隊參加各項競賽，屢次在全國中等學校運動會上獲得相當優秀的成績，如此佳績連體育專長學校都很難得。然而，就我個人觀察，高中學生要有傑出的運動表現，同時還要兼顧課業，其升學歷力比起一般學生要大得許多。除了平常的固定時間練習外，比賽前更要密集訓練，幾乎都投入全部心力練球，**如何利用最短的時間達到最佳的練習效果，且要避免集訓時造成運動傷害，是運動科學領域一直探索的重要議題！**

現今國際大型競技運動賽事中，追求優異的競賽成績，透過科學方式達到精準運動已是無法避免的趨勢。運動員的訓練已經不只是靠觀看影片及教練教導來解析正確的動作，隨著科技日益進步，運動員在訓練上已經逐漸導入科技器材於訓練過程，以記錄並輔助教練和運動員找出動作不對與姿勢需要調整的問題，來避免運動傷害和達到訓練效果的提升[1]。例如：運動場上經常使用的鷹眼系統[2]、人體動作捕捉系統[3]已廣泛使用在各運動訓練中，透過人體動作捕捉系統進行運動員的自身動作監控，並分析其運動訊號，回饋具有意義的指標給教練或運動員，有效評估自己的運動能力，達到更有效的訓練效果。然而，市面上之人體動作捕捉系統卻有著價格昂貴、需在固定的範圍空間，且容易因身體遮蔽導致分析上誤差等侷限。因此，對於一般運動員來說並非最佳選擇。慣性感測技術相關之可穿戴式

裝置在運動科技上已佔有一席之地，其有體積小、重量輕、功耗低及價格便宜等優勢，也可以看到運動市場及穿戴式裝置之產值已有逐年上升的趨勢[4]，如圖 1 所示。

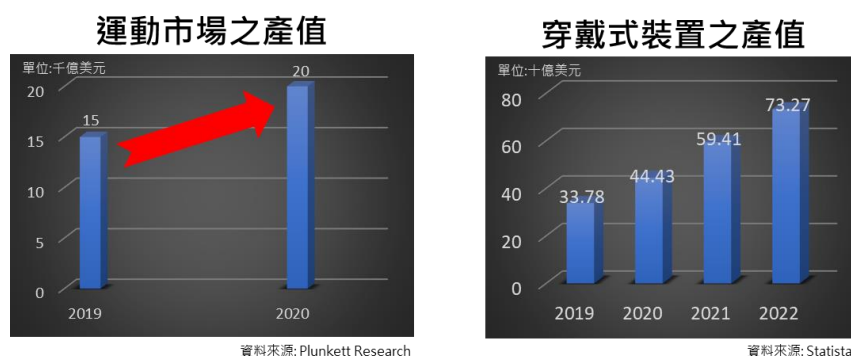


圖 1 運動市場及穿戴式裝置產值

綜合上述，本研究在高中專題研究課程的指導老師教導與協助下，和本校網球隊與大學實驗室合作，利用大學實驗室所開發的智能網球拍收集網球運動員和網球新手之揮拍動作訊號，並透過物理、資訊科學、運動力學分析方法將運動員與網球新手之揮拍動作進行揮拍分期及軌跡重建；同時，透過相關揮拍的速度與力道指標判斷訓練成效。本研究希望達到：運動員能透過上述參數評估自我訓練成效；而教練也能透過這些揮拍參數進行個別項目強化指導以及規劃運動員的訓練方式。

參、研究目的

網球運動的基本揮拍擊球之動作可分成發球、正手拍、反手拍、著地擊球、截擊等。網球發球是由一連貫複雜的動作所完成，包含了揮拍時下肢帶動身體產生的動力鏈，以及手臂帶動球拍運行的軌跡等，都是影響發球的因素，而一個網球運動員擁有好的發球能力和技巧將是影響比賽勝負的重要關鍵[5]。正確的正、反手拍著地擊球除了需要適切的揮拍擊球的軌跡外，還需配合良好的彈性移動步法，以及穩定的站立姿勢，所有動作、姿勢以及肢體運動軌跡共同配合下，才能完成一個完美且不會產生運動傷害的擊球動作。一般而言，正、反手拍擊球的揮拍擊球方式，區分為單手及雙手握拍的揮擊；擊球站姿則區分為封閉式、及開放式二種。因此，教練需在教學過程中觀察運動員的揮拍擊球方式與站立姿勢的是否正確？指導運動員肢體動作的準確性，對正、反手拍擊球之學習成效亦顯重要，若能量化運動員運動技能的數據，將會對於教學有極大的幫助[1]。根據上述之研究動機，本研究之目的是使用智能網球拍進行網球揮拍動作訊號擷取，並分析本校網球隊運動員及網球新手在平常訓練時的發球、正、反手拍之揮拍速度及揮拍力度，用於評斷網球運動員和網球新手間之揮拍動作差異。讓網球運動員能透過這些參數評估自我訓練效果，教練也能透過這些運動參數進行個別項目的適性化指導，進而規劃運動員的訓練計畫。以下為本研究預計探究之問題：

1. 不同揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)，揮拍速度和揮拍力度是否有相關性？
2. 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍速度穩定度和揮拍力度穩定度是否有差異？
3. 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍速度和揮拍力度是否有差異？
4. 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍軌跡是否有差異？

本研究的對象為本校網球隊之運動員和未有網球經驗的學生，並將其分類為網球運動員和網球新手，人數分別為 25 人和 33 人。網球運動員和網球新手之統計分析資料如表 1 所示，網球運動員的基本資料如表 2，網球新手的基本資料如表 3。在年齡、身高與體重三個層面，運動員和新手皆無顯著差異($p > .05$)，顯示排除基本資料的影響，可以準確比較網球運動員和網球新手在揮拍速度、力度與軌跡之差異。本研究在收案過程，關於受測者是否全力配合之動機強弱，僅能以口頭鼓勵盡全力完成訓練要求。

表 1 網球運動員和網球新手之統計分析資料

基本資料	網球運動員(25 人)		網球新手(33 人)		獨立樣本 t 檢定	
	平均數	標準差	平均數	標準差	t	p
年齡(歲)	15.60	1.47	16.30	1.53	1.76	.08
身高(公分)	172.56	10.91	173.18	7.70	.25	.80
體重(公斤)	64.44	13.30	66.24	9.75	.60	.55

表 2 網球運動員基本資料

編號	姓名	年齡	身高 (cm)	體重 (kg)	在學身分
1	player 1	16	178	60	高中生
2	player 2	15	173	72	國中生
3	player 3	14	163	50	國中生
4	player 4	18	173	63	高中生
5	player 5	17	178	80	高中生
6	player 6	14	179	55	國中生
7	player 7	17	176	80	高中生
8	player 8	16	182	70	高中生
9	player 9	14	159	39	國中生
10	player 10	13	152	43	國中生
11	player 11	16	184	78	高中生
12	player 12	13	152	49	國中生
13	player 13	14	154	49	國中生
14	player 14	17	183	78	高中生
15	player 15	17	182	76	高中生
16	player 16	17	184	77	高中生
17	player 17	17	180	70	高中生
18	player 18	16	173	65	高中生
19	player 19	16	185	81	高中生
20	player 20	15	179	78	國中生
21	player 21	16	177	62	高中生
22	player 22	17	176	72	高中生
23	player 23	16	176	68	高中生
24	player 24	13	156	46	國中生
25	player 25	16	160	50	國中生
平均		15.60	172.56	64.44	

表 3 網球新手基本資料

編號	姓名	年齡	身高(cm)	體重(kg)	在學身分
1	novice 1	15	172	61	高中生
2	novice 2	15	175	64	高中生
3	novice 3	16	177	68	高中生
4	novice 4	20	175	63	高中生
5	novice 5	19	173	59	高中生
6	novice 6	16	180	75	高中生
7	novice 7	16	178	78	高中生
8	novice 8	21	176	66	高中生
9	novice 9	18	172	64	高中生
10	novice 10	15	154	45	高中生
11	novice 11	16	174	71	高中生
12	novice 12	16	175	68	高中生
13	novice 13	18	180	77	高中生
14	novice 14	19	183	75	高中生
15	novice 15	16	172	63	高中生
16	novice 16	16	178	78	高中生
17	novice 17	16	176	64	高中生
18	novice 18	16	185	82	高中生
19	novice 19	16	177	78	高中生
20	novice 20	16	159	53	高中生
21	novice 21	16	163	52	高中生
22	novice 22	16	182	72	高中生
23	novice 23	14	183	78	高中生
24	novice 24	15	155	46	高中生
25	novice 25	15	172	62	高中生
26	novice 26	16	180	73	高中生
27	novice 27	16	173	64	高中生
28	novice 28	15	162	58	高中生
29	novice 29	16	165	59	高中生
30	novice 30	16	171	54	高中生
31	novice 31	16	168	64	高中生
32	novice 32	15	173	73	高中生
33	novice 33	16	177	79	高中生
平均		16.30	173.18	66.24	

肆、研究過程

本研究與本校網球隊合作，利用大學實驗室所開發之智能網球拍進行網球運動員和網球新手之揮拍動作收案，收集共 3 種網球揮拍動作：發球、正手拍和反手拍之球拍加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號，並結合感測器校正、訊號濾波、座標轉換、及訊號積分等方法來進行軌跡重建；同時，並透過數值分析方法將揮拍動作之球拍加速度訊號及角速度訊號進行分析，計算其揮拍速度及揮拍力度，使運動員能評估自我訓練效果，教練也能給予運動員適性化的強化指導。本研究之方法流程圖如圖 2 所示，其主要步驟分為：(1)收案規劃與資料收集、(2)訊號前處理與網球揮拍分期、(3)網球揮拍動作分析、(4)網球揮拍指標分析。

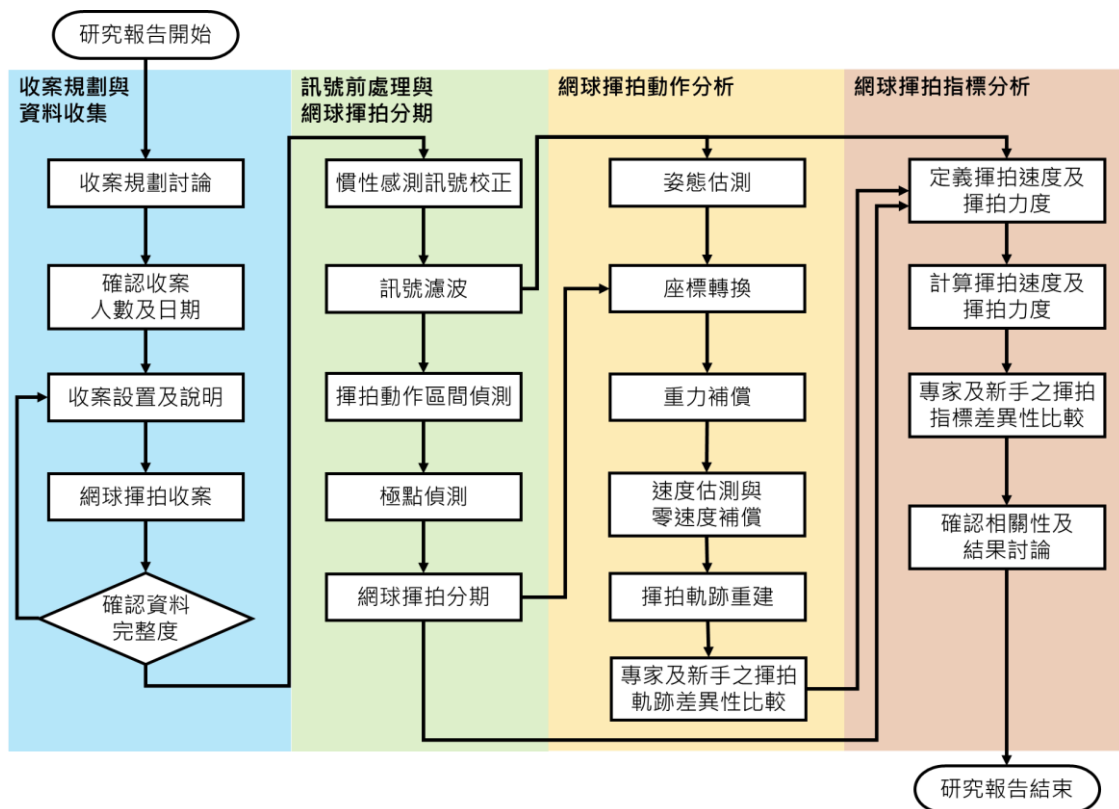


圖 2 研究方法流程圖

(1) 收案規劃與資料收集

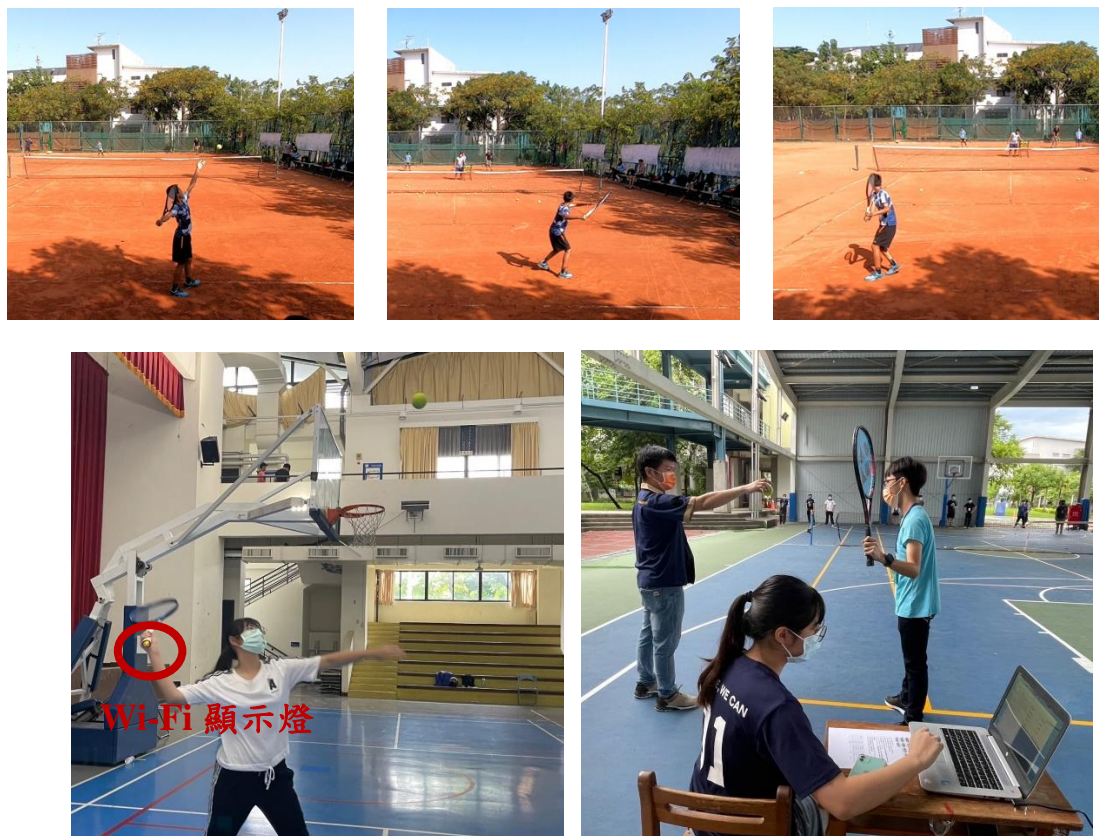


圖 3 網球運動員和網球新手實際收案情形

上左：運動員發球；上中：運動員正手拍；上右：運動員反手拍
下左：新手發球與 Wi-Fi 顯示燈；下右：新手正手拍和研究者操作電腦軟體確認資訊完整度

本研究受測者分為網球運動員及網球新手。表 2 為網球運動員基本資料，平均年齡為 15.60 歲，身高為 172.56 公分、體重為 64.44 公斤；表 3 為網球新手基本資料，平均年齡為 16.30 歲，身高為 173.18 公分、體重為 66.24 公斤。收案時間訂定為連續 3 個週六及週日及平日 3 天，收案地點為本校網球場，收案內容為每次收集單一受測者之 3 種揮拍動作，包含發球、正手拍和反手拍，如圖 3 上排三圖所示。一般收案時都在戶外球場，若遇到下雨天，則改在風雨球場進行。收案流程如圖 4 所示；首先，在進行收案之前，先進行收案設備的設置，包含 Wi-Fi 路由器之設置、智能網球拍之連線及收案電腦之資料擷取功能設置，並進行揮拍測試，如圖 3 下排左圖，以確保揮拍資料可以即時透過 Wi-Fi 傳輸到電腦並儲存；接著，對受測者進行收案前說明，包含收案內容、預期分析成果及回饋內容，如

圖 3 下排右圖；然後，收集受測者使用智能網球拍進行 3 種揮拍動作，並請受測者在揮拍前及揮拍後靜止 1 秒鐘；最後，完成受測者揮拍動作紀錄後點擊儲存按鈕儲存數據，並進行下一次的揮拍動作紀錄程序。

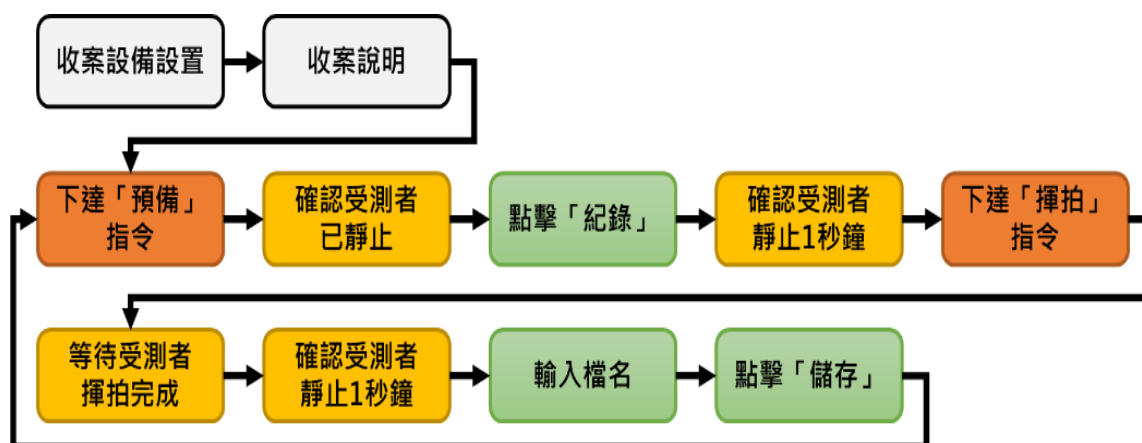


圖 4 網球動作收案流程圖

本研究使用智能網球拍作為收案工具，其外觀與一般網球拍一樣(圖 5 左圖)，差異在於內建一個感測模組與鋰電池(圖 5 中圖)，設置於球拍握把底部(圖 5 右圖)，並具有連網功能，透過 Wi-Fi 無線傳輸方式將受測者的揮拍動作訊號傳送至雲端伺服器儲存，其主要元件包含微控制器、慣性感測模組和電源供應模組：

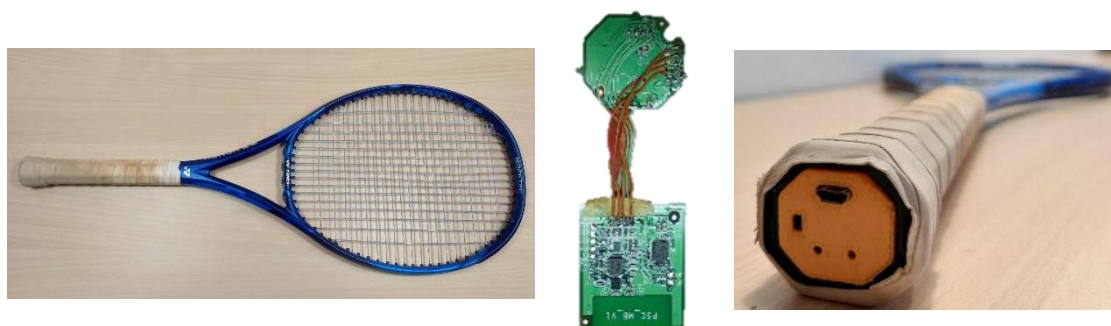


圖 5 收案工具：智能網球拍。左：智能網球拍放置感測模組的底座；

中：智能網球拍的感測模組；右：智能網球底部外觀。

- (a) **微控制器**：結合微控制器及 Wi-Fi 模組，收集慣性感測模組訊號後，訊號會透過暫存器的機制並經過編碼後，將訊號以及對應的

時間透過批次的方式由傳輸模組將訊號傳輸至雲端資料庫。

- (b) **慣性感測模組**：使用 6 軸感測器(加速度計和陀螺儀)及 3 軸磁力計整合為九軸慣性感測模組，其中加速度計用以偵測到地球重力以及運動動作所產生的運動加速度；陀螺儀用以偵測到運動動作所產生的角速度；磁力計用以偵測到地球磁場向量並經由運算可獲得方位角資訊。
- (c) **電源供應模組**：採用電源 IC 進行充電和電池電量監控，鋰電池容量為 550 mAh，其優點在於體積小及重量輕。智能網球拍於運動員訓練期間會將資料儲存於記憶體，並透過 Wi-Fi 模組傳至雲端伺服器進行資料儲存，作為運動員揮拍動作訊號。

收集的數據用於分析之運動員揮拍動作訊號可分為加速度計所量測的加速度訊號，以及陀螺儀所量測的角速度訊號，如圖 6 所示。本研究透過加速度訊號呈現運動員在揮拍動作時，球拍於空間中之三軸直線移動變化(圖 6 左圖)；透過角速度訊號呈現運動員在揮拍動作時，球拍於空間中之三軸轉動變化(圖 6 右圖)。

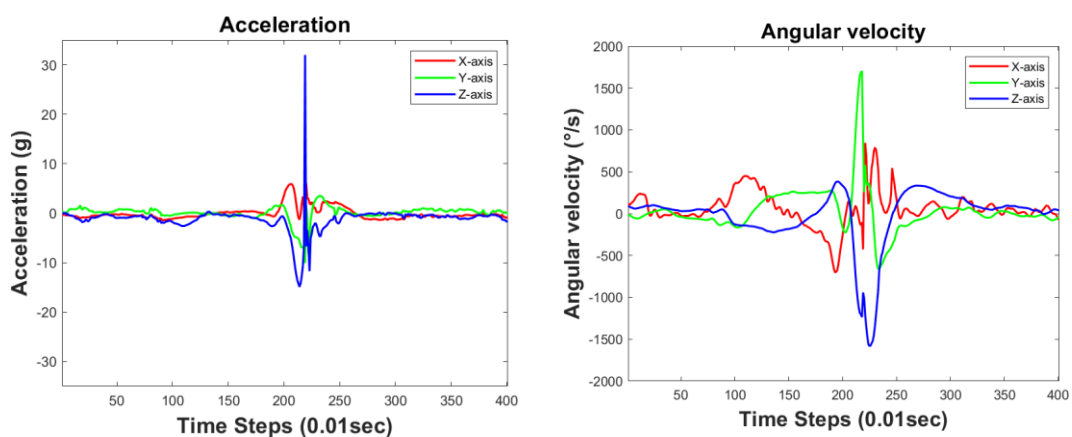


圖 6 揮拍動作訊號。左：三軸加速度訊號，右：三軸角速度訊號。

(2) 訊號前處理與網球揮拍分期

訊號前處理：

在進行訊號分析前，需要對訊號做前處理，以獲得更準確的揮拍動作訊號。訊號前處理包含慣性感測訊號校正及訊號濾波，詳細說明如下：

- (a) **慣性感測訊號校正**：由於慣性感測模組可能因微機電製程的因素產生一些感測器的特性，其包含比例因子及偏差值，導致透過慣性感測模組所量測的訊號有所偏差，而量測到不準確的訊號。因此，需透過加速度計、陀螺儀及磁力計校正程序量測計算其比例因子及偏差值，並分別將其用於加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號之校正，校正公式如式(1)、式(2)及式(3)所示。

$$a_c = \frac{a_r - B_a}{SF_a}, \quad (1)$$

$$\omega_c = \frac{\omega_r - B_g}{SF_g}, \quad (2)$$

$$m_c = \frac{m_r - B_m}{SF_m}, \quad (3)$$

其中， a_r 為校正前之加速度訊號，其單位為 g； a_c 為校正後之加速度訊號，其單位為 g； SF_a 為加速度訊號之比例因子； B_a 為加速度訊號之偏差值，其單位為 g； ω_r 為校正前之角速度訊號，其單位為 °/s； ω_c 為校正後之角速度訊號，其單位為 °/s； SF_g 為角速度訊號之比例因子； B_g 為角速度訊號之偏差值，其單位為 °/s； m_r 為校正前之磁場訊號，其單位為 Gauss； m_c 為校正後之磁場訊號，其單位為 Gauss； SF_m 為磁場訊號之比例因子； B_m 為磁場訊號之偏差值，其單位為 Gauss。

- (b) **訊號濾波**：由於運動過程中人體會發生不自覺地顫抖，導致慣性感測模組量測訊號時產生高頻雜訊。因此，需透過濾波器將運動訊號以外之訊號濾除，本研究使用移動平均濾波器進行訊號濾波，如式(4)所示，其為一低通濾波器，可以濾除加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號之高頻動作雜訊，保留運動之加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號。

$$S[t] = \frac{1}{n} \sum_{t_0=t-(n-1)/2}^{t+(n-1)/2} raw[t_0], \quad (4)$$

其中， n 為移動平均濾波器的濾波點數，本研究設定為 7； $S[t]$ 為濾波後第 t 時間點的加速度訊號、角速度訊號或磁場訊號；

$raw[t_0]$ 為濾波前第 t_0 時間點的加速度訊號、角速度訊號或磁場訊號。圖 7、圖 8 及圖 9 分別顯示一次揮拍的加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號之濾波前後訊號圖。

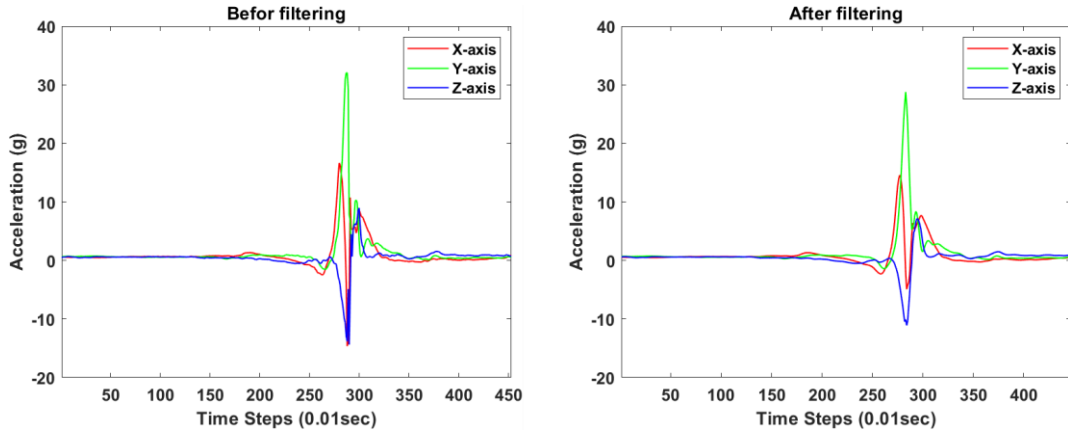


圖 7 加速度訊號濾波前後比較

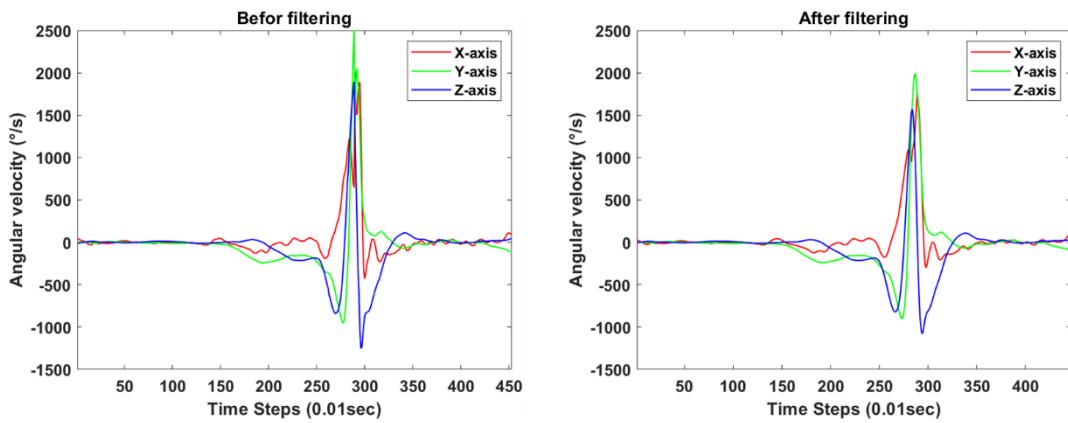


圖 8 角速度訊號濾波前後比較

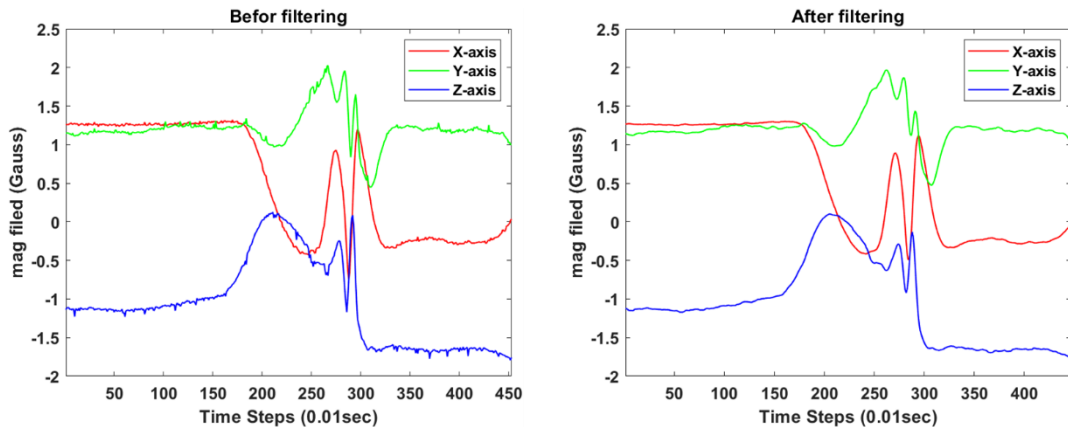


圖 9 磁場訊號濾波前後比較

網球揮拍分期：

本研究在網球揮拍分期偵測上使用極點偵測法，亦即使用訊號波峰與

波谷作為揮拍的動作偵測。首先，透過式(5)分別求得各軸加速度訊號及角速度訊號之合加速度及合角速度訊號；接著，透過一定義之閾值與偵測訊號判斷出揮拍起始點及揮拍結束點，並將其定義為揮拍動作區間；然後，在揮拍動作區間中，透過極點偵測法搜尋合角速度訊號最大值及合角速度訊號最大值前第一個波谷，並將其定義為擊球點及加速期起始點；最後，可透過揮拍起始點、加速期起始點、擊球點及揮拍結束點定義網球揮拍分期之準備期、加速期及餘勢期。

$$S_{svm} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}, \quad (5)$$

其中， S_{svm} 為合加速度訊號或合角速度訊號； S_x 為X軸上之加速度訊號或角速度訊號； S_y 為Y軸上之加速度訊號或角速度訊號； S_z 為Z軸上之加速度訊號或角速度訊號。圖10顯示一次揮拍之揮拍分期，並繪製於合角速度力訊號圖上。

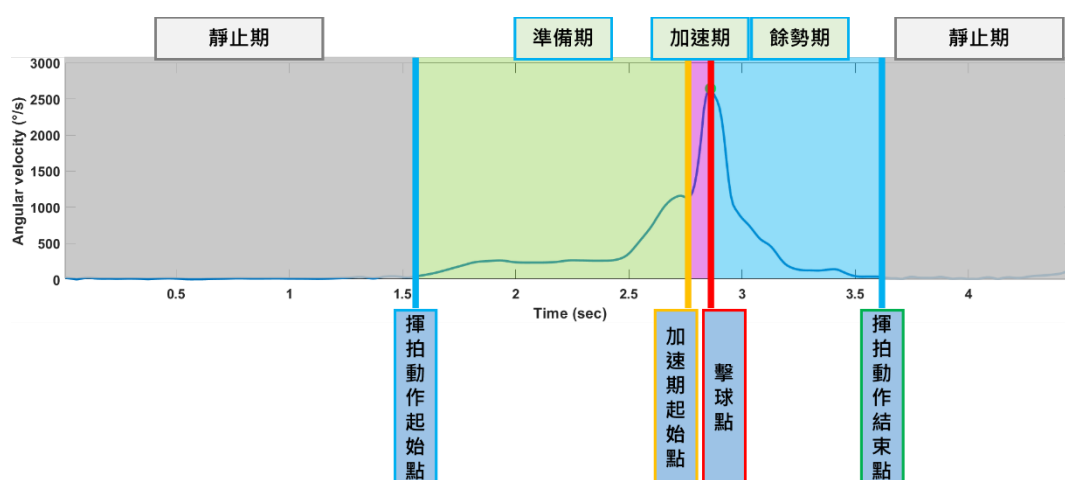


圖 10 網球揮拍分期

(3) 網球揮拍動作分析

本研究在網球揮拍動作分析方面透過姿態估測、座標轉換、重力補償、速度估測與零速度補償及揮拍軌跡重建方法重建受測者之揮拍軌跡，其詳細說明如下：

- (a) **姿態估測**：在姿態估測方法中，本研究使用慣性感測模組之加速度計、陀螺儀及磁力計進行姿態估測。首先，透過加速度計及磁

力計所量測的加速度訊號及磁場訊號進行初始姿態的計算，如式(6)、式(7)、式(8)及式(9)所示。

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + 180, & x < 0, y \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - 180, & x < 0, y < 0 \\ 90, & x = 0, y > 0 \\ -90, & x = 0, y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta = \text{atan2}(-a_{xi}, \sqrt{a_{yi}^2 + a_{zi}^2}), \quad (7)$$

$$\phi = \text{atan2}(a_{yi}, a_{zi}), \quad (8)$$

$$\psi = \text{atan2}(m_{xi} \cos \theta + m_{yi} \sin \theta \sin \phi + m_{zi} \sin \theta \cos \phi, m_{yi} \cos \phi - m_{zi} \sin \phi), \quad (9)$$

其中， a_{xi} 、 a_{yi} 及 a_{zi} 分別為靜止期之 X 軸、Y 軸及 Z 軸上之加速度訊號，其單位為 g； m_{xi} 、 m_{yi} 及 m_{zi} 分別為靜止期之 X 軸、Y 軸及 Z 軸上之磁場訊號，其單位為 Gauss； ϕ 為繞 X 軸旋轉之角度； θ 為繞 Y 軸旋轉之角度； ψ 為繞 Z 軸旋轉之角度。接著，即可透過陀螺儀所量測的角速度訊號進行一次積分，求得慣性感測模組的姿態角度，如式(10)所示。

$$\vartheta[t] = \vartheta[t-1] + \frac{T_s \times (\omega[t] + \omega[t-1])}{2}, \quad (10)$$

其中， $\vartheta[t]$ 為第 t 時間點繞 X 軸、Y 軸或 Z 軸之角度，其單位為 $^\circ$ ； $\omega[t]$ 為第 t 時間點繞 X 軸、Y 軸或 Z 軸之角速度，其單位為 $^\circ/\text{s}$ ； T_s 為取樣週期，其單位為秒，本研究使用之球拍之取樣週期為 0.01 秒。

(b) **座標轉換**：由於慣性感測模組本身之座標系統與參考座標系統不同，若要去除重力加速度並進行軌跡之估測，需將慣性感測模組之座標系統轉換至參考座標系統。姿態表示法為參考坐標系統與感測器座標系統之關係，較常見的方法有尤拉角和方向餘弦矩陣等，詳細介紹如下：

尤拉角：尤拉角為一種直觀的姿態表示法，假設在三維空間中的一座標系統為一個固定的剛體，而尤拉角則為對此剛體之各軸進行旋轉後所得到的角度，其中對 X 軸旋轉之角度為滾轉角(ϕ)；

對 Y 軸旋轉之角度為俯仰角(θ)；對 Z 軸旋轉之角度為偏航角(ψ)。

方向餘弦矩陣：方向餘弦矩陣一般也稱為旋轉矩陣，其是以九個參數之矩陣方式表示參考座標系統與感測器座標系統之間的關係，式(11)為由尤拉角姿態表示法所構成的旋轉矩陣。

$$T_s^r = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中， ϕ 為繞 X 軸旋轉之角度； θ 為繞 Y 軸旋轉之角度； ψ 為繞 Z 軸旋轉之角度； T_s^r 為參考座標系統與感測器座標系統間的旋轉矩陣。

參考坐標系統一般可分為 ENU 座標系統及 NED 座標系統，其定義的方位如圖 11 所示。

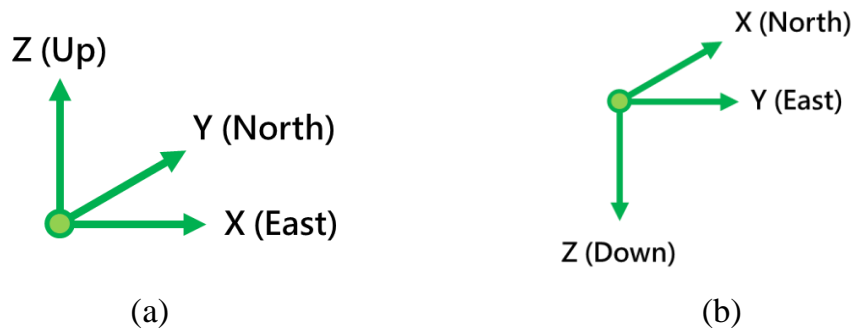


圖 11 參考座標系統方位圖。(a)ENU 座標系統。(b)NED 座標系統。

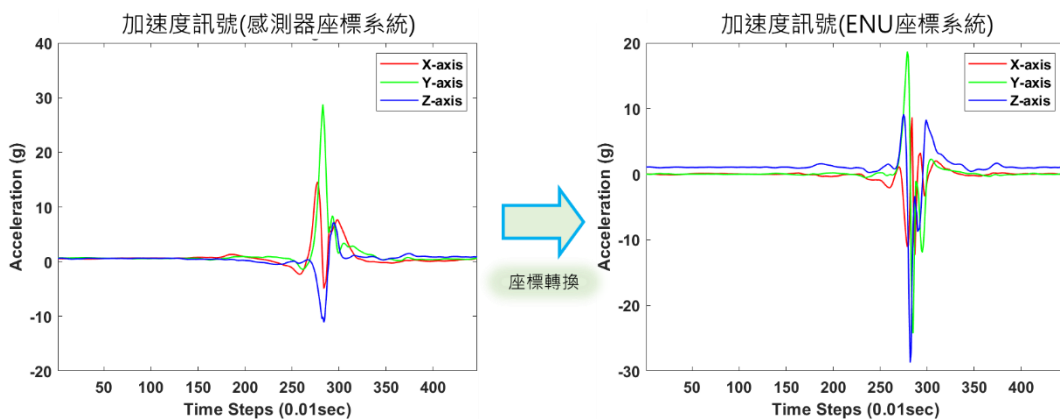


圖 12 座標轉換程序。左：感測器座標系統。右：ENU 座標系統。

本研究使用之參考坐標系統為 ENU 座標系統。在進行姿態估測後，可求得每個時間點參考座標系統與感測器座標系統間之關

係，並且可透過式(11)轉換為每個時間點的旋轉矩陣。接著透過式(12)進行加速度訊號之座標轉換，將感測器坐標系之加速度訊號轉換為 ENU 參考座標系統之加速度訊號。

$$a_r = T_s^r \times a_s, \quad (12)$$

其中， a_r 為經座標轉換後之加速度訊號； a_s 為原始加速度訊號； T_s^r 為旋轉矩陣，可透過式(11)求得。圖 12 顯示座標轉換程序之加速度訊號過程圖。

- (c) **重力補償**：經過座標轉換後之加速度訊號包含地球之重力加速度訊號及揮拍時之運動加速度訊號。因此，可透過減去 ENU 座標系統之加速度訊號 Z 軸上的重力加速度訊號，以進行重力補償程序，解決慣性感測模組會同時量測到揮拍時之運動加速度及地球之重力加速度問題。圖 13 顯示經重力補償程序之加速度訊號過程圖。

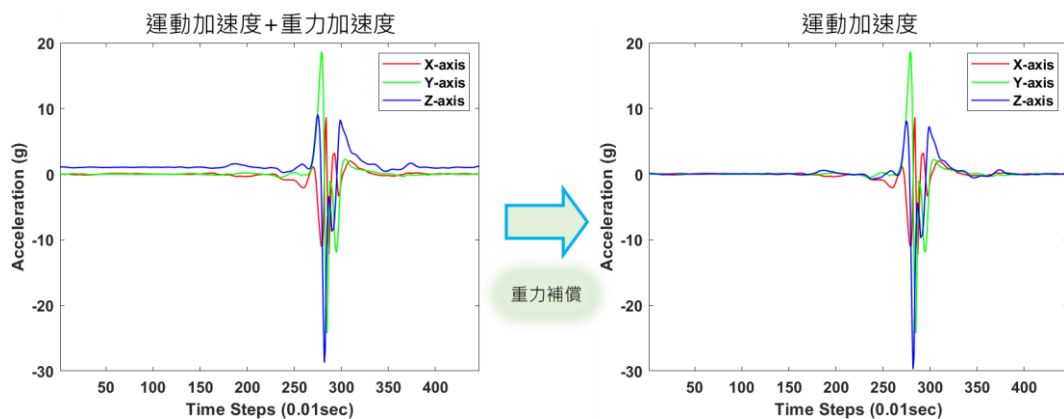


圖 13 重力補償程序。左：運動加速度及重力加速度。右：運動加速度。

- (d) **速度估測與零速度補償**：在速度估測階段，透過將揮拍時之運動加速度訊號進行一次積分則可獲得揮拍時之速度，如式(13)所示，但因為牽涉到積分程序，容易因感測器本身的訊號飄移導致誤差隨時間累積，導致估測之速度產生失真。而在揮拍動作前後皆

有請受測者做靜止的動作，在這兩個階段中之速度應趨近於零。因此，可透過零速度補償程序，將失真之速度訊號經由式(14)進行線性補償。

$$v_{swing}[t] = v_{swing}[t-1] + \frac{T_s \times (a_{swing}[t] + a_{swing}[t-1])}{2}, \quad (13)$$

$$v_{swing}'[t] = v_{swing}[t] - t \times \frac{v_{swing}[t_{final}] - v_{swing}[t_{start}]}{t_{final} - t_{start}}, \quad (14)$$

其中， $v_{swing}[t]$ 為第 t 時間點的揮拍動作區間之 X 軸、Y 軸或 Z 軸速度，其單位為 m/s； $a_{swing}[t]$ 為第 t 時間點的揮拍動作區間之 X 軸、Y 軸或 Z 軸運動加速度，其單位為 m^2/s ； T_s 為取樣週期，其單位為秒，本研究使用之球拍之取樣週期為 0.01 秒； $v_{swing}'[t]$ 為第 t 時間點的揮拍動作區間之 X 軸、Y 軸或 Z 軸速度，其單位為 m/s； t_{start} 為揮拍動作區間之第一個時間點，在此處應為 1； t_{final} 為揮拍動作區間之最後一個時間點。圖 14 顯示經速度估測與零速度補償之加速度訊號過程圖。

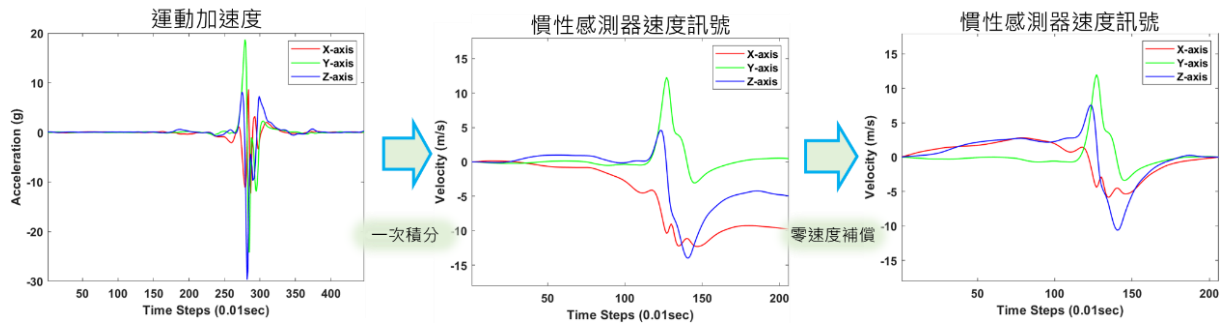


圖 14 速度估測與零速度補償程序。左：運動加速度。中：慣性感測模組之速度。右：經零速度補償之慣性感測模組之速度。

- (e) **揮拍軌跡重建**：在揮拍軌跡重建階段，透過將完成速度補償之揮拍動作區間之速度訊號進行一次積分，則可獲得慣性感測模組之揮拍軌跡，如式(15)所示。

$$\mathbf{p}[t] = \mathbf{p}[t-1] + \frac{T_s \times (v_{swing}'[t] + v_{swing}'[t-1])}{2}, \quad (15)$$

其中， $\mathbf{p}[t]$ 為第 t 時間點的揮拍動作區間之各軸向慣性感測模組

位置，其單位為 m； $v_{swing}'[t]$ 為第 t 時間點的揮拍動作區間之各軸向速度，其單位為 m/s； T_s 為取樣週期，其單位為秒，本研究使用之球拍之取樣週期為 0.01 秒。接著，考慮慣性感測模組於網球拍底部之方向，建立式(16)表示一由拍底至拍頭之網球拍向量，接著透過式(17)進行座標轉換並計算網球拍頭軌跡。

$$\mathbf{u}_{racket} = [-1 \ 0 \ 0]^T \times L, \quad (16)$$

$$\mathbf{p}_{tip} = \mathbf{p} + \mathbf{T}_s^r \times \mathbf{u}_{racket}, \quad (17)$$

其中， \mathbf{u}_{racket} 為底至拍頭之網球拍向量； L 為球拍長度，其單位為 m； \mathbf{p}_{tip} 為揮拍動作區間之 X 軸、Y 軸或 Z 軸網球拍拍頭位置，其單位為 m； \mathbf{p} 為揮拍動作區間之 X 軸、Y 軸或 Z 軸慣性感測模組位置，其單位為 m； \mathbf{T}_s^r 為旋轉矩陣，可透過式(11)求得。

圖 15 為經揮拍軌跡重建後之慣性感測模組軌跡及網球拍拍頭軌跡。

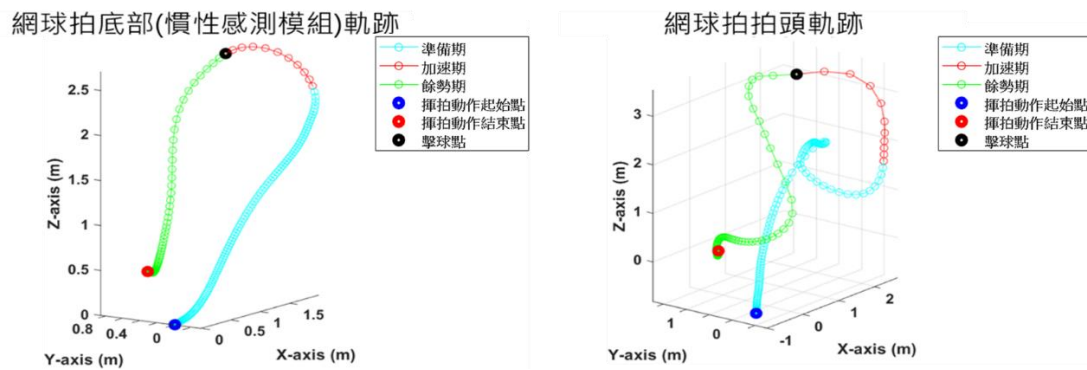


圖 15 網球揮拍軌跡。左：網球拍底部(慣性感測模組)軌跡。右：網球拍拍頭軌跡。

(4) 網球揮拍指標分析

網球揮拍指標分析之研究中，由於揮拍速度及揮拍力度在網球運動中為相當重要的指標參數[6]；因此，本研究在網球揮拍指標分析使用揮拍時之揮拍速度和揮拍力度作為分析依據。首先，當運動員進行網球揮拍動作時，我們可以經過訊號前處理中的慣性感測訊號校正及訊號濾波處理，並透過網球揮拍分期偵測揮拍動作區間中的擊球點；接著，透過網球揮拍指標分析演算法計算其發球揮拍速度及揮拍力度；

最後，透過揮拍速度和揮拍力度分析運動員對於發球的能力比較。

在揮拍速度計算方面，我們使用經訊號前處理之角速度訊號進行運算，透過網球揮拍分期偵測揮拍動作區間中的擊球點，並由擊球點瞬間之角速度量值及球拍長度計算其擊球瞬間之拍頭速度，此時的球拍速度為拍頭之切線速度，需先經式(18)做單位轉換，將角度轉為弧度，即可由式(19)計算得到揮拍速度。

$$[\omega_x' \quad \omega_y' \quad \omega_z']^T = \left[\frac{\pi}{180} \times \omega_x \quad \frac{\pi}{180} \times \omega_y \quad \frac{\pi}{180} \times \omega_z \right]^T \quad (18)$$

$$v_{stroke} = L \cdot \sqrt{\omega_x'^2 + \omega_y'^2 + \omega_z'^2}, \quad (19)$$

其中， ω_x 為 X 軸之角速度訊號，其單位為 $^\circ/s$ ； ω_y 為 Y 軸之角速度訊號，其單位為 $^\circ/s$ ； ω_z 為 Z 軸之角速度訊號，其單位為 $^\circ/s$ ； v_{stroke} 為擊球瞬間之拍頭速度，其單位為 m/s； L 為球拍長度， $L = 0.68$ m； ω_x' 為經單位轉換後之 X 軸角速度訊號，其單位為 rad/s； ω_y' 為經單位轉換後之 Y 軸角速度訊號，其單位為 rad/s； ω_z' 為經單位轉換後之 Z 軸角速度訊號，其單位為 rad/s。

在揮拍力度計算方面，我們使用經訊號前處理且經過座標轉換及重力補償之運動加速度訊號進行運算，透過運動合加速度及球拍質量計算其揮拍力度，其公式如式(20)所示。

$$F = m \cdot \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \quad (20)$$

其中， F 為揮拍力度，其單位為 N； m 為球拍質量($m = .30$ kg)，其單位為 kg； a_x 為 X 軸之加速度訊號，其單位為 g； a_y 為 Y 軸之加速度訊號，其單位為 g； a_z 為 Z 軸之加速度訊號，其單位為 g。

伍、結論

以下將依序針對本研究之四個研究問題，說明其分析結果：

- (1) 不同揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)，揮拍速度和揮拍力度是否有相關性？

根據圖 16 至圖 18 之相關分析結果，發現在三種揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)，揮拍速度和揮拍力度均呈顯著正相關(相關性介於.79 至.88)。顯示揮拍速度越快時，揮拍力度會越強。此結果教練認為合理，因為不同的揮拍速度決定不同的球速，揮拍速度和擊球力度成正比，能力較強之進攻型選手的揮拍速度普遍偏快。

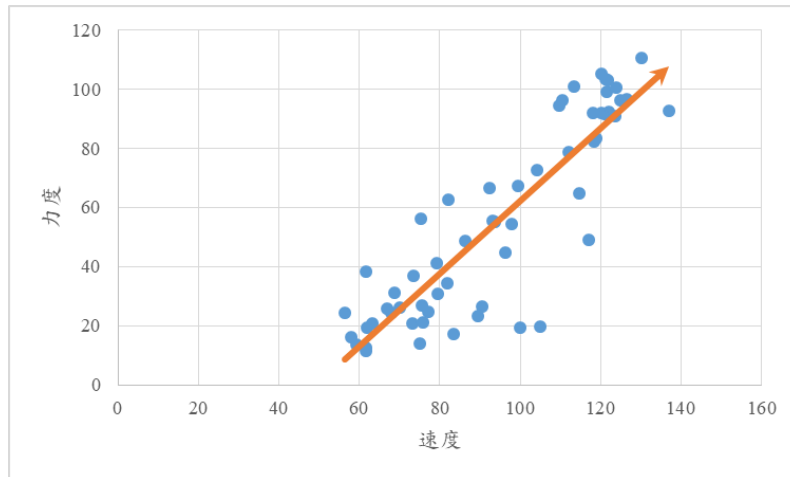


圖 16 揮拍速度和揮拍力度之相關性(發球)

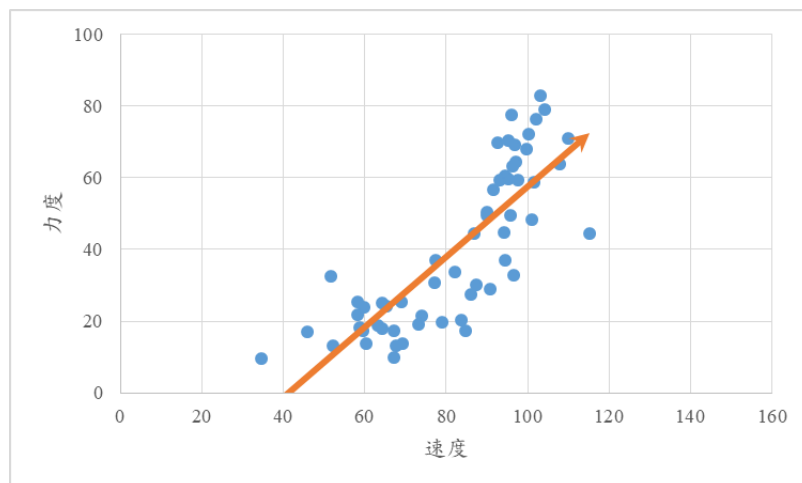


圖 17 揮拍速度和揮拍力度之相關性(正手拍)

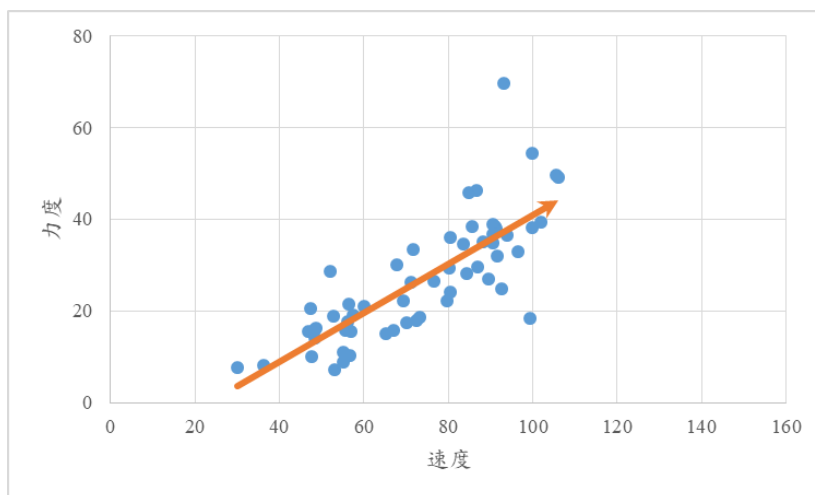


圖 18 揮拍速度和揮拍力度之相關性(反手拍)

(2) 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍速度穩定度和揮拍力度穩定度是否有差異？

在實驗過程中，研究者會要求受測者於不同揮拍動作進行各三次的擊球，以評估每一位受測者之速度穩定度和力度穩定度的變化狀況。本研究在穩定度的定義為：在相同的餵球條件下，揮拍者在同一種球路(發球、正手拍和反手拍)的揮拍速度和力度之變異大小，即變異數越小穩定度越佳，反之亦然。在圖 19 至圖 24，X 軸為第幾次擊球時間，Y 軸為速度或力度之數值，意指圖中每一條曲線代表該位受測者於三次擊球時間的速度或力度變化幅度。觀察圖 19 至圖 24，發現網球運動員之曲線大多較為平緩，網球新手之曲線較容易出現上下起伏之趨勢。此外，為了排除網球運動員和網球新手的揮拍表現基準點差異，我們以標準化後的速度和力度計算變異數。根據表 4 之統計分析結果，證實網球運動員的三種揮拍動作之速度穩定度和力度穩定度皆優於網球新手。雖然正手拍之速度穩定度和力度穩定度未達顯著差異($p > .05$)，但網球運動員之變異數仍明顯小於網球新手之變異數。此結果顯示網球運動員的三種揮拍穩定度皆優於網球新手。

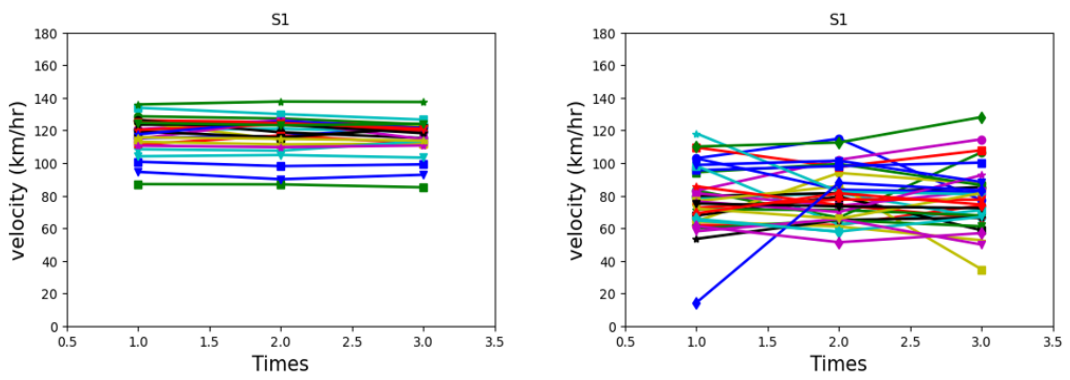


圖 19 發球揮拍速度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

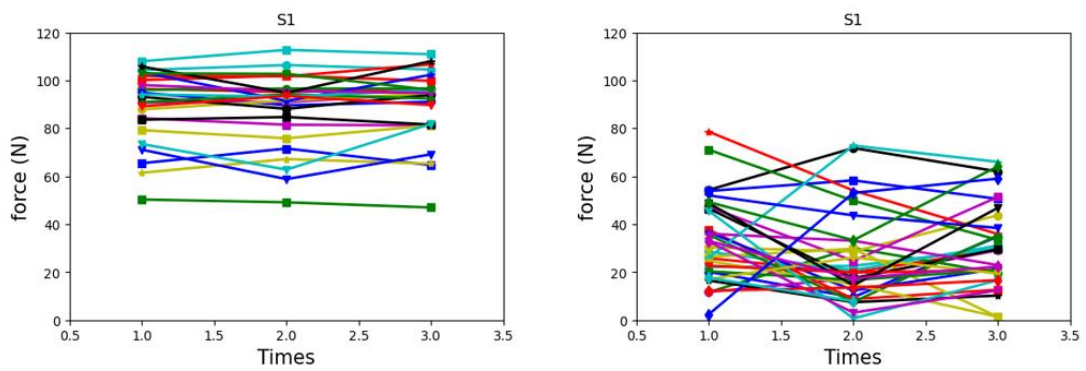


圖 20 發球揮拍力度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

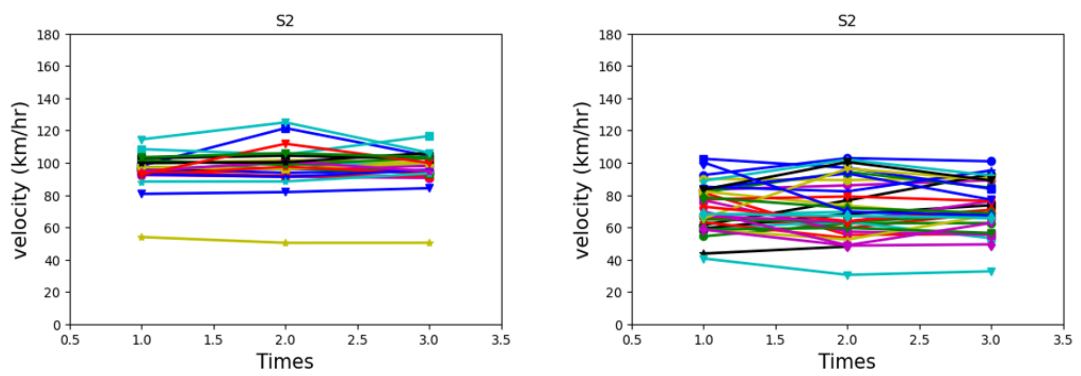


圖 21 正手拍揮拍速度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

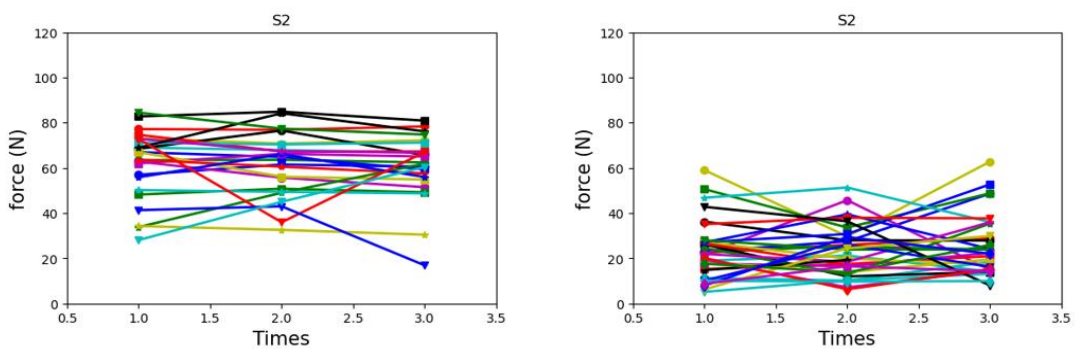


圖 22 正手拍揮拍力度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

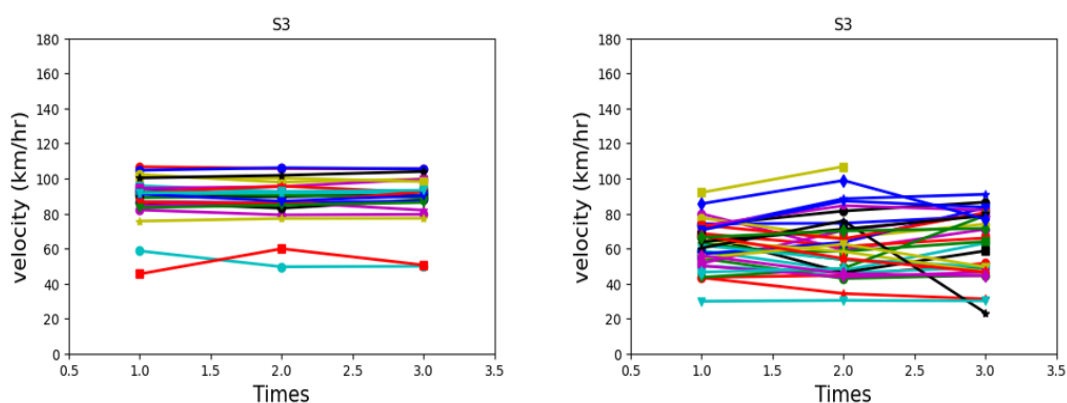


圖 23 反手拍揮拍速度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

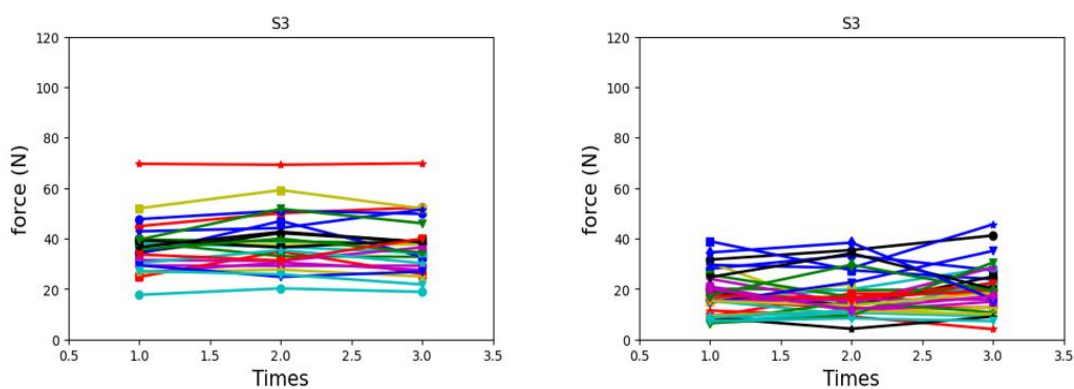


圖 24 反手拍揮拍力度穩定度差異(左為網球運動員；右為網球新手)

表 4 網球運動員和網球新手之揮拍穩定度差異(統計分析結果)

揮拍動作	面向	網球運動員	網球新手	獨立樣本	
		(25 人)	(33 人)	<i>t</i> 檢定	<i>p</i>
		變異數之平均值	變異數之平均值	<i>t</i>	<i>p</i>
發球	速度穩定度	7.03	49.58	2.30	.03
	力度穩定度	6.10	56.12	3.76	.00
正手拍	速度穩定度	13.13	24.73	1.51	.14
	力度穩定度	26.91	49.35	1.49	.14
反手拍	速度穩定度	3.74	30.52	2.79	.01
	力度穩定度	9.85	44.76	3.06	.00

(3) 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍速度和揮拍力度是否有差異？

根據圖 25 至圖 27 之趨勢圖，綠色長條圖代表每位受測者之揮拍速度，紅色曲線代表每位受測者之揮拍力度，發現在三種揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)，網球運動員的揮拍速度和揮拍力度均高於網球新手。此外，根據表 5 的統計分析結果，也證實網球運動員的三種揮拍動作之速度和力度均顯著高於網球新手($p < .05$)。

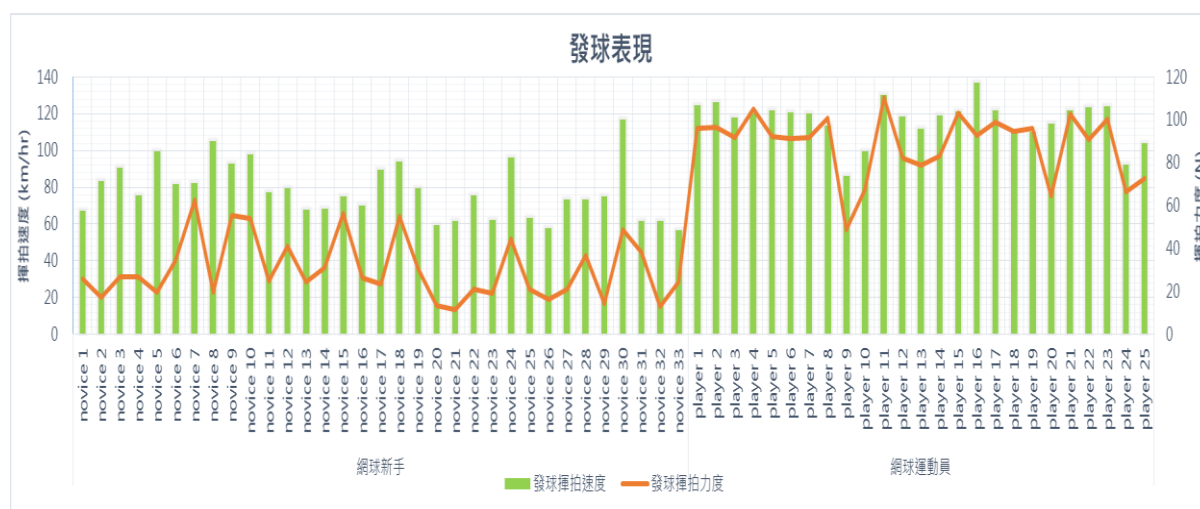


圖 25 網球運動員和網球新手之揮拍差異(發球)

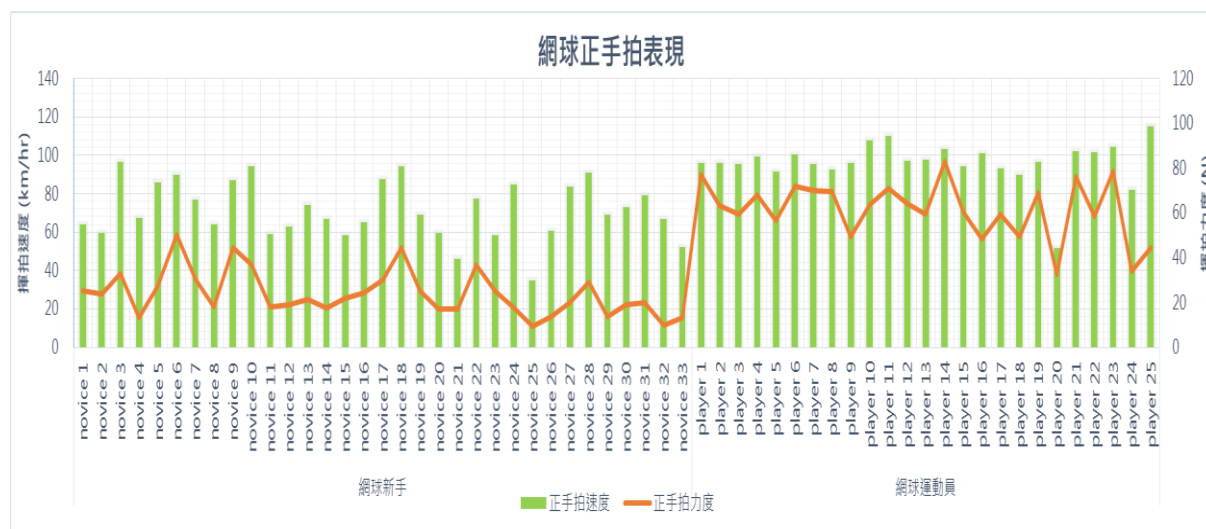


圖 26 網球運動員和網球新手之揮拍差異(正手拍)

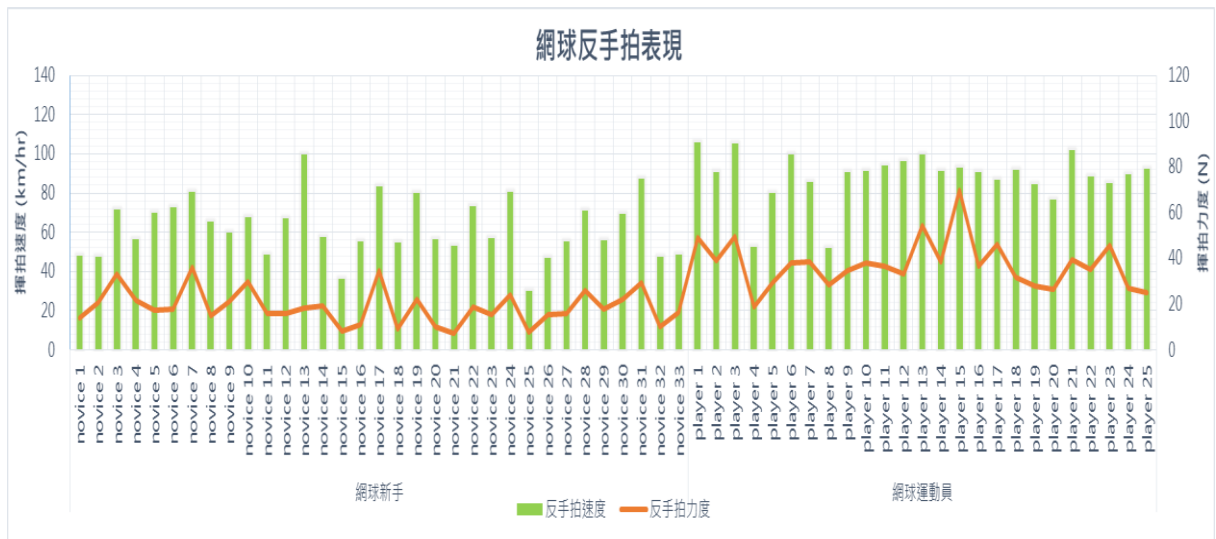


圖 27 網球運動員和網球新手之揮拍差異(反手拍)

表 5 網球運動員和網球新手之揮拍差異(統計分析結果)

揮拍動作	面向	網球運動員(25 人)		網球新手(33 人)		獨立樣本 <i>t</i> 檢定	
		平均數	標準差	平均數	標準差	<i>t</i>	<i>p</i>
發球	速度	116.46	11.37	77.95	15.02	10.70	.00
	力度	88.82	14.96	30.27	14.50	15.02	.00
正手拍	速度	96.42	11.54	71.51	14.94	6.91	.00
	力度	61.55	13.09	23.86	10.12	12.38	.00
反手拍	速度	88.61	13.02	62.26	15.13	6.97	.00
	力度	37.46	10.77	18.74	7.70	7.72	.00

(4) 不同揮拍動作下，網球運動員和網球新手的揮拍軌跡是否有差異？

在圖 28 之網球揮拍軌跡，S1 至 S3 代表發球、正手拍和反手拍等揮拍動作，左半邊的圖為網球運動員之揮拍軌跡，右半邊的圖為網球新手之揮拍軌跡。根據圖 28 之分析結果，在加速期的部分(紅色空心圓點)，網球新手皆比起網球運動員在揮拍軌跡更為密集，顯示在 3 種揮拍動作下，網球新手皆比起網球運動員需要更長的整體揮拍時間。推論網球運動員所需揮拍時間較短(揮拍軌跡較佳)，有更多時間可以決策比賽中下一拍之攻擊策略，故能發揮更加良好的網球表現。揮拍軌跡未來將可作為教練改善運動員網球表現之參考依據。

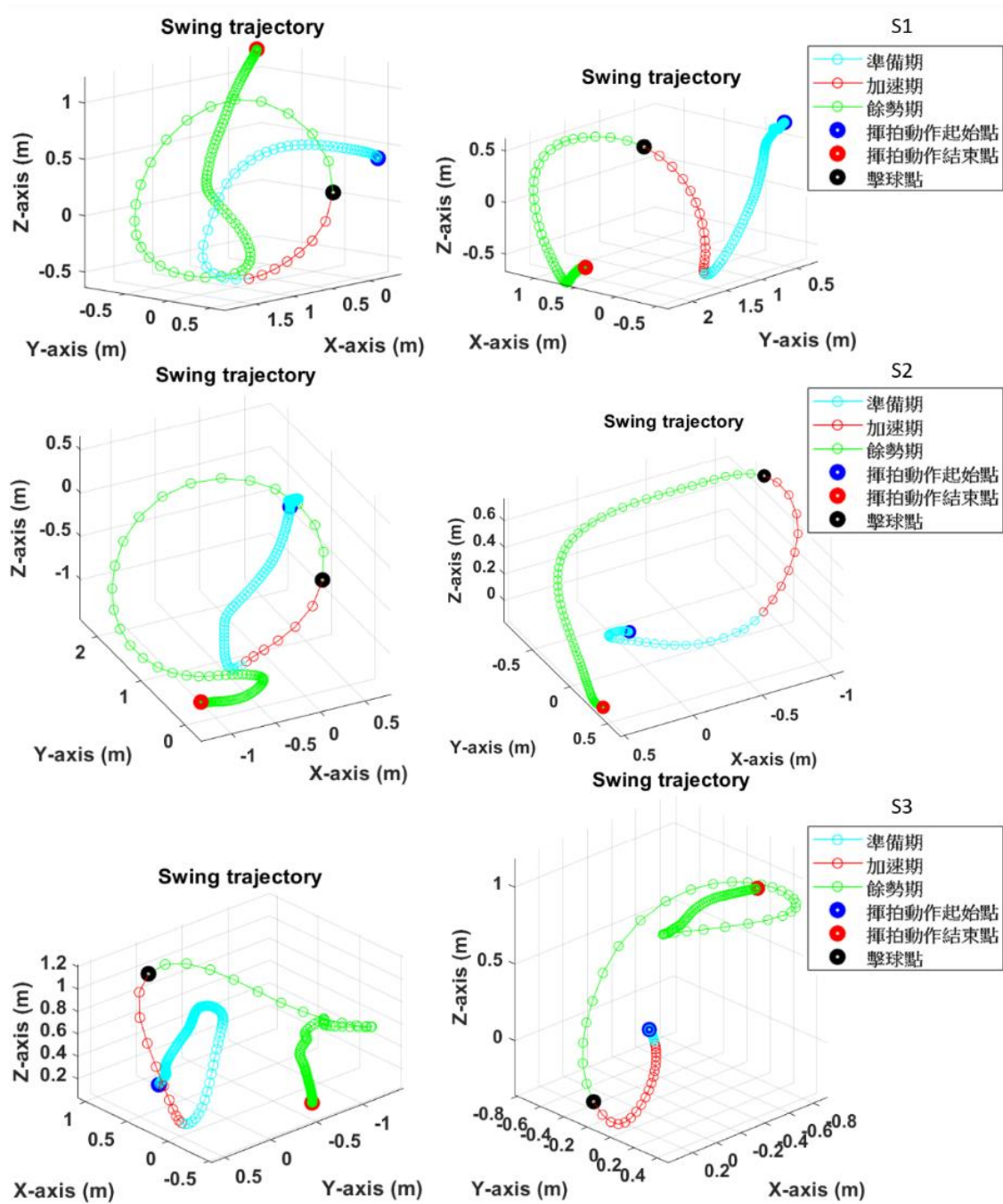


圖 28 網球揮拍軌跡(左為網球運動員；右為網球新手)

本研究運用九軸慣性感測模組，安裝於網球拍握柄中，做成能記錄網球運動員揮拍球速、擊球力量、揮拍軌跡等組合特徵的智能網球拍。此外，本實驗採用加速度計採集地球重力以及球拍運動加速度資訊；內建陀螺儀用以偵測到運動所產生的角速度；磁力計可以感測到地球磁場分向量獲得方位角資訊，所得原始資料經過訊號校正後，消除不同球員同種姿態的差異，可以得到有效的運動特徵物理量；角速度、速度、施力大小等，透過

交叉比較網球選手的實際運動表現的相關性，已獲得專業教練認同，研究結果未來有利於教練開發適性化訓練課程。根據實驗結果，得到以下結論：

1. 在三種揮拍動作下(發球、正手拍和反手拍)，揮拍速度和揮拍力度呈顯著正相關。
2. 在三種揮拍動作下，網球運動員的揮拍速度穩定度和揮拍力度穩定度均顯著高於網球新手。
3. 在三種揮拍動作下，網球運動員的揮拍速度和揮拍力度均顯著高於網球新手。
4. 在三種揮拍動作下，網球運動員的揮拍軌跡優於網球新手。

六、討論與應用

本研究仍有許多改進空間，在網球發球揮拍動作分析方法中，因姿態估測涉及到角速度訊號的積分程序，容易因陀螺儀本身的訊號飄移使得誤差持續累積，因而導致姿態估測的結果不佳，影響座標轉換後球拍姿態不準確，重力補償程序無法有效將重力去除等問題，因此未來研究可改用擴展式卡爾曼濾波器，可透過融合加速度訊號、角速度訊號及磁場訊號，進行較準確之姿態估測。針對未來的研究方向建議將運動員的運動表現建立客觀指標，例如：運動員的各項競賽成績以不同面向給予評比且長期記錄，形成運動員的歷程記錄，以利後續問題診斷與教練開發適性化訓練課程的依據。未來，希望能持續結合物理、運動力學和人工智慧數據分析方法的跨域研究，協助解決運動員在訓練時所面臨的困境與瓶頸，為我國優秀運動員打造最先進之適性化訓練輔具，達到事半功倍的訓練效果，於各項國際競技比賽都能百戰百勝！也期待研究結果可推廣至一般運動喜好者，讓國人覺得運動有趣又有效，大家愛運動，以減少社會醫療成本。

柒、參考資料

1. 邱宏達 (2012)。 *運動與科學*。五南出版社。
2. Chen Kobe (2021)。 *運動賽事的電腦視覺：鷹眼系統如何運作？*
<https://technews.tw/2021/08/01/hawk-eye-in-sport-games-computer-vision/>
3. 林永祥 (2010)。以 SOWT 分析光學式動作擷取系統發展趨勢。
2010 年第三屆運動科學暨休閒遊憩管理學術研討會論文集，467-473。
4. 陳智揚 (2015)。穿戴式科技。 *科學發展*，512，20-25。
5. 馬達弟、曾精雄 (1900)。 *網球基本訓練與技術*。臺灣珠海出版社。
6. Sogut, M. (2017). A comparison of serve speed and motor coordination between elite and club level tennis players, *Journal of Human Kinetics*, 55(1), 171-176.