

國立臺灣師範大學運動與休閒學院運動競技學系

碩士論文

Department of Athletic Performance
College of Sports and Recreation
National Taiwan Normal University
Master's Thesis

開發智慧棒球打擊手套分析揮棒運動學

Development of an Intelligent Baseball Batting Glove
for Analyzing Swing Biomechanics



陳鋒

Feng Chen

指導教授：相子元 博士

Advisor : Shiang, Tzyy-Yuang, Ph.D.

中華民國 114 年 2 月

February 2025

開發智慧棒球打擊手套分析揮棒運動學

2025 年 2 月

研究生：陳 鋒

指導教授：相子元

摘要

緒論：慣性感測器 (Inertial Measurement Unit, IMU) 已被廣泛安裝於球棒尾部，用以測量棒球打擊者揮棒的運動學參數。然而，將 IMU 固定於棒尾可能使打者在握持長棒時感到不適。**目的：**將 IMU 固定於右打者前導手手背處，並開發揮棒運動學參數之演算法，旨在獲取打者在揮擊期的三軸合加速度、最大揮棒速度、揮擊期時間、最大揮棒速度時間差與擊中球瞬間之球棒進攻、垂直、水平角度；分析 IMU 與動作捕捉系統的信效度，並評估 IMU 所計算揮棒參數應用在不同層級打擊者的鑑別度。**方法：**大專公開一級組與一般組選手各 20 位參與本次研究，所有受試者之打擊習慣皆為右打者，每位受試者進行 20 次靜置於打擊座的球擊打實驗。同時使用 IMU 與動作捕捉系統收取數據並分析儀器之間的信效度；並檢驗 IMU 測得的揮棒速度和球棒角度的誤差值是否分別不超過 ± 1.5 m/s 和 $\pm 3^\circ$ 。**結果：**兩組選手在兩種儀器下的揮擊期揮棒參數顯示出顯著的正相關 (mean $r = .908$)，且組內相關係數 (ICC) 顯示較高的一致性 (mean ICC = .861)；然而，在擊球瞬間，球棒的進攻角度、垂直角度和水平角度僅為中度相關 (mean $r = .639$)。此外，兩組層級打者的所有揮棒運動學參數均顯示系統性偏差 ($p < .001$)。在整體打擊者的揮棒參數結果中，只有揮棒速度 (+1.4 m/s) 和球棒進攻角度 (-3.0 deg) 位於預設目標範圍內，其餘參數均超出了預期範圍。**結論：**整體揮棒速度和進攻角度的測量結果位於設定之誤差值範圍內，但其他球棒角度皆超出了誤差值範圍，顯示慣性感測器在測量揮棒速度與進攻角度方面具有可靠性，但仍需進一步分析其他球棒角度測量中的誤差來源。

關鍵字：棒球打擊、穿戴式裝置、揮棒速度

Development of an Intelligent Baseball Batting Glove for Analyzing Swing Biomechanics

February, 2025

Author: Feng Chen

Advisor: Tzyy-Yuang Shiang

Abstract

Introduction: Inertial measurement units (IMUs) have been widely mounted on the knob of baseball bats to measure the kinematic parameters of a batter's swing. However, attaching an IMU to the bat knob may cause discomfort when gripping a long bat. **Objective:** This study aims to develop an algorithm for extracting swing kinematic parameters by affixing an IMU to the dorsal side of the lead hand of right-handed batters. Specifically, it seeks to measure the three-axis resultant acceleration, peak bat speed, swing duration, time to peak bat speed, and bat attack, vertical, and horizontal angles at ball impact. Additionally, the study examines the reliability and validity of IMU-based measurements compared to a motion capture system and evaluates the discriminative ability of IMU-derived swing parameters among batters of different skill levels. **Methods:** A total of 40 collegiate baseball players, including 20 participants from the top division and 20 from the general division, were recruited for this study. All participants were right-handed batters and performed 20 trials of stationary tee batting. Data were collected simultaneously using both the IMU and the motion capture system to analyze the reliability and validity of the instruments. The accuracy of IMU-derived swing speed and bat angles was assessed based on predefined error thresholds of ± 1.5 m/s and $\pm 3^\circ$, respectively. **Results:** The swing parameters for both groups of players showed a significant positive correlation under both instruments (mean $r = .908$), with good intra-class correlation coefficient (ICC) stability (mean ICC = .861). However, the bat attack angle, vertical angle, and horizontal angle at the moment of impact showed only moderate correlation (mean $r = .639$). All swing kinematic parameters across the two skill level groups exhibited systematic bias ($p < .001$). Among the swing parameters for both groups, only the swing speed (+1.4 m/s) and bat attack angle (-3.0°) were within the target range, while the remaining parameters exceeded the set targets. **Conclusion:** The IMU demonstrated reliable measurements for swing speed and attack angle within the predefined error thresholds. However, the bat angles at impact exceeded the acceptable error margins, suggesting the need for further analysis to identify potential sources of measurement errors in bat angle estimation.

Keywords: baseball batting 、 wearable devices 、 swing speed

目次

| | |
|---------------------------|-----------|
| 中文摘要..... | i |
| 英文摘要..... | ii |
| 目次 | iii |
| 圖次 | v |
| 表次 | vi |
| | |
| 第壹章 緒論..... | 1 |
| 第一節 研究背景..... | 1 |
| 第二節 研究目的..... | 5 |
| 第三節 研究假設..... | 6 |
| 第四節 研究範圍與限制..... | 6 |
| 第五節 名詞操作定義..... | 7 |
| 第六節 研究之重要性..... | 7 |
| | |
| 第貳章 文獻探討..... | 8 |
| 第一節 慣性感測器應用於棒球打擊揮棒參數..... | 8 |
| 第二節 揮棒運動學參數對打擊表現之影響..... | 10 |
| 第三節 慣性感測器應用於不同揮擊運動..... | 11 |
| | |
| 第參章 研究方法..... | 14 |
| 第一節 研究對象..... | 14 |

| | | |
|-------------|---------------------------|-----------|
| 第二節 | 實驗儀器與設備 | 15 |
| 第三節 | 實驗流程 | 18 |
| 第四節 | 資料分析 | 22 |
| 第五節 | 統計方法 | 33 |
| 第四章 | 結果..... | 34 |
| 第一節 | 公開一級組打擊者揮棒參數之差異 | 34 |
| 第二節 | 一般組打擊者揮棒參數之差異 | 35 |
| 第三節 | 整體打擊者揮棒參數之結果 | 37 |
| 第五章 | 討論..... | 39 |
| 第一節 | 慣性感測器揮擊期揮棒速度之討論 | 39 |
| 第二節 | 慣性感測器擊中球瞬間球棒角度之討論 | 42 |
| 第三節 | 智慧打擊手套與市售棒尾揮棒感測器之討論 | 43 |
| 第四節 | 慣性感測器採樣範圍之討論 | 45 |
| 第五節 | 研究限制與建議..... | 46 |
| 第陸章 | 結論..... | 47 |
| 參考文獻 | | 48 |
| 附錄一 | 實驗受試者須知 | 54 |
| 附錄二 | 研究受試者同意書 | 55 |
| 附錄三 | 實驗受試者基本資料 | 56 |

圖次

| | | |
|------|--|----|
| 圖 1 | 擊球瞬間球棒進攻角度 (Attack Angle) 示意圖..... | 3 |
| 圖 2 | 擊球瞬間球棒垂直角度 (Vertical Angle) 示意圖..... | 3 |
| 圖 3 | 擊球瞬間球棒水平角度 (Horizontal angle) 示意圖..... | 3 |
| 圖 4 | 慣性感測器與反光球黏貼位置..... | 16 |
| 圖 5 | 球棒與黏貼紅外線反光球位置..... | 16 |
| 圖 6 | 固定式打擊座與黏貼反光球位置..... | 17 |
| 圖 7 | 實驗流程圖..... | 19 |
| 圖 8 | 實驗環境..... | 20 |
| 圖 9 | 慣性感測器固定位置..... | 21 |
| 圖 10 | IMU 與 VICON 三軸合加速度資料分析示意圖..... | 31 |
| 圖 11 | IMU 與 VICON 揮棒速度、揮棒參數資料分析示意圖..... | 32 |

表次

| | | |
|----|------------------------|----|
| 表一 | 大專棒球聯賽公開一級組球員基本資料..... | 14 |
| 表二 | 大專棒球聯賽一般組球員基本資料..... | 14 |
| 表三 | 公開一級組打擊者兩種儀器揮棒參數..... | 35 |
| 表四 | 一般組打擊者兩種儀器揮棒參數..... | 36 |
| 表五 | 整體打擊者兩種儀器揮棒參數..... | 38 |



第壹章 緒論

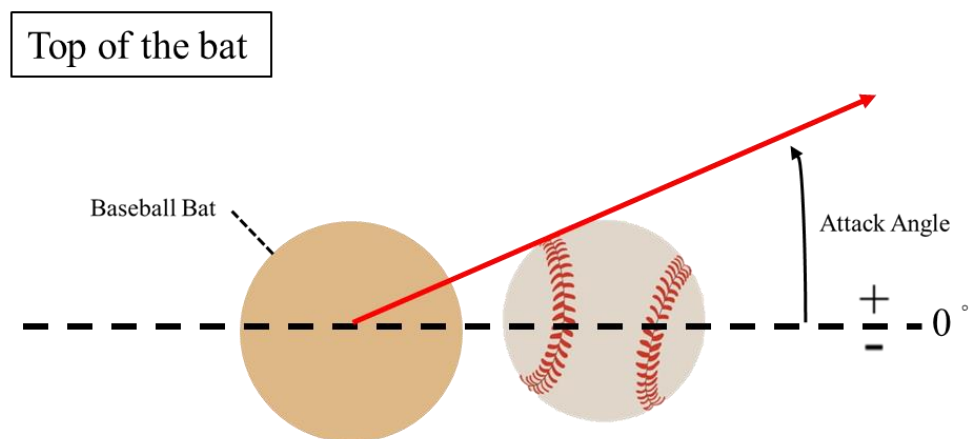
第一節 研究背景

棒球的打擊是一項講求技術與動作流暢性的運動 (Adair, 1990)。須由一連串身體動作所組成，經由跨步期、揮擊期直到擊球瞬間的全身動力鏈連接，才能擊出強而有力的球 (Fortenbaugh, 2011; Yang et al., 2021)。先前研究指出揮擊期的擊球瞬間，被認為是分析棒球打擊的關鍵時間點之一 (Escamilla et al., 2009; Katsumata, 2007; Welch et al., 1995)。揮擊期開始視為前導腳著地到擊球瞬間 (Punchihewa et al., 2021)。前導腳著地後，打者將先後啟動髖部和軀幹的旋轉，並將動能從腳、髖部、軀幹和手部，傳遞至球棒，使球棒在產生最大動能後擊中棒球 (Chen et al., 2022; Katsumata, 2007)。

棒球打擊中，揮棒速度被視為擊球表現的關鍵指標。球棒的線性速度越大，施加在球上的力量越大，擊球初度就越快。且擊球前的揮棒速度與揮棒角度是提高擊球初速和距離的重要因素 (Crisco et al., 2022; Sawicki et al., 2003)。先前研究發現，當打者在擊中打擊座上球的瞬間，球棒會處於最大速度 (Tabuchi et al., 2007)。揮棒速度的增加也能夠減少揮棒時間，擁有更長的決定時間。為了達到這些目標，打者需要準確的使用球棒擊中飛行中的球，並在擊中球的瞬間同時增加揮棒速度 (Horiuchi & Sakurai, 2016)。另外，擊球瞬間的揮棒角度區分為進攻角度及擊中球時球棒在水平面上朝向球的角度 (圖 1)，當球棒平行於地面移動時角度為零，當球棒向上移動時，會出現正值進攻角度，而當球棒向下移動時會出現負值進攻角度；垂直球棒角度及球棒在垂直平面上朝向球的角度 (圖 2)，當球棒平行於地面時垂直

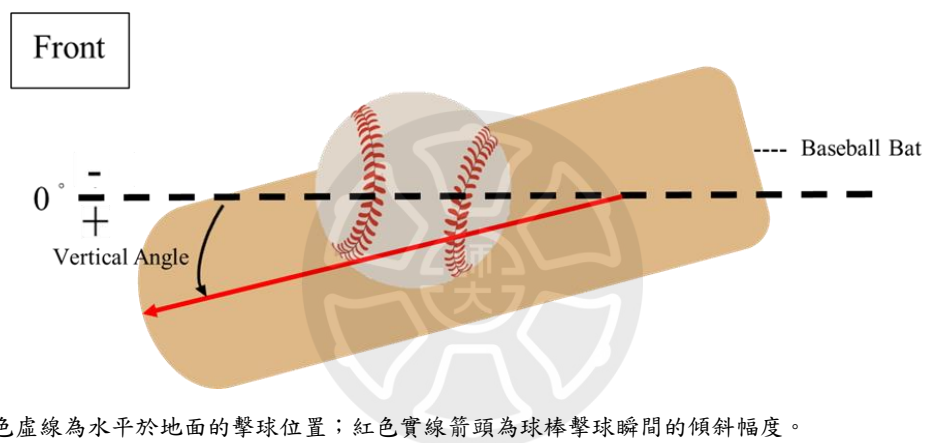
角度為零，當球棒甜蜜點低於棒尾時垂直角度為負值；水平角度及球棒在矢狀面上朝向球的角度（圖 3），當球棒甜蜜點向投手移動時，角度為零，當球棒向拉力側移動時，會出現正值水平角度，當球棒向反方向移動時，則會出現負值水平角度 (Bailey et al., 2016)；當打者的球棒以進攻角度接近球時，可以使打者有更長、更有效的擊球路徑，且可以將更多的動力從球棒轉移到球上。MLB (Major League Baseball) 的統計分析指出，當投手投出直球時，球通常沿著 6 度的角度飛行。先前研究發現 6 度的進攻角度將使球棒與投球平面一致，而 18 度的球棒進攻角度是達到球飛行距離的最佳角度，但也可能會增加打者揮棒落空的機率 (Nathan et al., 2012)。Sawicki 等人的研究建議，以 9 度的進攻角度是擊出長打的理想角度。為了應對各種不同的投球角度，進攻角度應在 4.5 到 15 度之間 (Williams & Underwood, 2013)；在垂直球棒角度部分，MLB 打者的球棒垂直角度平均範圍為 -25 至 -35 度。當球棒垂直角度較小時可能會導致內野飛球的發生機率增加，而增加球棒垂直角度時會降低擊中棒球下方的可能性，同時減少球向後的旋轉，形成較小的飛行角度範圍，這些都是有助於提升進攻表現的結果 (Willardson, 2018)。這些打擊參數通常是教練和球員在訓練或比賽中主觀的方式給予反饋，且一直被當作評估打擊者的重要指標 (Stewart et al., 2021)。

圖 1 擊球瞬間球棒進攻角度 (Attack Angle) 示意圖



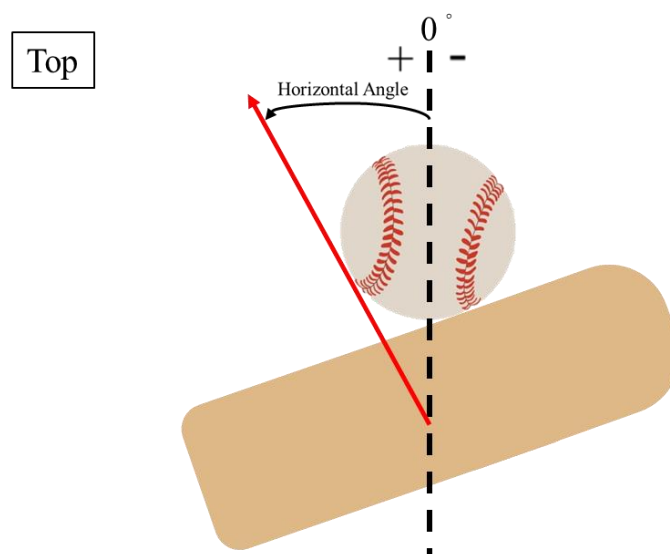
註：黑色虛線為球行經路徑；紅色實線箭頭為球棒揮擊路徑。

圖 2 擊球瞬間球棒垂直角度 (Vertical Angle) 示意圖



註：黑色虛線為水平於地面的擊球位置；紅色實線箭頭為球棒擊球瞬間的傾斜幅度。

圖 3 擊球瞬間球棒水平角度 (Horizontal angle) 示意圖



註：黑色虛線為球行經路徑；紅色實線箭頭為球棒揮擊路徑。

打擊運動學已在實驗室中使用高速攝影機與動作捕捉系統進行廣泛的研究，但需要受限於試驗室中進行 (Escamilla et al., 2009 ; Inkster et al., 2011 ; Kidokoro & Morishita, 2021)。如今的慣性感測器 (Inertial Measurement Unit, IMU) 變得更輕巧、便於攜帶，且包含三軸加速規 (Accelerometer)、陀螺儀 (Gyro)、地磁計 (Magnetometer)，在不同運動領域中被廣泛應用 (Marin et al., 2015)。在棒球領域，除了分析投球運動學以外，透過慣性感測器的三軸加速規與陀螺儀，可以獲得方向與速度，因此，也被用於測量棒球打者的打擊運動學參數 (Lyu & Smith, 2018 ; King et al., 2012)。

慣性感測器 (IMU) 已可固定於球棒尾部並用於測量打擊運動學參數 (King et al., 2012)。透過加速度與角速度，可以在短時間內測量揮棒速度，IMU 透過演算法計算出的揮棒速度與黃金標準僅誤差 0.31 m/s (Lyu & Smith, 2018)。先前研究將 IMU 固定在球棒甜蜜點處，但揮棒速度僅能在空揮棒時進行數據測量，如進行擊球時會造成 IMU 的損壞 (Lapinski et al., 2009)。另外一篇研究將慣性感測器固定於棒尾時發現，因擊中球瞬間所造成的撞擊震動可能會超出 IMU 加速度計大於 2000 deg/s 的測量範圍，這可能會損壞加速度計，且固定在棒尾時會影響因握持長棒的選手造成不適 (Lyu & Smith, 2018 ; Punchihewa et al., 2021)。

而在 IMU 測量揮棒角度僅有幾篇研究。先前的研究結果顯示，將 IMU 固定於棒尾測量球棒角度與動作捕捉系統相比 Mizuno Swing Tracer、Blast Baseball、Garmin Swing Coach、Diamond Kinetics 均呈現正相關，但相關係數均低於 0.8；組內相關係數 ICC 只有 Diamond Kinetics 高於 0.8，其餘均低於 0.8，根據擊球點的不同，球

棒垂直角度最多可變化為 6% 並且先前研究所使用的揮棒感測器精準度均大於 4% (Morishita & Jinji, 2022)。因此，在擊球瞬間的球棒角度還需要進一步的研究，來確認 IMU 在球棒角度的準確性。

如今，幾乎所有的棒球打擊者在打擊時會穿戴打擊手套。當以赤手進行打擊時可能會因為手心流汗導致球棒滑動與較難控制進而影響擊球表現，甚至可能會有因全力揮擊時導致球棒脫離雙手造成危險；而穿戴打擊手套有助於提升握持球棒的摩擦力，因為能夠更牢固的握持球棒能使打擊者進行的全力揮棒並且對良好的擊球表現至關重要，即使是最微小的滑動或不當的握持球棒都可能導致擊球表現降低 (Jogendra & Bhalla, 2021)。目前測量揮棒運動學的市售慣性感測器均固定於球棒尾處，但是這可能會使握持長棒打者造成不適。因此，本研究將慣性感測器固定於打擊手套手背處進行揮棒運動學測量。

第二節 研究目的

本研究目的為：

- 一、 將 IMU 固定於右打者前導手之打擊手套手背處，並發展透過 IMU 測量揮棒運動學參數之演算法，以期獲取打擊者揮棒速度、揮棒時間、球棒進攻、垂直與水平角度。
- 二、 將開發之慣性感測器演算法所計算的揮棒參數結果與動作捕捉系統分析其信度。
- 三、 將開發之慣性感測器演算法所計算的揮棒參數結果與動作捕捉系統分析其效度。
- 四、 將開發之慣性感測器演算法所計算的揮棒參數結果與動作捕捉

系統分析在不同層級之選手鑑別度。

第三節 研究假設

本研究假設為：

- 一、 透過開發之演算法揮棒速度、揮棒時間、球棒進攻垂直與水平角度之參數可以藉由固定於打者前導手手背處的 IMU 所測量。
- 二、 透過 IMU 所計算的揮棒參數與動作捕捉系統所計算的揮棒參數信度達高度相關，即兩者儀器之間的測量結果有高度一致性。
- 三、 透過 IMU 所計算的揮棒參數與動作捕捉系統所計算的揮棒參數效度達高度相關，即兩者儀器之間的測量結果有高度準確性。
- 四、 在不同層級打者之誤差範圍，慣性感測器與動作捕捉系統之揮棒速度誤差不超過 ± 1.5 m/s；揮棒角度誤差不超過 $\pm 3^\circ$ (Morishita & Jinji, 2022)。

第四節 研究範圍與限制

- 一、 本研究之打擊者均為右打者，將慣性感測器固定於前導手手背，因此目前本研究無法確認左打者揮棒運動學參數。
- 二、 本研究目前只使用固定式打擊座收取揮棒參數，對於其他打擊方法之揮棒參數尚未收取。

第五節 名詞操作型定義

- 一、 最大揮棒速度：打擊者在開始揮棒到擊中球（揮擊期）時球棒甜蜜點行徑的最大速度。
- 二、 揮棒期時間：打擊者在開始揮棒到擊中球時球棒甜蜜點行徑的時間。
- 三、 球棒進攻角度 (Attack Angle)：擊中球時球棒在水平面上朝向球的角度。球棒平行於地面移動時角度為零，球棒向上移動時，會出現正值進攻角度，而球棒向下移動時會出現負值進攻角度。
- 四、 球棒垂直角度 (Vertical Angle)：球棒在垂直平面上朝向球的角度。球棒平行於地面移動時角度為零，當球棒甜蜜點低於慣性感測器時垂直角度為正值。
- 五、 球棒水平角度 (Horizontal angle)：球棒在矢狀面上朝向球的角度。當球棒向投手移動時，角度為零，球棒向拉力側移動時，會出現正值水平角度，當球棒向反方向移動時，則會出現負值水平角度。
- 六、 最大揮棒速度到擊中球時間：打擊者在揮擊期時，最大揮棒速度到擊中球瞬間的時間。

第六節 研究之重要性

透過目前慣性感測器能夠檢測棒球打擊者揮棒參數的基礎上，並發展慣性感測器固定於打擊手套上的方法來檢測揮棒運動學參數，增加在測量棒球打擊者揮棒參數的準確性。讓選手與教練以客觀的方式

來進行訓練，以期提升運動表現，並且讓打擊者在打擊時能夠更加舒適，也能夠減少固定在球棒尾部時因撞擊震動所造成慣性感測器的損壞的機率。

第貳章 文獻探討

第一節 慣性感測器應用於棒球打擊揮棒參數

以往在測量揮棒速度的方法是透過動作捕捉系統，這套系統需要使用高速攝影機，並且非常昂貴。此外，動作捕捉系統通常在實驗室的環境中進行測試，需要大量空間，無法在實際場地進行。(Crisco et al., 2002；Greenwald et al., 2002；Inkster et al., 2010；King et al., 2012；Tabuchi et al., 2007)。雖然使用動作捕捉系統測量揮棒速度與角度是有效且可靠的，但這種方法昂貴、耗時，對於教練來說並不實用(Sharma et al., 2013；Wright, 2008)。

如今，慣性感測器等可穿戴式感測器可以做為動作捕捉系統的替代方案，沒有空間限制或繁瑣的設置程序。並且便於攜帶、價格較低且易於被使用，可以在不妨礙運動員表現的情況下監控運動員表現(Camomilla et al., 2018)。在棒球領域中，已有可以測量投球數量和旋轉軸向的棒球，以及測量投手投球時測量肘關節力矩的感測器；在打擊部分，固定於球棒尾部的無線慣性感測器已被開發出來，並且用於測量打者揮棒速度和揮棒角度等揮棒參數(King et al., 2012)。

在市售的棒尾慣性感測器測量打擊運動學參數準確度的研究中指出，目前的棒尾無線慣性感測器的加速規採樣範圍在 16g 時達到

飽和狀態，這可能會造成計算後的揮棒速度造成誤差，先前研究發現市售的揮棒感測器與動作捕捉系統的揮棒速度平均低估了約 8% (Lyu & Smith, 2018)。另一篇研究發現，隨者揮棒速度的增加，感測器測量出的精確度會產生約 3 m/s 的誤差 (Morishita & Jinji, 2022)。而將感測器固定在棒尾也可能會因握持球棒習慣不同的選手造成不適 (Punchihewa et al., 2021)。在 Lapinski 等人 (2009) 的研究中，將自行開發之揮棒感測器黏貼於球棒甜蜜點的位置進行揮棒速度的測量，與動作捕捉系統相比的平均誤差為 4.8 ± 0.5 m/s，但這種方法只能限制於空揮棒時的揮棒速度測量，如要進行擊打打擊座實驗時須取下，避免造成慣性感測器的損壞。

在自行開發之慣性感測器評估打擊軀幹與手部運動學的研究中發現，慣性感測器在評估手部的速度方面有 0.63 ± 0.34 m/s 較小的誤差值，(Punchihewa et al., 2020)。利用有線慣性感測所測量的加速度與角速度在透過演算法計算後可以獲得揮棒速度，而帶有加速度計 (50 kHz 與 500 kHz) 與陀螺儀 (200 deg/s) 高採樣範圍的有線慣性感測器來測量揮棒動作時，揮棒速度與高速攝影系統的差異變得更小 (0.31 m/s)。表示加速度計和陀螺儀技術的改進將有助於提高感測器所測得的揮棒速度 (Lyu & Smith, 2018)。

目前棒尾慣性感測器在驗證揮棒時間與揮棒角度的研究中，僅有幾篇研究。Lyu 與 Smith 的研究中提出，市售的慣性感測器與高速攝影機捕捉系統相比，發現了有限的一致性；而在揮棒時間的部分表現出了良好的一致性，差異僅為 0.015 秒。另一篇研究指出，市售的慣性感測器 Mizuno Swing Tracer、Blast Baseball、Garmin Swing Coach、Diamond Kinetics 在揮棒角度的相關係數較低，且均低於 0.8

(Morishita & Jinji, 2022)。在 Punchihewa 等人開發的慣性感測器檢測揮棒角度的研究中發現，揮棒角度與黃金標準誤差值為 0.63 ± 0.34 m/s，組內相關係數 ICC 為 0.920，表示研究所開發的慣性感測器能夠準確測量手部速度。

第二節 揮棒運動學參數對打擊表現之影響

在棒球比賽中，打擊者的主要目標是提高打擊率與增加全壘打的數量。為達到這些目標，打者在使用木棒時需要準確的用球棒擊中球，並在擊中球時增加揮棒速度是非常重要的 (Horiuchi & Sakurai, 2016)。先前研究發現，揮棒速度也與擊球初速快慢相關，而在揮擊打擊座上標準重量的球時，球棒在擊中球時會處於最大速度，接著球棒會開始進行減速 (Tabuchi et al., 2007)。棒球打者需要在不到半秒的時間內開始揮棒 (Williams & Underwood, 1986)。增加揮棒速度可以使打者決策時間增加、揮棒時間減少與擊球初速的增加 (Szymanski et al., 2009)。當打者有更長的決策時間時，可以在擊中球前等待更長的時間，並產生更準確的擊球，藉此增加擊球後的飛行速度，同時增加球飛行的距離。因此測量揮擊時的揮棒速度是對棒球打擊表現評估的重要因素。

揮棒角度也會影響打擊表現，當打者擊中球時，揮棒角度尤為重要。可以使打者更好的擊中球。進而增加在擊中球的可能性 (Williams et al., 2020)。先前的研究指出，球棒在揮棒角度約 35° 時球飛行的距離最遠 (Adair & Chew, 1990)。在不考慮是否擊出長打的情況下， $10 - 15^\circ$ 的揮棒角度最容易形成安打，作者推論這個揮棒角度下擊出的球，可以在較短的時間內飛向棒球場不同的方向與距離 (Kato & Yanai, 2022)。

第三節 慣性感測器應用於不同揮擊運動

如今，在監測各種運動有幾種不同的方法可以使用。穿戴式感測器由於重量輕且通常比其他方法便宜而受到歡迎。它可以固定在運動員的身體上，或者固定在器材之中，進行數據監測 (Kos et al., 2019)。穿戴式感測器已在多種運動中應用，例如，用於監測游泳、拳擊、高爾夫、足球、網球、籃球、棒球等運動中運動員的表現，收取加速度、角速度運動學參數。感測器小型化與低功耗無線藍芽技術可以嵌入或放置在鞋子、戴在手腕上或整合到運動器材中 (Jadischke et al., 2013)。在棒球與壘球中，揮棒感測器可用於監測不同的揮棒參數。可以監控有關速度和擊球點位置的資訊 (Lightman, 2016)。

目前追蹤高爾夫球選手揮桿的方法是使用高速攝影系統進行追蹤。但這些追蹤系統可能非常昂貴，不方便攜帶，而且在明亮陽光下戶外使用效果不佳。因此，更理想的方式是使用慣性感測器，成本較為低廉，足夠小巧以固定在高爾夫球桿上 (Seaman & McPhee, 2012)。高爾夫的主要目標之一是盡可能將球擊打的更遠且準確，至少在一場高爾夫比賽中的多次揮桿中盡可能達成，為了實現最大飛行距離，揮桿速度是高爾夫中影響球的軌跡的幾個關鍵因素之一。揮桿或對擊球準確性的微小變化都可能極大的改變球的軌跡 (Lückemann et al., 2018)。

先前對高爾夫揮桿的生物力學研究主要是在實驗室中進行的，使用動力學測量、影像分析或其他運動追蹤系統，如電子量角器 (Hume et al., 2005 ; Nam et al., 2013)。然而，這些研究的測量結果是否能轉移到實際場地仍然是有疑慮的。可穿戴的慣性感測器系統提供了在高爾

夫球場上直接測量揮桿參數 (Nam et al., 2013)，並且基於這些數據已經開發了生物力學模型 (Ghasemzadeh et al., 2009)。使用慣性感測器進行揮桿分析的一個主要問題是必須開發演算法，這些算法根據球桿桿頭本身上收取的加速度計與陀螺儀數據 (例如，固定於球桿、握把或高爾夫球球員手背等位置) 計算關鍵變量 (例如，球桿桿頭速度、球桿路徑)。由於感測器相對於球桿的位移，由球桿的彎曲和轉動引起，以及手套、手部和球桿之間的相互作用可能會極大的影響這些算法的有效性。因此，慣性感測器系統在揮桿分析中的有效性一直是先前研究的主題 (Lückemann et al., 2018)。

位於手背與手臂上自行開發的慣性感測器已用於區分高爾夫業餘和職業選手的揮桿，並計算隨時間變化的手腕角度 (Chun et al., 2014; Lai et al., 2011)。另外，也有研究使用頭部、左手腕和骨盆的慣性感測器數據開發了人工智慧 (AI) 演算法來識別高爾夫揮桿中四個關鍵動作的時間安排 (Kim & Park, 2020)。在追蹤高爾夫球桿運動中開發了一款安裝在推桿握把內的輕量 (25 克) 的無線慣性感測器。利用慣性感測器數據的運動學變換，計算球桿桿頭隨時間變化的三維姿態 (誤差在 3 毫米與 0.5 度以內)，以及球桿桿頭速度和與球撞擊位置 (King et al., 2008)。

在網球擊球過程中身體各肢段的角速度很高，需要以足夠的採樣頻率進行數據收取，以免丟失技術動作的重要細節。傳統的攝影機以 30 到 60 Hz 的頻率進行影像錄製，但幾乎無法捕捉球拍與球碰撞的精確瞬間，因為擊球過程中球拍的線性速度超過 30 m/s，而在網球發球時手臂內旋與手腕屈曲動作的角速度約為 2000 deg/s。為了能夠更加真實的獲取網球選手的動作模式，在實驗室內會使用動作捕捉系

統，透過其高精準度與高採樣頻率來收取數據並當作黃金標準，但會受到場地、照明等因素所影響，且必須使用大量的反光標記，這可能會對運動員帶來不適合動作限制。因此，有必要使用其他技術 (Gordon & Dapena, 2006 ; Verheul et al., 2020)。而先前研究使用慣性感測器的陀螺儀 (Zepp Tennis) 與動作捕捉系統進行高速擊球時角速度的準確度驗證，發現慣性感測器的陀螺儀與動作捕捉系統有著非常顯著線性關係與高度一致性 ($r > 0.8$)，誤差範圍 (0.47 deg/s) 也較低，結果表明慣性感測器的陀螺儀可以作為在實際場域中進行分析網球選手擊球動作的替代方案 (Delgado-García et al., 2021)。

目前，已有放置於球拍握把末端的慣性感測器用於收取網球在訓練時的擊球數量，並且能以 97 % 的準確率對正手、反手和上手擊球進行分類。在市售的網球擊球慣性感測器能夠固定於球拍尾端，可提供選手擊球類型、擊球數量、球速、揮拍速度、球的旋轉和擊球點等參數，通過三維空間追蹤球拍的運動，並根據震動特徵分別確定球拍的力量和擊球點，也有在球拍握把中將慣性感測器與壓電感測器進行整合用於擊球偵測。這樣對於選手監測有著實用性的功能 (Myers et al., 2019)。

第參章 研究方法

第一節 研究對象

本研究將招募 20 位大專棒球聯賽公開一級組球員 (表一) 與 20 位大專棒球聯賽一般組選手 (表二)，打擊習慣皆為右打者。參與本次實驗受試者在進行本次實驗前六個月皆無會影響正常訓練與比賽之骨骼、肌肉、神經、韌帶、肌腱與心血管方面的運動傷害疾病。在實驗前均給予受試者詳細說明完整實驗流程及過程，並簽署受試者同意書，以確定受試者年齡、身高、體重、打擊習慣、球齡、傷病史及健康情形。

表一、大專棒球聯賽公開一級組球員基本資料

| N = 20 | 年齡(years) | 身高(cm) | 體重(kg) |
|-----------|-----------|-------------|------------|
| 平均值 ± 標準差 | 23 ± 3 | 180.1 ± 5.8 | 86.9 ± 5.3 |

表二、大專棒球聯賽一般組球員基本資料

| N = 20 | 年齡(years) | 身高(cm) | 體重(kg) |
|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 平均值 ± 標準差 | 21 ± 2 | 178.6 ± 6.1 | 79.4 ± 10.1 |

第二節 實驗儀器與設備

一、Vicon motion capture system (Oxford Metrics Limited, UK)

本實驗中揮棒速度、揮棒時間、球棒進攻角度與垂直角度之黃金標準是以動作捕捉與分析系統與高速攝影機來進行拍攝，追蹤固定於受試者手部、球棒、打擊座的紅外線反光球，Vicon 動作分析系統與紅外線攝影機，採樣頻率為 250 Hz。

二、Vicon Nexus 2.13 (Oxford Metrics Limited, UK)

軟件用於數據紀錄，數據後處理，包括反光球的運動學標記、重建和數據分析。運動學數據使用四階巴特沃斯低通濾波 10 Hz 進行處理 (Williams et al., 2020)。

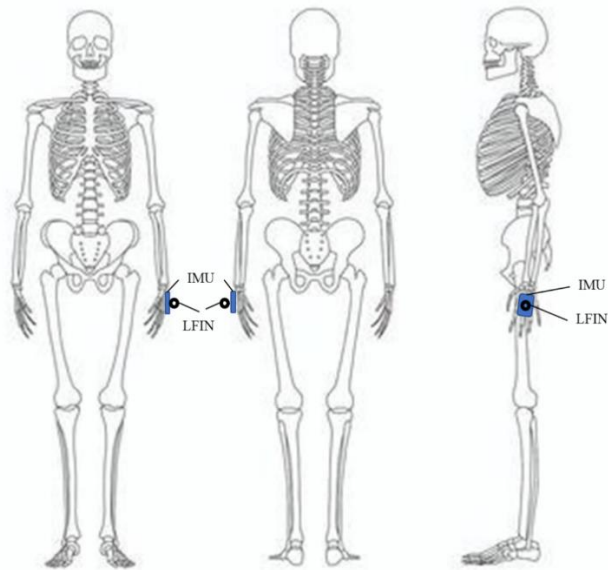
三、Inertial Measurement Unit (Vicon Blue Trident, UK)

本實驗中打擊者之揮棒速度、揮棒時間、球棒進攻角度與垂直角度是以慣性感測器 (測量範圍：加速規 $\pm 2000 \text{ m/s}^2$ 、陀螺儀 $\pm 2000 \text{ deg/s}$ 、磁力儀 $\pm 4900 \text{ uT}$)，取樣頻率為 1600 Hz 進行測量；並同時以 Capture.U 進行運動學參數測量，再將測量所得到的數據匯出至 Excel 進行資料處理。

四、慣性感測器與反光球黏貼位置

慣性感測器:固定於右打者前導手 (左手) 打擊手套手背上第二掌骨處，並在上方黏貼 LFIN 反光球 (圖 4)。

圖 4、慣性感測器與反光球黏貼位置



六、Joinsun 職業級楓木球棒

球棒長度 860 毫米，重量 895 公克，紅外線反光球黏貼於棒頭前側、棒尾與球棒甜蜜點處 (Lyu & Smith, 2018)，距離棒尾 152 毫米處 (圖 5)。

圖 5、球棒與黏貼紅外線反光球位置



七、固定式打擊座

本實驗使用固定式打擊座（圖 6），紅外線反光球黏貼於打擊座上方，確認打擊位置設置為打擊者於準備期時膝蓋位置到手肘位置中間距離與擊中球瞬間（Williams et al., 2020）。

圖 6、固定式打擊座與黏貼反光球位置



五、Visual 3D (Visual3D Motion Capture Analysis, 2023 C-Motion©, Inc.)

將 Vicon Nexus 反光球運動學標記 C3D 檔匯入至 Visual 3D 內並建立球棒模型後，輸出球棒甜蜜點最大揮棒速度、球棒角度與揮棒時間等數據。

八、MATLAB (The MathWorks Inc. Natick, MA, USA)

MATLAB 為程式設計軟體；藉由此軟體自行編寫計算慣性感測器之揮棒速度、揮棒時間與球棒進攻、垂直、水平角度參數之程式。

第三節 實驗流程

一、說明實驗過程和注意事項

實驗者向受試者說明實驗目的與方法，使受試者能夠清楚了解整個實驗的過程及注意事項。

二、同意書及基本資料填寫

受試者在接受實驗前，需簽署受試者同意書，表示了解實驗內容，並願意全程參與並配合實驗的指示，盡力完成本實驗所有過程。且須填寫基本資料調查表，調查身高、體重、打擊習慣、年齡、球齡，以及是否在六個月內曾發生會影響正常訓練、比賽之運動傷害，以避免影響實驗數據的準確性。

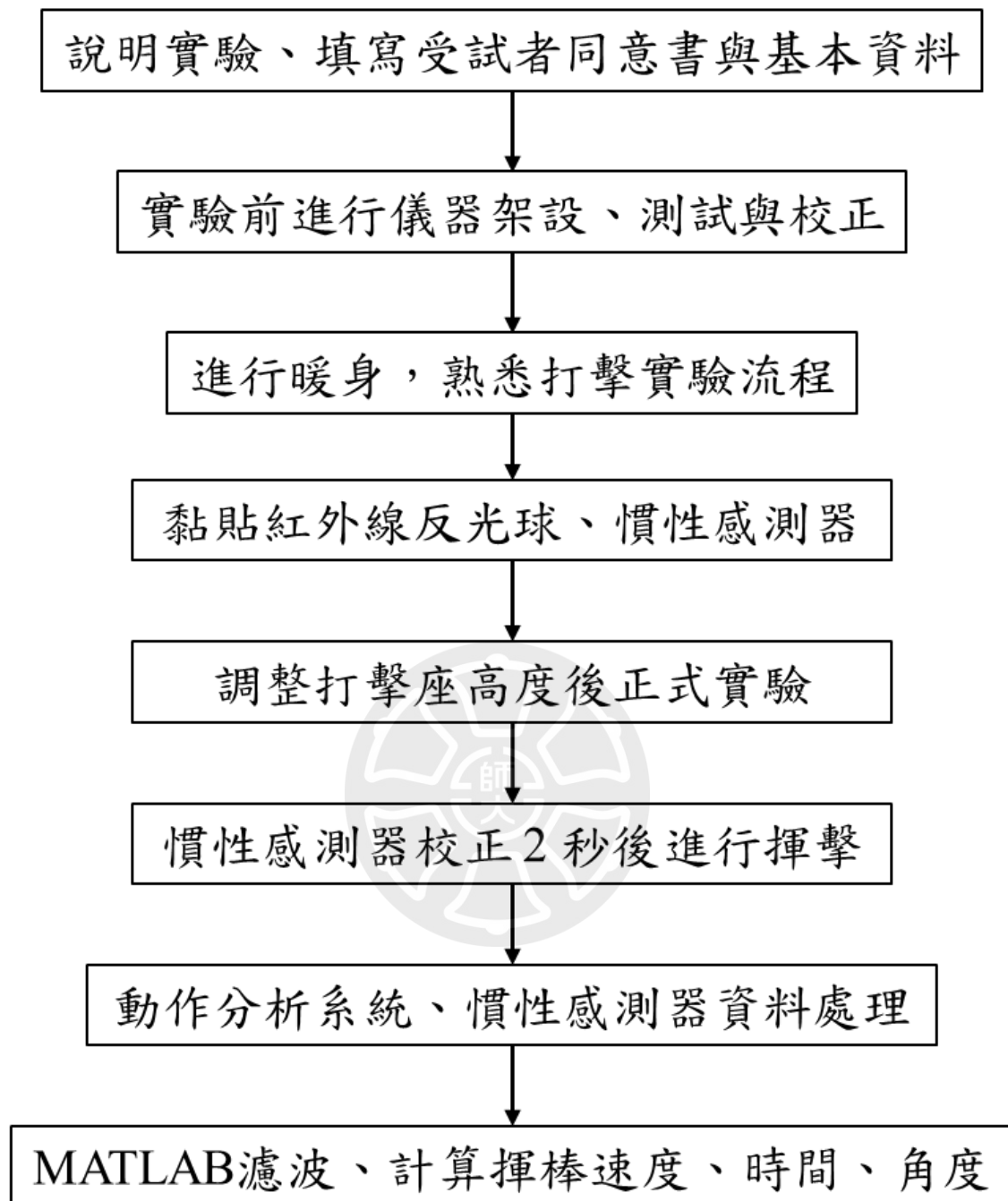
三、實驗儀器校正

調整高速攝影機的角度、光圈和焦距，並將拍攝頻率調整為 250Hz，且高速攝影機能清楚拍攝到整個打擊過程中，受試者手部、球棒與打擊座反光球位置。之後利用校正架用來定義實驗室坐標系與運動範圍內的 x、y、z 三軸方向，進行靜態校正與運動範圍內的動態校正。同步確認慣性感測器電量與記憶體充足，並確認藍芽連接訊號正常。

四、受試前熱身

由於場地因素，本實驗請選手事先於室外進行靜態與動態熱身，並進行擊打打擊座練習，帶熱身完畢後，在進入實驗室，並換穿緊身上衣與短褲，以及穿戴打擊手套，以利反光球與慣性感測器黏貼，避免妨礙高速攝影機拍攝的情形（如遮住反光點等）發生（圖 7）。

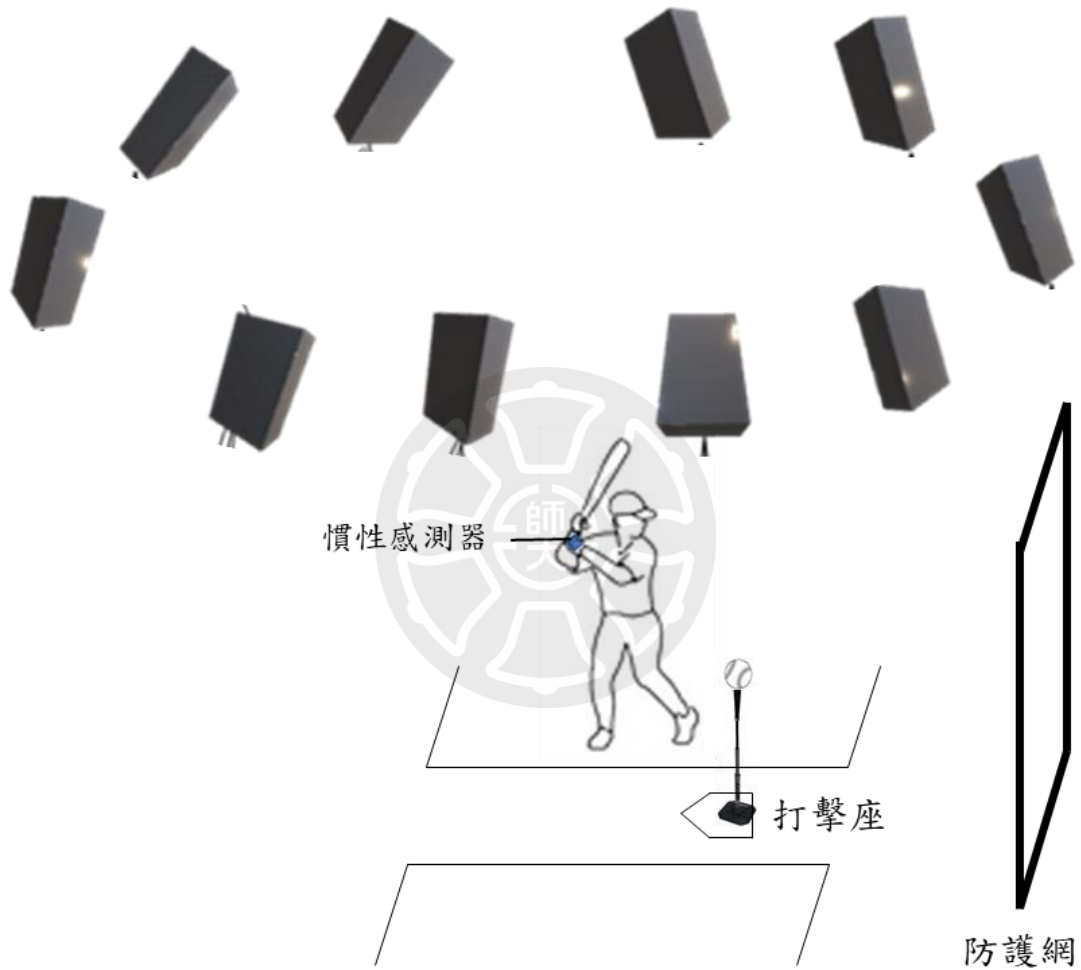
圖 7、實驗流程圖



五、動作捕捉系統運動學數據收取

本研究在室內實驗室進行打擊，共有 10 台紅外線攝影機捕捉打者在揮棒時的運動學參數。受試者皆為右打者，並設置固定式打擊座。設置完成後開始進行實驗（圖 8）。

圖 8、實驗環境



六、慣性感測器運動學數據收取

將慣性感測器黏貼於右打者前導手穿戴的打擊手套之手背處(圖 9)，並使用彈性繃帶進一步進行固定。慣性感測器與動作捕捉系統在開始實驗時進行同步收取，每次揮棒前將球棒與手背 IMU 局部座標系與全局坐標系進行校準，保持靜止不動 2 秒，而後開始進行揮擊。

圖 9、慣性感測器固定位置



第四節 資料分析

一、受試者基本資料

本研究利用基本資料調查表所收集到的受試者身高、體重、打擊習慣、球齡、年齡，分別輸入 Excel 軟體後，計算出平均數與標準差，進行分析與探討。

二、空間座標系統

將 X 軸方向定義為水平面上向前方，Z 軸方向定義為垂直向上，而 Y 軸方向則為右手法則中，從 Z 軸方向指向 X 軸方向的垂直正交交叉方向。

三、動作捕捉系統揮棒運動學參數

1. 揮棒開始定義為球棒和手向前移動以擊球的第一幀。擊中球定義為球棒接觸打擊座後變形的第一幀，並可以獲得揮棒時間。
2. 最大揮棒速度根據先前文獻 (Williams et al., 2019) 中透過球棒甜蜜點上反光球之計算方法所獲得。
3. 擊中球時的球棒角度定義為當球棒擊中球時打擊座發生變形的第一幀，並做標記，以便在資料處理時確定球棒的進攻角度與垂直角度 (Williams et al., 2019)。

三、慣性感測器揮棒運動學參數

揮棒參數演算方法參考先前研究 (King et al., 2012 ; Lyu & Smith, 2018)。

(一)座標系統和旋轉矩陣

在分析揮棒動作的力學特性時，應考慮參考感測器的局部座標系統，感測器局部座標系統以三軸 (x、y、z) 表示，其中心為「p」，即感應器的位置。此外，(x、y、z) 沿著加速度計和陀螺儀角速度的三個軸線。其中 y 軸也與球棒的中心線平行，而另外 x 軸與 z 軸的平面則與球棒的橫切面對應。

「全局座標系統」由三個軸向 x、y、z 作為一個參考座標系統。位於打擊座一角，其中 x、z 平面定義了水平平面，而 z 軸垂直指向上方。球棒的甜蜜點位置位於球棒的中心線上，距離球棒棒頭 15 公分處。

(二)旋轉矩陣

旋轉矩陣是指慣性感測器相對於全局座標的方向，為一個 3×3 的矩陣，稱為 R (Diebel, 2006)。

$$\det R = 1 \tag{1a}$$

$$R^{-1} = R^T. \tag{1b}$$

根據參考文獻的旋轉矩陣元素為以下演算法。

$$\begin{aligned} R &= [r_1 \quad r_2 \quad r_3] \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

(三)座標轉換

旋轉矩陣是一個用來執行剛體旋轉的矩陣。將旋轉矩陣與一個向量在全局座標系統中進行矩陣乘法，將得到相對於感測器局部座標系統相同的向量。

假設 A 是在全局座標系統中的向量，而 a 是在感測器局部座標系統中相同的向量為以下關係：

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}\mathbf{A} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}^T \mathbf{a} \quad (4)$$

(四)測量揮棒速度的主要步驟

揮棒速度將透過三個主要步驟進行：

1. 計算旋轉矩陣 $\mathbf{R}(t)$ 。
2. 計算在全局座標系統中球棒棒頭的加速度，以及慣性感測器的速度。
3. 計算球棒甜蜜點的速度。

(五)計算旋轉矩陣 \mathbf{R} 的兩種方法

使用加速度與角速度的原始數據，可以使用歐拉角和四元數兩種方法來計算旋轉矩陣。

這兩種方法中，歐拉角簡單直觀，易於分析與控制，但環架鎖定 (Gimbal lock) 使得歐拉角的應用受到了限制。這種現象，發生在 pitch angle 約為 $\pm 90^\circ$ 的時候，此時歐拉角無法正確測量方向。

另一方面，四元數提供了另一種不受萬向鎖定的測量技術。但是，四元數比歐拉角較不直觀，而且數學計算可能較為複雜 (Lyu & Smith, 2018)。

在本研究中，選擇了兩種方法之一來計算揮棒參數，並將結果與紅外線動作捕捉系統的結果進行比較。而歐拉角方法在程式編寫上更加直觀與簡單，研究中只有在旋轉過程中的 pitch angle 永遠不會達到 $\pm 90^\circ$ 可使用這種方法。

(六)歐拉角與旋轉矩陣

慣性感測器的方向可以由繞初始位置旋轉的歐拉角 (roll, pitch, yaw) 來定義。

y 軸與球棒對齊；z 軸向上，使其在球棒平放於地板上時與重力對齊；x 軸與 y 軸和 z 軸都是垂直對齊，三軸旋轉依右手定律所定義。

Roll、Pitch 與 Yaw 的旋轉矩陣可以通過感測器局部座標系統上分別繞 x 軸、y 軸和 z 軸旋轉之(ϕ) roll、(θ) pitch 和 (ψ) yaw (Pedley, 2013)。

$$R_X(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 1 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_Y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_Z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

(8) 三個旋轉矩陣有六種可能的排列順序。本研究採用 (X、Y、Z) 來計算複合旋轉矩陣 R。

$$R_{XZY} = R_X(\phi)R_Y(\theta)R_Z(\psi) \quad (8)$$

(七) 隨時間變化的歐拉角

隨時間變化的歐拉角與感測器所測得的陀螺儀角速度相關。本研究定義 ω_x 為感測器座標系統 x 軸陀螺儀數據， ω_y 為感測器座標系統 y 軸陀螺儀數據， ω_z 為感測器座標系統 z 軸數據。並進行歐拉角速率計算 (Cooper et al., 2009)。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_x + \omega_y \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_z \cos(\phi) \tan(\theta) \\ \omega_y \cos(\phi) - \omega_z \sin(\phi) \\ \omega_x \sin(\phi) / \cos(\theta) + \omega_z \cos(\phi) / \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (9)$$

通過此積分方程式，計算隨時間變化的旋轉矩陣，在下一步中，將討論給定歐拉角的初始條件。

(八) 旋轉矩陣 R(t) 的初始條件

在時間 $t=0$ 時，球棒處於穩定狀態，並且球棒最初受到地心沿著 z 軸向下的重力加速度。

$$\frac{1}{|a|} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = R_{XYZ} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_X(\phi)R_Y(\theta)R_Z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{10}$$

此方程式僅取決於 roll (ϕ) 與 pitch (θ)。yaw (ψ) 沒有任何依賴性，因為偏航角圍繞著 z 軸。最初時會與地心引力一同指向下方。根據先前研究，將初始條件 yaw (ψ) 設定為 0。接著解方程式後得到初始的 roll 與 pitch。

$$\frac{a}{|a|} = \frac{1}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\tan \phi = \frac{a_x}{a_z} \tag{12}$$

$$\tan \theta = \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \tag{13}$$

(九) 四元數和旋轉矩陣

四元數是一種四元素向量，可用於編碼三維 (3D) 坐標系中的任何旋轉。四元數由四個實數 e_1, e_2, e_3 和 e_4 組成，被稱為歐拉參數 (Tygiel, 2001)。在本研究中，將忽略有關四元數的理論細節，僅提供其用於表示感測器方向所需的姿態信息。

假設向量 e 被定義為單位向量四元數，表示從全局座標系到感

測器坐標系的旋轉： $\mathbf{e} = (e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4)^T$ 。

依賴四元數元素從全局座標系到感測器坐標系的旋轉矩陣可以定義為 (Goldstein, 1981 ; Haug, 1992) :

$$R(\mathbf{e}) = \begin{pmatrix} e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 + e_4^2 & 2e_1e_2 + 2e_3e_4 & 2e_1e_3 - 2e_2e_4 \\ 2e_2e_1 - 2e_3e_4 & -e_1^2 + e_2^2 - e_3^2 + e_4^2 & 2e_2e_3 + 2e_1e_4 \\ 2e_2e_4 + 2e_1e_3 & 2e_2e_3 - 2e_1e_4 & e_3^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_4^2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

(十) 計算與時間相關的歐拉參數

在 (15) 方程式中， e_1, e_2, e_3, e_4 四個與時間相關的參數與陀螺儀的角速度 ω_x, ω_y 和 ω_z 有關 (Haug, 1992)。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_4 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & e_4 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & e_4 \\ -e_1 & -e_2 & -e_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (15)$$

四元數參數也遵循以下約束條件：

$$e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 = 1 \quad (16)$$

因此，通過對上述方程式進行積分，滿足以下方程式，可以計算時間相關的旋轉矩陣 R 。在下一步中將討論給定四元數參數的初始條件。

(十一) 旋轉矩陣 $R(t)$ 的初始條件

與歐拉角方法相似， (ϕ) roll、 (θ) pitch 和 (ψ) yaw 應該被定義為初始條件：

$$\tan \phi = \frac{a_y}{a_z} \quad (17)$$

$$\tan \theta = \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad (18)$$

為方便起見， (ψ) yaw 可設置為 0。

時間 $t=0$ 的旋轉矩陣可以用兩個歐拉角表示：

$$RR(0) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (19)$$

基於方程式 (14) 和方程式 (19)，同時使用方程式 (17) 和方程式 (18)，可以推斷出歐拉角的初始條件。

$$\begin{pmatrix} e_1(0) \\ e_2(0) \\ e_3(0) \\ e_4(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \phi(1 + \cos \theta)/4e_4 0 \\ \sin \theta(1 + \cos \phi)/4e_4 0 \\ -\sin \theta \sin \phi/e_4(0) \\ \sqrt{1 + \cos \theta + \cos \phi + \cos \theta \cos \phi/2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

(十二) 揮棒速度的計算

計算 $\vec{a}_p(t)$ 與 $\vec{v}_p(t)$ ，根據每個採樣時刻的 $R(t)$ ，慣性感測器加速度的分量可以在全局坐標系中表示。

$$\vec{a}_p(t) + \hat{g} = \begin{pmatrix} a_{px} \\ a_{py} \\ a_{pz} \end{pmatrix} = R(t) \begin{pmatrix} a_{pX} \\ a_{pY} \\ a_{pZ} + g \end{pmatrix} \quad (21)$$

在方程式 (21) 中， a_{px}, a_{py}, a_{pz} 是在慣性感測器座標中的加速度分量，而 a_{pX}, a_{pY}, a_{pZ} 是在全局座標系中表示的加速度分量。同時，應該扣除重力加速度。根據方程式 (4) 中對 $R(t)$ 的定義。

$$\begin{pmatrix} a_{pX} \\ a_{pY} \\ a_{pZ} \end{pmatrix} = R^T(t) \begin{pmatrix} a_{px}(t) \\ a_{py}(t) \\ a_{pz}(t) \end{pmatrix} - g \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

通過對方程式 (22) 進行積分，得到了點 “p” 的速度，其分量與全局座標系一致。

$$\vec{v}_p(t) = \int_0^t \vec{a}_p(\eta) d\eta \quad (23)$$

這裡使用了初始條件 $\vec{v}_p(0) = 0$ 。

(十三) 計算球棒甜蜜點揮棒速度 $\vec{v}_s(t)$

球棒甜蜜點速度，即在標註的點 “s” 的速度，是揮棒的重要參數。它可從打擊手套手背慣性感測器速度 \vec{v}_p 和球棒的角速度推導出來。在這之前，必須建立從點 “s” 到 “p” 的相對位置。

$$\vec{r}_{s/p} = \begin{pmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{pmatrix} = R^T(t) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

其中， l 是從打擊手套手背慣性感測器 “p” 到球棒甜蜜點 “s” 沿著球棒中心線的距離，球棒甜蜜點速度為

$$\vec{v}_s(t) = \vec{v}_p(t) + [\vec{\omega}(t) \times \vec{r}_{s/p}] \quad (25)$$

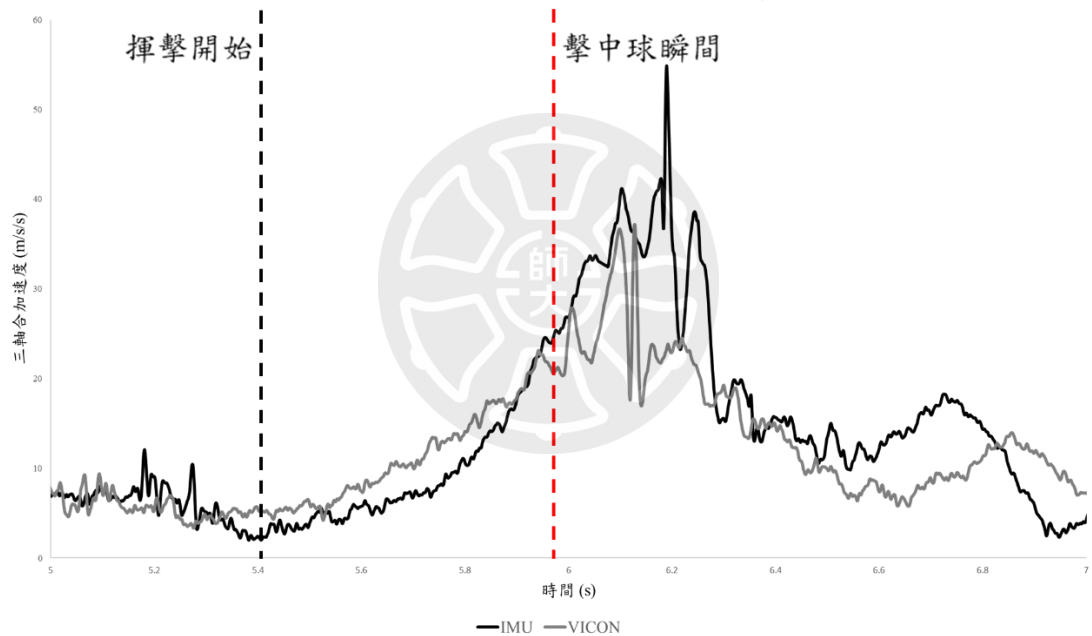
此方程式中所有都在全局坐標系中，因此得出結果。

$$\vec{v}_s(t) = \begin{pmatrix} v_{sX}(t) \\ v_{sY}(t) \\ v_{sZ}(t) \end{pmatrix} \quad (26)$$

四、三軸合加速度 (Row Data)

將黏貼於打擊者手背處之慣性感測器所測得的三軸加速度值平方，取三軸加速度總和後，開根號計算出合加速度。(圖 10)。

圖 10、IMU 與 VICON 三軸合加速度資料分析示意圖

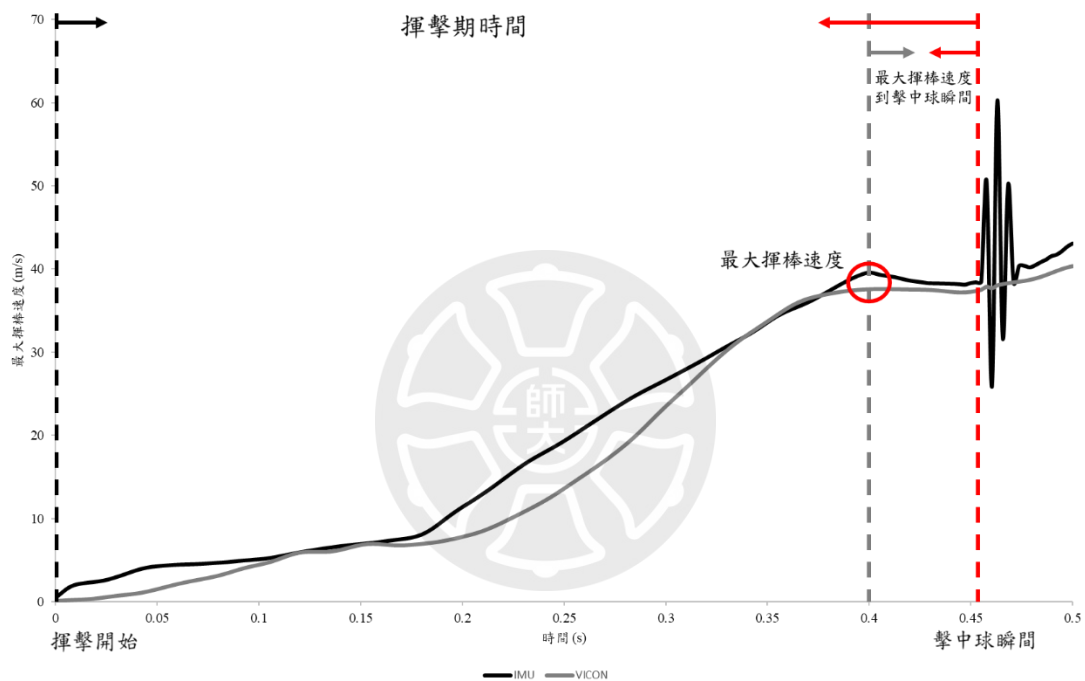


註：黑色實線為 IMU 三軸合加速度；灰色實線為 VICON 三軸合加速度；黑色虛線為揮擊開始；紅色虛線為擊中球瞬間。

五、揮棒速度、揮擊期時間與最大揮棒速度到擊球時間差

透過慣性感測器所獲取的運動學參數透過 MATLAB 之開發演算法計算出最大揮棒速度。揮擊期時間為擊中球瞬間與揮擊開始時間相減計算後所獲得。最大揮棒速度到擊球時間差為擊中球瞬間與最大揮棒速度出現時間相減所獲得 (圖 11)。

圖 11、IMU 與 VICON 揮棒速度、揮棒參數資料分析示意圖



註：黑色實線為 IMU 三軸合加速度；灰色實線為 VICON 三軸合加速度；黑色虛線為揮擊開始；灰色虛線為最大揮棒速度。

六、擊中球瞬間球棒進攻、垂直、水平角度

球棒的進攻、垂直、水平角度透過慣性感測器所獲取的角速度進行演算法計算後所獲得，設定初始時間點，並計算初始進攻、垂直、水平角度，使用前一時間點的角度和當前時間點的角速度，迭代計算每個時間點的進攻、垂直、水平角度。

第五節 統計方法

使用 SPSS 25.0 版軟體進行分析。使用皮爾森積差相關，比較動作捕捉系統與慣性感測器之間的揮棒運動學之相關性，作為效度驗證；當相關係數 $< \pm 0.5$ 代表低度相關，在 ± 0.5 到 0.7 代表中度相關，而 $> \pm 0.7$ 代表高度相關；以 Bland-Altman 圖顯示，儀器誤差隨時間、速度散佈之情形；使用組內相關係數 (ICC) 確認慣性感測器與動作捕捉系統之間的一致性與可靠性，設顯著水準設為 $\alpha = .05$ ；接著使用相依樣本 T 檢定，確認兩個儀器之間，揮棒參數是否有顯著差異，設顯著水準設為 $\alpha = .05$ 。設定分析目標，慣性感測器之揮棒速度和揮棒角度與動作捕捉系統的誤差值不超過 ± 1.5 m/s 和 $\pm 3^\circ$ (Morishita & Jinji, 2022)。

第肆章 結果

第一節 公開一級組打擊者揮棒參數之差異

公開一級組在慣性感測器與動作捕捉系統之間在測量揮棒參數皆顯示出顯著正相關與一致性 (表三)。兩種儀器之間的三軸合加速度 (ICC = .846 ; Pearson r = .814)、最大揮棒速度 (ICC = .836 ; Pearson r = .807)、揮擊期時間 (ICC =.892 ; Pearson r = .853) 與最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ICC =.814 ; Pearson r = .865) 組內相關係數呈現較高的一致性。而在擊中球瞬間的球棒進攻角度 (ICC = .648 ; Pearson r = .651)、垂直角度 (ICC =.572 ; Pearson r =.638) 與水平角度 (ICC =.607 ; Pearson r =.617) 呈現中度的一致性且存在系統性偏差 (球棒進攻角度: Bias = -3.5° , Bias, % = +25%, Bias SD = 4.4° ; 垂直角度: Bias = $+7.2^{\circ}$, Bias, % = +35%, Bias SD = 10.1° ; 水平角度: Bias = $+4.5^{\circ}$, Bias, % = +45%, Bias SD = 5.4°)。兩種儀器之間在所有揮棒運動學參數皆具有顯著差異 ($p < .001$)。與分析目標進行評估, 公開一級組打者最大揮棒速度的平均誤差值為 (Bias = $+1.2$ m/s)、系統性偏差相對較小 (Bias, % = +4%、Bias, SD = 1.1)。

研究結果顯示, 公開一級組打擊者揮棒速度的平均誤差值 (Bias = 1.4 m/s) 符合先前 Morishita 與 Jinji (2022) 針對慣性感測器測量揮棒速度及球棒角度準確性所提出的建議目標 ± 1.5 m/s; 而球棒進攻角度、垂直角度與水平角度的誤差值均超出了該研究建議的 $\pm 3^{\circ}$ 目標範圍 (球棒進攻角度: -3.5° 、球棒垂直角度: $+7.2^{\circ}$ 、球棒水平角度: $+4.5^{\circ}$)。

表三、公開一級組打擊者兩種儀器揮棒參數

| 公開一級組 | IMU | VICON | ICC | Pearson <i>r</i> |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|------------------|
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | 671.8 ± 39.9 | 661.9 ± 28.6 | .846** | .814** |
| 最大揮棒速度 (m/s) | 28.8 ± 1.9 | 27.6 ± 2.2 | .836** | .807** |
| 揮擊期時間 (s) | 0.39 ± 0.05 | 0.37 ± 0.03 | .892** | .853** |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | 74.9 ± 4.1 | 73.5 ± 3.8 | .814** | .865** |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | 2.9 ± 0.6 | 6.4 ± 1.9 | .648* | .651* |
| 球棒垂直角度 (deg) | 14.5 ± 5.9 | 21.7 ± 3.8 | .572* | .638* |
| 球棒水平角度 (deg) | 6.6 ± 1.8 | 2.1 ± 0.5 | .607* | .617* |

| 公開一級組 | T-test <i>p</i> | Bland-Altman | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|---------|----------|
| | | Bias | Bias, % | Bias, SD |
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | < .001** | +9.9 | +5 | 29.2 |
| 最大揮棒速度 (m/s) | < .001** | +1.2 | +4 | 1.1 |
| 揮擊期時間 (s) | < .001** | +0.02 | +1 | 0.1 |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | < .001** | +1.4 | +1 | 0.9 |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | < .001** | -3.5 | +25 | 4.4 |
| 球棒垂直角度 (deg) | < .001** | +7.2 | +35 | 10.1 |
| 球棒水平角度 (deg) | < .001** | +4.5 | +45 | 5.4 |

第二節 一般組打擊者揮棒參數之差異

一般組在慣性感測器與動作捕捉系統之間在測量揮棒參數皆顯示出顯著正相關與一致性 (表四)。兩種儀器之間的三軸合加速度 (ICC = .832 ; Pearson *r* = .885)、最大揮棒速度 (ICC = .816 ; Pearson *r* =.804)、揮擊期時間 (ICC =.857 ; Pearson *r* =.901) 與最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ICC =.915 ; Pearson *r* =.898) 組內相關係數呈現較高的一致性。而在擊中球瞬間的球棒進攻角度 (ICC = .663 ; Pearson *r* =.621)、垂直角度 (ICC =.629 ; Pearson *r* =.614) 與水平角度 (ICC =.664 ; Pearson *r* =.601) 呈現中度的一致性且存在系統性偏差 (球棒進攻角度: Bias = +3.7°, Bias, % = +26%, Bias SD = 4.1° ; 垂直角度: Bias = +7.2°, Bias, % = +31%, Bias SD = 8.2° ; 水

平角度: Bias = +4.5°, Bias, % = +26%, Bias SD = 6.3°)。兩種儀器之間在所有揮棒運動學參數皆具有顯著差異 ($p < .001$)。

研究結果顯示，一般組打擊者揮棒速度的平均誤差值 (Bias = +1.8 m/s) 與球棒進攻、垂直角度與水平角度誤差值皆超出先前 Morishita 與 Jinji (2022) 研究中所設定的 $\pm 3^\circ$ 準確性建議的目標範圍 (球棒進攻角度: + 3.7°、球棒垂直角度: + 7.2°、球棒水平角度: + 4.5°)。

表四、一般組打擊者兩種儀器揮棒參數

| 一般組 | IMU | VICON | ICC | Pearson <i>r</i> |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|------------------|
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | 504.5 ± 45.8 | 492.3 ± 32.9 | .832** | .885** |
| 最大揮棒速度 (m/s) | 24.1 ± 7.1 | 22.6 ± 2.5 | .816** | .804** |
| 揮擊期時間 (s) | 0.64 ± 0.08 | 0.61 ± 0.06 | .857** | .901** |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | 46.1 ± 8.9 | 49.6 ± 7.3 | .915** | .898** |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | 4.9 ± 0.5 | 1.5 ± 0.2 | .663* | .621* |
| 球棒垂直角度 (deg) | 4.5 ± 1.9 | 9.8 ± 2.8 | .629* | .614* |
| 球棒水平角度 (deg) | 5.9 ± 1.6 | 2.2 ± 0.5 | .664* | .601* |

| 一般組 | T-test <i>p</i> | Bland-Altman | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|---------|----------|
| | | Bias | Bias, % | Bias, SD |
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | < .001** | + 8.3 | +4 | 25.5 |
| 最大揮棒速度 (m/s) | < .001** | + 1.8 | +6 | 1.3 |
| 揮擊期時間 (s) | < .001** | + 0.02 | +1 | 0.1 |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | < .001** | + 1.4 | +1 | 1.1 |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | < .001** | + 3.7 | + 26 | 4.1 |
| 球棒垂直角度 (deg) | < .001** | + 7.2 | + 31 | 8.2 |
| 球棒水平角度 (deg) | < .001** | + 4.5 | + 26 | 6.3 |

第三節 整體打擊者揮棒參數之結果

在將公開一級組與一般組做整體的慣性感測器與動作捕捉系統進行揮棒參數評估發現，皆顯示出顯著正相關與一致性 (表五)。兩種儀器之間的三軸合加速度 ($ICC = .894$; Pearson $r = .884$)、最大揮棒速度 ($ICC = .851$; Pearson $r = .824$)、揮擊期時間 ($ICC = .836$; Pearson $r = .894$) 與最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 ($ICC = .801$; Pearson $r = .896$) 組內相關係數呈現較高的一致性。而在擊中球瞬間的球棒進角度 ($ICC = .689$; Pearson $r = .598$)、垂直角度 ($ICC = .588$; Pearson $r = .632$) 與水平角度 ($ICC = .645$; Pearson $r = .623$) 呈現中度的一致性且存在系統性偏差 (球棒進攻角度: Bias = -3.0° , Bias, % = +19%, Bias SD = 3.9° ; 垂直角度: Bias = $+7.7^\circ$, Bias, % = +36%, Bias SD = 9.8° ; 水平角度: Bias = $+4.2^\circ$, Bias, % = +21%, Bias SD = 5.8°)。兩種儀器之間在所有揮棒運動學參數皆具有顯著差異 ($p < .001$)。與分析目標進行評估，公開一級組打者揮棒速度與球棒水平角度的平均誤差值為 (揮棒速度: Bias = $+1.4$ m/s; 球棒水平角度: Bias = -3.0 deg)、揮棒速度顯示出系統性偏差較小 (Bias, % = +4%、Bias, SD = 1.1)，球棒進攻角度顯示出系統性偏差相對較大 (Bias, % = +19%、Bias, SD = 3.9)。

研究結果顯示，公開一級與一般組整體打擊者揮棒速度的平均誤差值 (Bias = $+1.4$ m/s) 與球棒進攻角度誤差值 (Bias = -3.0°) 符合先前 Morishita 與 Jinji (2022) 研究中所設定的揮棒速度 ± 1.5 m/s 與擊中球瞬間球棒角度 $\pm 3^\circ$ 準確性建議的目標範圍。而球棒垂直角度與水平角度誤差值超出 $\pm 3^\circ$ 準確性之建議 (球棒垂直角度: -7.7° 、球棒水平角度: $+4.2^\circ$)。

表五、整體打擊者兩種儀器揮棒參數

| 整體 | IMU | VICON | ICC | Pearson <i>r</i> |
|----------------------------|---------------|---------------|--------|------------------|
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | 575.8 ± 100.1 | 555.9 ± 115.6 | .894** | .884** |
| 最大揮棒速度 (m/s) | 26.5 ± 9.3 | 25.1 ± 6.2 | .851** | .824** |
| 揮擊期時間 (s) | 0.49 ± 0.12 | 0.48 ± 0.17 | .836** | .894** |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | 57.7 ± 15.1 | 59.8 ± 12.5 | .801** | .896** |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | 5.7 ± 1.1 | 2.7 ± 1.3 | .689* | .598* |
| 球棒垂直角度 (deg) | 8.1 ± 3.8 | 15.8 ± 6.1 | .588* | .632* |
| 球棒水平角度 (deg) | 6.9 ± 1.8 | 2.7 ± 0.9 | .645* | .623* |

| 整體 | T-test <i>p</i> | Bland-Altman | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|---------|----------|
| | | Bias | Bias, % | Bias, SD |
| 揮擊期 | | | | |
| 三軸合加速度 (m/s ²) | < .001** | + 9.1 | + 4 | 21.3 |
| 最大揮棒速度 (m/s) | < .001** | + 1.4 | + 3 | 1.1 |
| 揮擊期時間 (s) | < .001** | + 0.01 | + 1 | 0.1 |
| 最大揮棒速度到擊球瞬間時間差 (ms) | < .001** | + 2.1 | + 1.5 | 0.8 |
| 擊中球瞬間 | | | | |
| 球棒進攻角度 (deg) | < .001** | - 3.0 | + 19 | 3.9 |
| 球棒垂直角度 (deg) | < .001** | + 7.7 | + 36 | 9.8 |
| 球棒水平角度 (deg) | < .001** | + 4.2 | + 21 | 5.8 |

第五章 討論

透過慣性感測器的運動學參數，可以計算出打者的揮棒速度 (Lyu & Smith, 2018 ; Morishita & Jinji, 2022)。因此，本研究有鑑於慣性感測器所獲得的運動學參數能夠計算揮棒速度，開發演算法已能獲取打擊者的揮棒參數。並使用動作捕捉系統來進行效度檢測，以及信度檢測。另外，將受試者分為精英組與一般組並再做整體整合觀察結果，進行鑑別度檢測。

第一節 慣性感測器揮擊期揮棒速度之討論

在不同擊球點的揮棒參數特徵的研究發現，根據擊球點的不同，揮棒速度的變化可達約 1.2 m/s (Morishita et al., 2019)，在不同市售揮棒慣性感測器驗證的研究中發現，在職業棒球打擊者中，觀察到揮棒速度有高達約 3 m/s 的誤差。如果慣性感測器能夠以 ± 1.5 m/s 或更小的準確度進行測量，則可以確定精英打擊者所使用的最大揮棒速度的差異。另外，也表明了不同的市售揮棒慣性感測器的測量範圍，不同的慣性感測器分為能夠測量 15 – 40 m/s 範圍內的揮棒速度與 10 – 35 m/s 範圍內的揮棒速度。在這些感測器中，所有的慣性感測器都與黃金標準動作捕捉系統具有中度和高度的相關性。這些市售的揮棒感測器都具有類似的揮棒速度範圍；因此，這些感測器可用於檢查不同層級的選手之間的速度差異 (Morishita & Jinji, 2022)。而本研究也對不同層級的選手進行揮棒參數的測量，並都為有一定棒球經驗之選手，一組為大專盃公開一級組的選手，一組為大專盃一般組選手，球齡皆超過 8 年。本研究在整體揮棒速度的範圍為 17 m/s – 30 m/s 之

間，並且都與動作捕捉系統有高度的相關性；因此，本研究所使用的慣性感測器通過演算法所計算的揮棒參數可以用於大專組不同層級的打擊者。

根據先前研究指出，要成為一位優秀的棒球打擊者的其中一個方法是增加球棒揮棒速度。增加球棒揮棒速度的直接好處是在揮擊期時增加決策時間、減少揮棒時間。棒球打擊者在面對不同類型的球種時，必須在極短的時間內做出決策。若投手投出 40.2 m/s (90 mph) 的直球，球將在 0.4167 秒內到達本壘，而 35.7 m/s (80 mph) 的變速球或慢速突破球則需 0.4688 秒，兩者僅相差 0.052 秒，這對打者的揮棒時機至關重要。在這短暫的時間內，擊球手需要同時判斷投球種類（直球、變速球、曲球）、投球速度及投球位置，並決定是否揮棒。美國職棒打者的決策時間約為 0.26 至 0.35 秒，揮擊期前等待更長時間再揮棒有助於提高擊球準確性與時機掌握，進而提升整體擊球表現 (Szymanski et al., 2009)。一旦打者決定揮棒，必須根據來球調整揮棒，而完成揮棒所需的時間稱為揮擊期時間。揮擊期時間與決策時間呈反比，即揮棒時間越短，打擊者的決策時間就越長。若高中投手投出 35.7 m/s (80 mph) 的快球，約需 0.50 秒到達本壘，則擊球手的決策時間約為 0.20 秒，因為他的揮棒時間約為 0.30 秒。年輕擊球手的揮棒時間通常較長，原因包括體能較弱、球棒揮棒速度較慢以及技巧不足。大聯盟擊球手的揮擊期時間約為 0.19-0.28 秒。如果打擊者能縮短揮棒時間，將擁有更長的決策時間，這有助於更準確地判斷投球類型、速度和位置，並提高擊中好球的機率 (Breen, 1967)。本研究開發的智慧打擊手套可蒐集不同層級打者的揮棒速度與揮擊期時

間。結果顯示，該手套測得的數據與紅外線動作捕捉系統高度相關，驗證了其可靠性。未來應用上，打擊數據的收集將不再受限於實驗室環境，而能擴展至實際打擊場域。先前研究指出，提升揮棒速度可縮短揮擊期時間，進而延長決策時間。本研究進一步發現，公開一級組打擊者的揮棒速度 (IMU: 28.8 m/s) 高於一般組打擊者 (IMU: 24.1 m/s)，且其揮擊期時間 (IMU: 0.39 s) 亦短於一般組打擊者 (IMU: 0.61 s)。根據先前研究的定義，推論公開一級組打擊者能擁有較長的決策時間，以更精確地判斷球種、球飛行軌跡及好壞球。未來研究可進一步探討棒球打擊者的決策時間，以提升對擊球表現的理解與應用。

增加球棒揮棒速度是能夠提升擊球初度。根據先前的研究，如果打擊者能夠以相同的速度揮動較重的球棒，或因為揮棒速度的提升而更快地揮動標準比賽球棒，則擊出的球會因為更大的動量而飛得更遠或被擊中更強勁，甚至兩者兼具。當以 37.9 m/s (85 mph) 投出的直球，在最佳擊球點 (COP，距球棒握持處約 69.85 cm) 擊中時，根據不同揮棒速度的 88.9 cm (27.5 in)、907 g (32 oz) 木棒，球的飛行距離會有所不同。當木棒的揮棒速度分別為 26.8、31.2、35.7 和 40.2 m/s (60、70、80 和 90 mph) 時，擊出的球分別會飛行 99.1、114.3、134.1 和 152.4 m (325、375、440 和 500 ft)。這表明更快的揮棒速度可顯著提升擊球的距離和力量。揮棒速度顯示出對擊球距離和擊球力量的重要影響 (Adair, 2002)。本研究所使用之木棒皆為統一重量與長度，儘管球棒長度和重量保持不變，揮棒速度的提升依然能顯著增加擊球的距離和力量。這一結果表明，揮棒速度在擊球表現中的作用不可忽視。揮棒速度越快，擊出的球就能夠擁有更大的動量，

從而增加飛行距離和擊球強度。這一現象強調了揮棒速度作為提高擊球效果的關鍵因素。雖然球棒的長度和重量對於擊球的表現也有一定影響，但在本研究中，揮棒速度被認為是主要的變數。這表明，即使球棒保持固定，透過提升揮棒速度，打擊者依然能在不改變球棒配置的情況下，顯著提升擊球表現。從實際應用來看，這可以為訓練計劃提供指導，即集中於增強打擊者的揮棒速度，並改善其揮棒技巧，從而達到更好的擊球效果。未來的研究仍然應該探討其他因素，如球棒的材質、重量、擊球點位置等，這些因素可能會與揮棒速度相互作用，進一步影響最終的擊球表現。

第二節 慣性感測器擊中球瞬間球棒角度之討論

在慣性感測器的揮棒速度與角度的研究中發現，與揮棒速度的組內相關係數相比，球棒角度與動作捕捉系統的相關性較低。根據擊球點的不同，揮棒角度最多可產生約 6° 的變化 (Williams et al., 2020)。先前研究中指出，要獲得擊球點的球棒角度，誤差值應在 3° 以內，在先前的研究中所有使用的揮棒慣性感測器的精度皆大於 4° ；不足以分析個人或具有相似揮棒軌跡的球員之間在同一擊球點上球棒角度的差異 (Morishita & Jinji, 2022)。本研究將擊中球瞬間的球棒角度區分為球棒進攻角度、球棒垂直角度與球棒水平角度，並皆在固定式打擊做上進行檢測。在結果發現慣性感測器的組內相關係數皆為中度相關，與動作捕捉系統也皆為中度相關，並且皆超出本研究設定目標之範圍。推論，在數據擷取時的影響，導致精準度下降。未來，還需進一步改善來增進精準度。

在市售的球棒感測器的研究中發現，慣性感測器在球棒的低估攻擊角度，同時高估垂直角度。一致性相關係數顯示兩者的相關性較低，攻擊角度為 0.663，垂直角度為 0.654，但 95% 信賴區間誤差均小於 3.5°，其中攻擊角度的誤差範圍為 -3.46° 至 -1.96°，而垂直角度的誤差範圍則為 1.64° 至 3.21°。此外，偏差修正因子顯示，攻擊角度 (0.917) 與垂直角度 (0.893) 的擬合線比例接近 1，這說明感測器隨著收集到更多揮棒數據，所測得的攻擊角度與垂直角度的平均值將更趨近於真實值，而單次測量可能會產生較大誤差。這項研究結果對教練與球員具有重要意義，因為它不僅揭示了測量數據可能的誤差，還顯示在 97.5% 的情況下，感測器測量誤差可控制在 3.5° 內，提供了一定的可信度 (Stewart et al., 2021)。本研究使用 Bland-Altman 分析來進一步評估智慧打擊手套與紅外線動作捕捉系統之間的測量一致性。結果顯示，兩者之間的測量誤差範圍較大，但大部分測量誤差結果皆落在先前研究定義的 $\pm 3^\circ$ 與 $\pm 3.5^\circ$ 之外。在未來可以根據先前研究之方法來進行偏差修正，並增加數據收集之數量，進一步提高智慧打擊手套在測量球棒的攻擊角度、垂直角度與水平角度的精準度。

第三節 智慧打擊手套與市售棒尾揮棒感測器之討論

在先前研究中，市售的棒尾揮棒感測器在測量職業棒球運動員揮棒速度時，觀察到最大揮桿速度差異可達約 3 m/s。這表明，如果 IMU 能夠以 ± 1.5 m/s 或更高的精度進行測量，則可以有效區分熟練擊球手的揮桿速度差異。此外，研究還發現球棒甜蜜點與球棒底座下方 0.15 公尺處的速度差異約為 5 m/s；在 Mizuno (MZ)、Blast Motion (BM)、Garmin (GA)、Diamond Kinetics (DK) 四種市售揮棒參數感

測器與動作捕捉系統之間的揮棒揮棒速度與球棒角度之準確度與誤差趨勢研究中指出，在揮棒速度中 GA 觀察到最高的組內相關係數 ($ICC = 0.91$)，而 BM 觀察到最低的組內相關係數 ($ICC = 0.67$)；並且測量中四種 IMU 均存在系統偏差，揮棒速度均低於動作捕捉系統的揮棒速度；且誤差值均為 8%；系統偏差顯示 BM 和 DK 呈現顯著正相關 (BM： $p < 0.001$ ，DK： $p = 0.002$)；在隨機誤差除 GA 以外的 IMU，觀察到在較快的揮棒速度時隨機誤差較大。在球棒角度部分，所有 IMU 與動作捕捉系統呈顯著正相關，但除 DK 外，相關係數均低於 0.8；組內相關係數 DK 為 ($ICC > 0.8$)，其他 IMU 均低於 0.6；所有 IMU 均存在顯著的系統偏差，尤其是 DK 的誤差值為 5%。系統偏差顯示 MZ 和 DK 呈現顯著正相關 (MZ： $p = 0.002$ ，DK： $p < 0.001$)；BM、GA 與 DK 在揮棒速度較快時有幾次揮擊超過了 95% 一致性限制。(Morishita & Jinji, 2022)。然而，將感測器固定在棒尾會影響某些選手的舒適度，特別是對於使用握持長棒的選手 (Punchihewa et al., 2021)。本研究將慣性感測器固定於右打者前導手的打擊手套手背處，並透過演算法計算揮棒速度。結果顯示，與動作捕捉系統相比，公開一級組的平均誤差為 +1.2 m/s，整體平均誤差為 1.4 m/s，且測量結果皆與動作捕捉系統呈現高度正相關 ($ICC > 0.8$)。相較於市售揮棒速度感測器，本方法能夠提供精確的揮棒速度測量，同時避免因感測器固定位置而影響打擊者在揮擊時的不適性。

根據 Bailey 等人 (2016) 的研究，ZEPP 揮棒感測器在測量揮擊期最大峰值速度時顯示出良好的信效度 ($ICC : 0.928 - 0.969$ ， $CV : 1.85\% - 9.20\%$)，但對於球棒的進攻角度 (Attack θ) 和垂直角度 (Ve

rt θ)，信效度較低。因此，建議使用 ZEPP 監測揮擊期的最大峰值速度，但不建議用於監測球棒角度。本研究測量不同組別與整體的揮擊期最大揮棒速度，顯示出良好的信效度 (ICC 和 Pearson r 均大於 0.8)，表明該測量工具在揮棒速度的測量中具有高一致性和較強的相關性。然而，對於球棒角度的測量，信效度較低 (ICC 和 Pearson r 均介於 0.6 至 0.7 之間)，顯示測量結果的一致性和相關性較弱。因此，本研究開發的智慧打擊手套適合用於監測揮棒速度，但在監測球棒角度方面仍需進一步改進。

第四節 慣性感測器採樣範圍之討論

先前研究指出透過慣性感測器的加速度與角速度參數可以計算揮棒速度 (Lapinski et al., 2009 ; King et al., 2012)，並且也對揮棒感測器進行驗證結果，將自行開發的演算法以及市售的揮棒慣性感測器與高速攝影機的結果進行比較後，結果顯示自行開發的演算法與高速攝影機的揮棒速度平均差異為 3.64 m/s；與市售揮棒慣性感測器之間的差異為 9.20 m/s。並且發現市售揮棒慣性感測器的加速度計的採樣範圍較低 (最高可達 16g)，在進行演算法之前，應該對原始數據中的達飽和部分進行補償。雖然補償過程相對簡單，但無法保證補償部分的準確性，陀螺儀範圍並未有到達飽和之情形 (2000 deg/s)。這可能會是為什麼市售揮棒慣性感測器有時無法在揮棒速度較快時的打擊者提供準確的揮棒速度數據 (Lyu & Smith, 2018 ; Morishita & Jinji, 2022)。

另外，研究中也將市售的揮棒慣性感測器所提供的原始運動學數據進行重建在自行開發的演算法上，將兩種結果與高速攝影機進行比

較發現，在重建過後的揮棒速度與高速攝影機之間的平均差異為 3.64 m/s，相較市售的揮棒感測器更低。接著也使用了有線慣性感測器，有線慣性感測器能夠輸出非常精確的加速度與角速度。因此，先前研究也納入了比較測試中，加速度計範圍為 20g 至 500g。結果顯示在相同的演算法計算揮棒速度時，有線慣性感測器的結果比市售的球棒慣性感測器更接近高速攝影機的結果。這意味著，如果慣性感測器的加速度計的加速度計和陀螺儀能夠測量到更高精度的數據，它們能夠更好的測量揮棒速度 (Lyu & Smith, 2018)。有鑑於慣性感測器所獲得的運動學參數能夠計算揮棒速度，本研究將慣性感測器黏貼於棒球右打者前導手手背處收取運動學參數，並且所使用的無線慣性感測器採樣範圍加速度計為 20g 陀螺儀為 2000 deg/s，在本研究中並未有加速度計與陀螺儀的採樣範圍達到飽和狀態。因此，透過此無線慣性感測器，並開發一套演算法能夠計算棒球打擊者的揮棒參數。

第五節 研究限制與建議

本研究目前僅針對慣用右手打擊者進行實驗，對於左手打擊者的揮棒參數尚未收集數據。實驗中僅使用固定式打擊座進行打擊測試，其他打擊模式的影響尚待進一步研究與實驗。未來建議擴大研究範圍，收集不同打擊模式下的揮棒參數，以驗證是否存在不同模式下揮棒參數的差異。建議進行更多實驗，包括左手打擊者以及不同年齡層的參與者，以豐富智慧打擊手套的應用範圍。同時，增加更多揮棒參數的收集，使其應用範圍更加廣泛，以提高智慧打擊手套在運動訓練和表現優化中的應用價值。

第陸章 結論

本研究旨在利用動作捕捉系統作為黃金標準，評估透過慣性感測器運動學參數及相應演算法對揮棒參數的準確性和誤差趨勢。動作捕捉系統被廣泛認可為一種可靠的儀器，能夠精確測量物體的運動軌跡。本研究中慣性感測器所得的揮棒參數與動作捕捉系統的結果呈現正相關。公開一級與一般組打擊者在擊中球瞬間的球棒進攻、垂直與水平角度皆超過本研究設定之目標，這可能是由於慣性感測器在加速度與角速度方面與動作捕捉系統存在誤差。整體評估結果顯示，揮棒速度與球棒進攻角度在本研究設定之目標範圍內，但其餘球棒角度超出了預先設定的目標範圍。這表明慣性感測器在測量揮棒速度與球棒進攻角度方面能夠進行測量，並且相較市售揮棒感測器能夠提供更加準確的揮棒速度。但需要進一步分析球棒垂直與水平角度的誤差來源。

透過慣性感測器所開發的智慧打擊手套在測量揮棒速度和球棒進攻角度方面具備一定的準確性，並可在運動訓練、表現評估及產品開發中具有潛力。在未來進一步提供即時反饋，在棒球打擊訓練中，可以用來監測運動員的揮棒動作，幫助改善揮棒技巧；在評估表現方面，可以作為一個低成本、高效能的工具，快速評估打擊者的揮棒能力並追蹤進步情況；在產品開發中，智慧打擊手套的應用可協助研發更符合需求不同項目的運動設備。另外，本研究中也發現了球棒垂直與水平角度測量誤差的問題，未來可透過改進慣性感測器的設計及演算法，進一步提升測量精度和可靠性。

參考文獻

- Adair, R. K. (1990). *The Physics of Baseball*. Harper & Row New York.
- Adair, R. K. (2002). *The Physics of Baseball*. 3rd. New York: Perennial.
- Adair, R. K., & Chew, G. F. (1990). *The Physics of Baseball*. American Institute of Physics.
- Breen, J. L. (1967). What makes a good hitter?. *Journal of Health, Physical Education, Recreation*, 38(4), 36-39.
- Bailey, C. A., McInnis, T. C., & Batcher, J. J. (2016). Bat swing mechanical analysis with an inertial measurement unit: reliability and implications for athlete monitoring. *Journal of Trainology*, 5(2), 43-45.
- Cooper, G., Sheret, I., McMillian, L., Siliverdis, K., Sha, N., Hodgins, D., ... & Howard, D. (2009). Inertial sensor-based knee flexion/extension angle estimation. *Journal of Biomechanics*, 42(16), 2678-2685.
- Chun, S., Kang, D., Choi, H. R., Park, A., Lee, K. K., & Kim, J. (2014). A sensor-aided self coaching model for uncocking improvement in golf swing. *Multimedia Tools and Applications*, 72, 253-279.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., & Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors*, 18(3), 873.
- Crisco, J. J., Greenwald, R. M., Blume, J. D., & Penna, L. H. (2002). Batting performance of wood and metal baseball bats. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(10), 1675-1684.
- Chen, W.-H., Feng, Y.-C., Yeh, M.-C., Ma, H.-P., Liu, C & Wu, C.-W. (2022). Impact position estimation for baseball batting with a force-irrelevant vibration feature. *Sensors*, 22(4), 1553.
- Diebel, J. (2006). Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors. *Matrix*, 58(15-16), 1-35.
- Dowling, B., & Fleisig, G. S. (2016). Kinematic comparison of bas

- eball batting off of a tee among various competition levels. *Sports Biomechanics*, 15(3), 255-269.
- Delgado-García, G., Vanrenterghem, J., Ruiz-Malagón, E. J., Molina-García, P., Courel-Ibáñez, J., & Soto-Hermoso, V. M. (2021). IMU gyroscopes are a valid alternative to 3D optical motion capture system for angular kinematics analysis in tennis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 235(1), 3-12.
- Escamilla, R. F., Fleisig G. S., DeRenne C., Taylor M. K., Moorman 3rd C. T., Rodney, I., Edward, B. & Andrews, J. R. (2009). A comparison of age level on baseball hitting kinematics. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(3), 210-218.
- Fortenbaugh, D, Fleisig, G, Onar-Thomas, A & Asfour, S. (2011). The effect of pitch type on ground reaction forces in the baseball swing. *Sports Biomechanics*, 10(4), 270-279.
- Fleisig, G. S., & Kwon, Y.-H. (2011). Editorial. *Sports Biomechanics*, 10, 269.
- Greenwald, R. M., Penna, L. H., & Crisco, J. J. (2001). Differences in batted ball speed with wood and aluminum baseball bats: a batting cage study. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(3), 241- 252.
- Gordon, B. J., & Dapena, J. (2006). Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences*, 24(1), 31-49.
- Gray, R. (2009). A model of motor inhibition for a complex skill: Baseball batting. *Journal of Experimental Psychology*, 15, 91–105.
- Ghasemzadeh, H., Loseu, V., & Jafari, R. (2009). Wearable coach for sport training: A quantitative model to evaluate wrist-rotation in golf. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 1(2), 173-184.
- Hume, P. A., Keogh, J., & Reid, D. (2005). The role of biomechanics in maximising distance and accuracy of golf shots. *Sports Medicine*, 35, 429-449.
- Horiuchi, G., & Sakurai, S. (2016). Kinetic analyses on increase of bat head speed in baseball batting. *International Journal of Sports Biomechanics*, 1(1), 1-10.

- rt and Health Science, 14, 94-101.*
- Inkster, B., Murphy, A., Bower, R., & Watsford, M. (2011). Differences in the kinematics of the baseball swing between hitters of varying skill. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 43* (6), 1050-1054
- Jadischke, R., Viano, D. C., Dau, N., King, A. I., & McCarthy, J. (2013). On the accuracy of the Head Impact Telemetry (HIT) System used in football helmets. *Journal of Biomechanics, 46*(13), 2310-2315.
- Katsumata, H. (2007). A functional modulation for timing a movement: A coordinative structure in baseball batting. *Human Movement Sciences, 26*(1), 27-47.
- King, K., Yoon, S. W., Perkins, N. C., & Najafi, K. (2008). Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics. *Sensors and Actuators : Physical, 141*(2), 619-630.
- King, K., Hough, J., McGinnis, R., & Perkins, N. C. (2012). A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. *Sports Engineering, 15*, 41-52.
- Kos, M., & Kramberger, I. (2019). Smart wearables for tennis game performance analysis. *Proceedings of the Sports Science and Human Health-Different Approaches, 1-18.*
- Kim, M., & Park, S. (2020). Golf swing segmentation from a single IMU using machine learning. *Sensors, 20*(16), 4466.
- Kato, M., & Yanai, T. (2022). Launch fly balls for better batting statistics: Applicability of “fly-ball revolution” to Japan’s professional baseball league. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 22*(3), 437-453.
- Kidokoro, S., & Morishita, Y. (2021). Relationship between impact characteristics and launch direction in softball hitting: A study involving elite players. *Plos One, 16*(11), e0260520.
- Lai, D. T., Hetchl, M., Wei, X., Ball, K., & Mclaughlin, P. (2011). On the difference in swing arm kinematics between low handicap golfers and non-golfers using wireless inertial sensors. *Procedia Engineering, 13*, 219-225.
- Lightman, K. (2016). Silicon gets sporty. *IEEE Spectrum, 53*(3), 48-

- Lyu, B., & Smith, L. V. (2018). Evaluation of wireless bat swing speed sensors. *Sports Engineering, 21*, 229-234.
- Myers, N. L., Kibler, W. B., Axtell, A. H., & Uhl, T. L. (2019). The Sony Smart Tennis Sensor accurately measures external workload in junior tennis players. *International Journal of Sports Science & Coaching, 14*(1), 24-31.
- Morishita, Y., & Jinji, T. (2022). Accuracy and Error Trends of Commercially Available Bat Swing Sensors in Baseball. *Sports, 10*(2), 21.
- Nam, C. N. K., Kang, H. J., & Suh, Y. S. (2013). Golf swing motion tracking using inertial sensors and a stereo camera. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63*(4), 943-952.
- Nathan, A. M., Cantakos, J., Kesman, R., Mathew, B., & Lukash, W. (2012). Spin of a batted baseball. *Procedia Engineering, 34*, 182-187.
- Pedley, M. (2013). Tilt sensing using a three-axis accelerometer. *Freemove Semiconductor Application Note, 1*, 2012-2013.
- Punchihewa, N. G., Miyazaki, S., Chosa, E., & Yamako, G. (2020). Efficacy of inertial measurement units in the evaluation of trunk and hand kinematics in baseball hitting. *Sensors, 20*(24), 7331.
- Punchihewa, N. G., Arakawa, H., Chosa, E. & Yamako, G. (2021). A hand-worn inertial measurement unit for detection of bat-ball impact during baseball hitting. *Sensors, 21*(9), 3002.
- Sawicki, G. S., Hubbard, M., & Stronge, W. J. (2003). How to hit home runs: Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories. *American Journal of Physics, 71*(11), 1152-1162.
- Szymanski, D. J., DeRenne, C., & Spaniol, F. J. (2009). Contributing factors for increased bat swing velocity. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 23*(4), 1338-1352.
- Seaman, A., & McPhee, J. (2012). Comparison of optical and inertial tracking of full golf swings. *Procedia Engineering, 34*, 461-466.

- Sharma, A., Agarwal, M., Sharma, A., & Dhuria, P. (2013). Motion capture process, techniques and applications. *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun*, 1, 251-257.
- Stewart, E., Stewart, M., Arachchige, S. N. K., Turner, A., Knight, A., Johnson, J., ... & Chander, H. (2021). Validation of a Bat Handle Sensor for Measuring Bat Velocity, Attack Angle, and Vertical Angle. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 9(2), 28-32.
- Tygiel, J. (2001). *Past time: Baseball as history*. Oxford University Press.
- Tabuchi, N., Matsuo, T., & Hashizume, K. (2007). Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. *Sports Biomechanics*, 6(1), 17-30.
- Verheul, J., Nedergaard, N. J., Vanrenterghem, J., & Robinson, M. A. (2020). Measuring biomechanical loads in team sports—from lab to field. *Science and Medicine in Football*, 4(3), 246-252.
- Williams, T., & Underwood, J. (1986). *Science of Hitting*. Simon and Schuster.
- Williams, T., & Underwood, J. (2013). *The Science of Hitting*. New York: Simon & Schuster.
- Welch, C. M., Banks, S. A., Cook, F. F. & Draovitch, P. (1995). Hitting a baseball: A biomechanical description. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 22(5), 193-201.
- Wright, I. (2008). Motion capture in golf. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 3, 161-182.
- Williams, C. C., Gdovin, J. R., Wilson, S. J., Cazas-Moreno, V. L., Eason, J. D., Hoke, E. L., ... & Garner, J. C. (2019). The effects of various weighted implements on baseball swing kinematics in collegiate baseball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(5), 1347-1353.
- Williams, C. C., Donahue, P. T., Wilson, S. J., Mouser, J. G., Hill, C. M., Luginsland, L. A., ... & Garner, J. C. (2020). Examining changes in bat swing kinematics in different areas of the strike zone in collegiate baseball players. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 8(2), 1-6.

Yang, W.-W., Liu, Y.-C., Chen, W.-H., Tai, H.-H., Sato, K., Ma, H.-P & Liu, C. (2021). Hitting weighted baseball enhances the experience of bat–ball contacts. *Sports Biomechanics*, 1-12.



附錄一 實驗受試者須知

親愛的受試者您好，感謝您參與本次棒球實驗，此次棒球實驗旨在研究：「透過慣性感測器進行揮棒運動學分析：智慧棒球打擊手套開發」，本次研究目的在於研究將 IMU 固定於右打者前導手之打擊手套手背處，透過演算法，以期獲取打擊者揮棒運動學參數。探討與動作捕捉系統之間的相關性與準確性。

務必遵守下列事項，以利於實驗可以順利進行：

- 一、確實的填寫「受試者基本資料」。
- 二、務必熟悉並清楚了解實驗流程、實驗方法
- 三、進行實驗前的暖身活動皆以球隊標準的熱身方式進行，此熱身是全身性的身體活動，先進行十分鐘之慢跑熱身後，進行動態伸展，順序由上肢、軀幹至下肢。
- 四、為避免黏貼反光球與後續動作分析數據之細微錯誤，受試者皆要求上半身無穿著任何服飾，下半身則穿著緊身束褲。
- 五、若在實驗進行中有任何身體不適，請立即告知實驗人員，並立即停止對該名受試者之實驗。

感謝您參與本次研究實驗！

國立臺灣師範大學運動競技學系 運動科學研究所 陳鋒 敬上

附錄二 研究受試者同意書

親愛的參與者

感謝您願意參與我們的研究，題為「透過慣性感測器進行揮棒運動學分析：智慧棒球打擊手套開發」(以下簡稱研究)。這份研究參與者同意書(以下簡稱同意書)旨在提供您充分的資訊，以幫助您做出是否參與研究的決定。如果您在閱讀同意書或參與研究的過程中有任何問題或疑慮，請隨時與我們的研究團隊聯繫，我們將樂意提供詳細解答。

簽署本同意書代表您同意參與本研究，但請知道，您隨時可以自由退出研究，而無需提供理由。

我們將依法保護您的個人資料和隱私，所有能識別您身分的資料都將被視為機密，不會公開或分享給與研究無關的第三方。

請了解，您的參與代表您同意研究倫理審查委員會的監管，以確保研究遵守相關法規，並且研究過程符合道德標準。相關監管機構承諾不會揭露任何涉及您身份的資料，以確保您的隱私安全。

如果您在參與研究過程中遇到任何心理上的不適或困擾，您有權隨時告知研究團隊，可以選擇不回答某些問題、退出討論或退出整個研究，而這不會對您造成任何不利後果或影響其他權益。

若我們注意到您在研究過程中出現任何可能對您造成心理不適或困擾的情況，我們將強烈建議您退出研究，以確保您的安全和舒適。

請在下方簽署，表示您已經閱讀並理解上述內容，並自願參與本研究。

參與者: _____ (簽名) 日期: _____

再次感謝您的參與，您的協助對我們的研究將具有重要意義，有助於提升運動生物力學領域的知識，並推動我們國家的棒球運動水平。

國立臺灣師範大學運動競技學系 運動科學研究所 陳鋒 敬上

附錄三 實驗受試者基本資料表

閱讀上述實驗受試者須知與實驗參與者同意書後，已確定同意參與本次實驗，請據實填寫以下個人基本資料表。本基本資料表將使實驗者了解您的生理狀況與運動背景。

姓名: _____

出生年(西元)/月/日: _____

身高(公分): _____

體重(公斤): _____

球齡(年/月): _____

守備位置: _____

投打慣用手

投球: _____

打擊: _____

在過去半年內，您是否曾經歷過與骨骼、肌肉、神經系統、韌帶相關的運動傷害？

有 無

感謝您的填寫！

國立臺灣師範大學運動競技學系 運動科學研究所 陳鋒 敬上