

智慧牛棚：投手姿態分段分析與運動傷害預防系統

Smart Bullpen: Pitcher Pose Segmentation Analysis and Injury Prevention System

Group: E-15

指導教授: 連震杰 教授

組員: 楊承曄

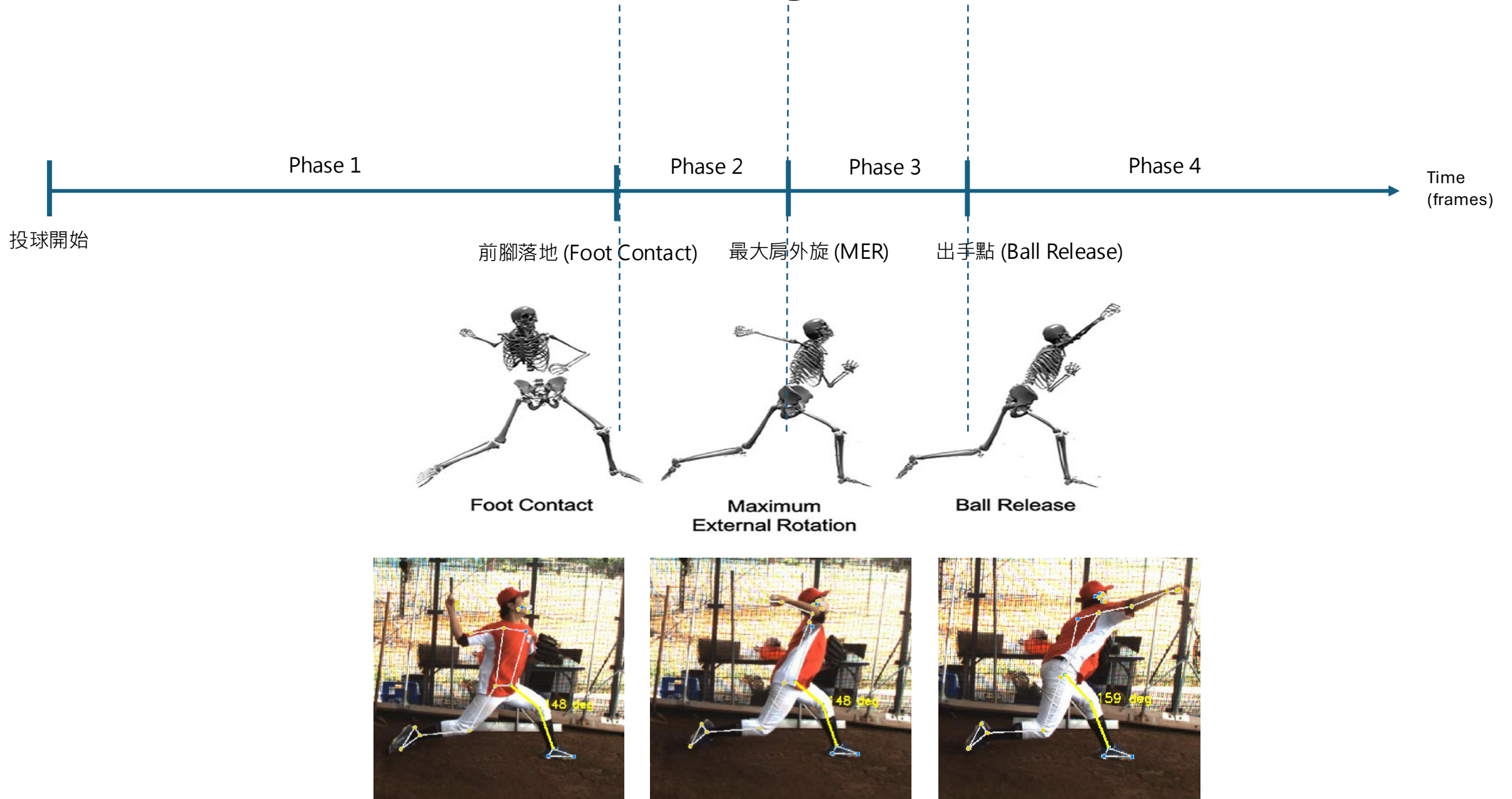
1.1 Introduction: Motivation

1. Motivation:

- 1) **訓練缺乏客觀量化指標**：基層或日常牛棚多依賴**教練主觀肉眼判斷**與手動影片回放，缺乏客觀量化的生物力學數據，難以精準揪出潛在的運動傷害風險。
- 2) **科技與運動科學結合趨勢**：在現代棒球中，如何透過科技提升訓練效率以及有效保護選手成了教練和選手的課題。
- 3) **高階運科設備的普及門檻**：雖然現代棒球強調科技輔助，但目前**市面上系統成本高昂、架設繁瑣**，難以落地應用於日常牛棚場邊。



1.2 Definition- Four-Phase Pitching Detection



2.1 System Setup

world
coordinates

投手丘



1. Experimental Environment :

- (1) Location: Baseball Bullpen.
- (2) Subject: Collegiate baseball pitcher (大專甲二投手).

本壘板



2. Image Acquisition (影像規格) :

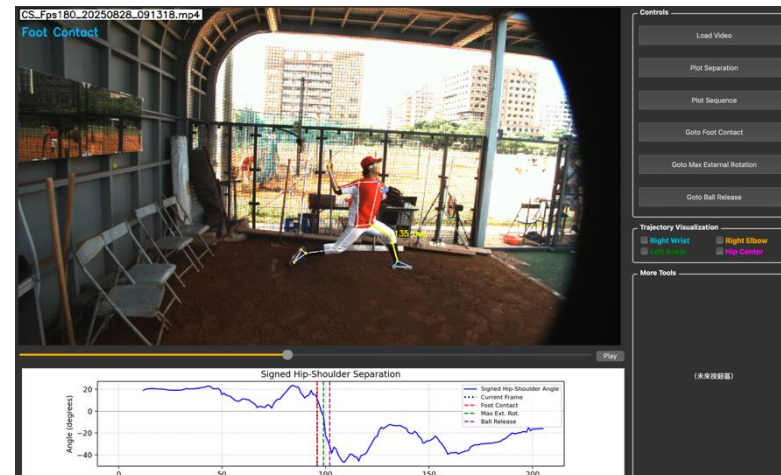
- (1) Device: Single High-Speed Camera
- (2) Resolution: 1920 × 1080 pixels.
- (3) Frame Rate: 180 fps

3. Camera Placement :

- (1) Viewpoint: 投手側面視角
- (2) Alignment: 垂直於投球路徑
- (3) Reason: 優化 X-Z 平面上的肩髖分離角度估算

4. System Workflow :

- (1) Input: Raw video file (.mp4).
- (2) Processing: Python 開發之 GUI 介面結合 MediaPipe 運算
- (3) Output: 運動學分析數據與視覺化回饋



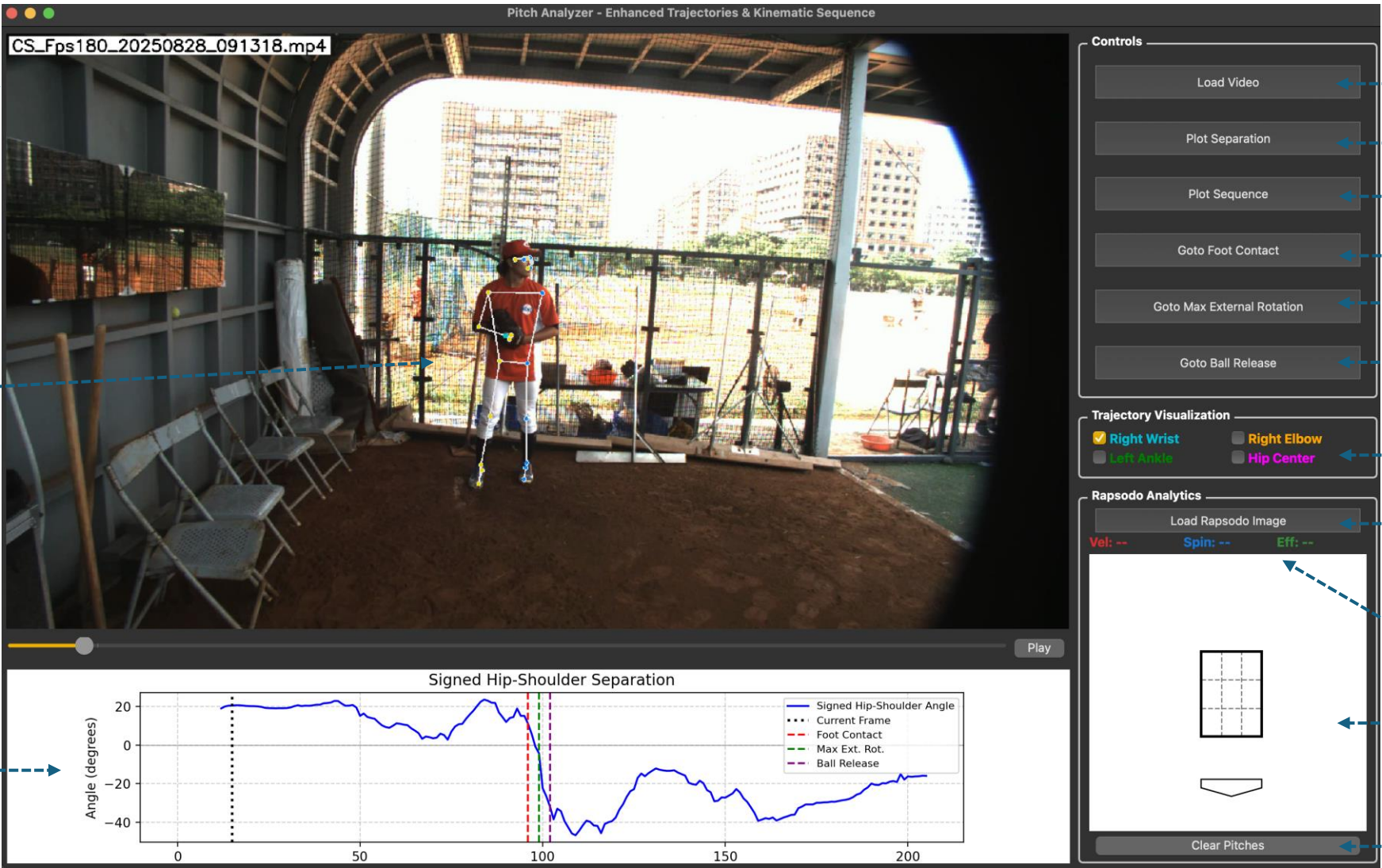
2.2 User Interface

(0.0)

標示讀取
影片檔名

繪製出投手骨
架及各處關節

繪製出投手投球過
程肩髖分離角
度之變化，以及標
出FC, MER, BR的時
間點



載入/分析投球影片

畫出肩髖分離角

畫出峰值順序圖

跳至前腳落地幀

跳至最大肩外旋幀

跳至放球點幀

勾選畫出特定軌跡

載入Rapsodo 圖片

球速、轉速、旋轉效率

顯示球的落點位置

清除球的落點位置

3.1 1st-Phase Pitching Detection - 前腳落地 (FC)

1. 前處理與特徵定義 (Preprocessing & Definitions)

- 1) 透過Mediapipe中的solution.pose抓出身體的landmarks
- 2) 找出左腳的 Heel (p_{heel}) 與 Foot Index ($p_{foot\ index}$)
- 3) 定義前腳位置為heel和foot index的中間位置 $= \frac{p_{heel} + p_{foot\ index}}{2}$
- 4) 捨棄偏差過大的不合理位置
-前腳速度計算： $v_x = \frac{x - x_{previous}}{1/fps}$, $v_y = \frac{y - y_{previous}}{1/fps}$

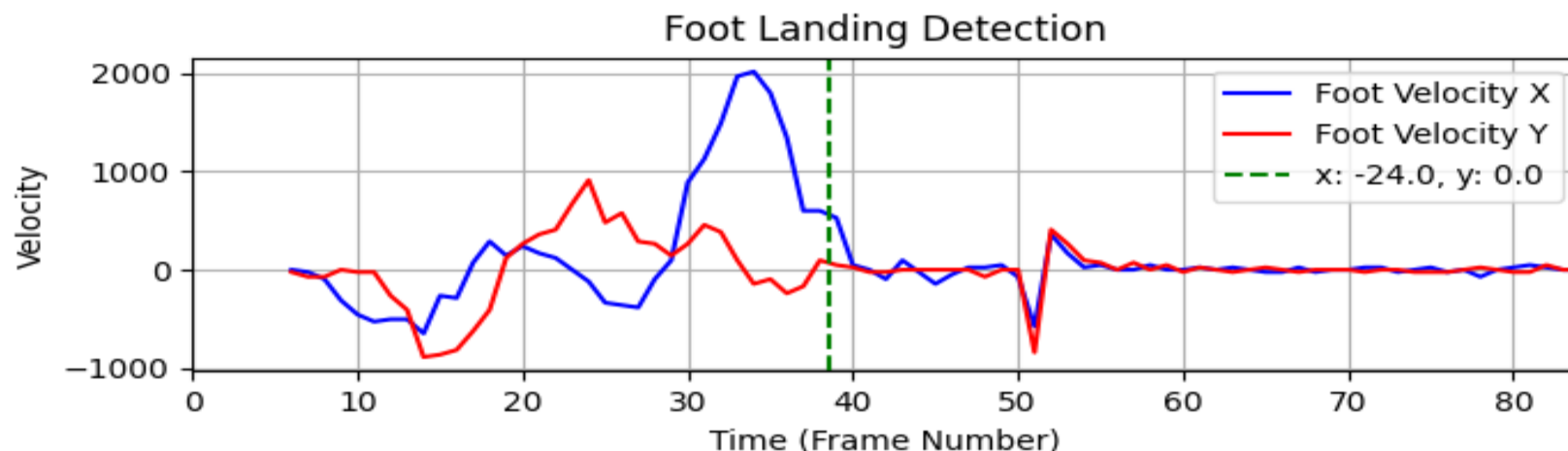


2. 前腳落地偵測：

- 1) 前腳狀態是“下降”或在過渡狀態“幾乎落地”
- 2) 過去 10 筆水平速度 v_x 皆為非負，代表腳往前移或靜止
- 3) 當 $v_x \leq 0$ ，表示前進動作已停止或反向
- 4) 垂直速度 $v_y \leq 0$ ，代表腳停止下降

過渡狀態 “幾乎落地”：

- 1) 若判斷落地後且球出手前，速度出現連續正值，代表前腳尚未落地
- 2) 用以處理細微不規則現象
- 3) 速度再次 ≤ 0 則判斷落地



Definition:

p_{heel} : heel的位置

$p_{foot\ index}$: foot index的位置

x : 前腳現在的垂直位置

$x_{previous}$: 前腳前一個frame的水平位置

v_x : 前腳水平速度

y : 前腳現在的垂直位置

$y_{previous}$: 前腳前一個frame的垂直位置

v_y : 前腳水平速度

3.2 3rd-Phase Pitching Detection – 放球點 (BR)

球出手：

1) Joint Position: 投球手手臂伸到身體前方：

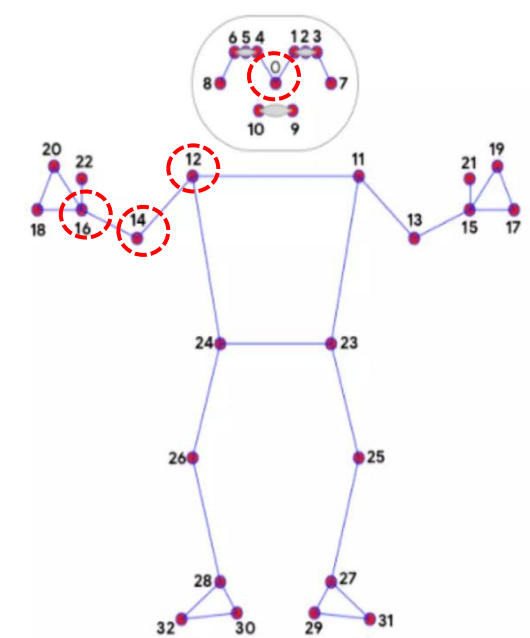
(1) ($x_{16 \text{ right wrist}} > x_{\text{nose}}$) and ($x_{\text{right wrist}} > x_{\text{right elbow}}$) and ($x_{\text{right elbow}} > x_{\text{right shoulder}}$)

2) Joint Angle:

(1) θ_{upperarm} 和 θ_{forearm} 皆小於90度和

(2) 出手的過程中，會從 $\theta_{\text{forearm}} > \theta_{\text{upperarm}}$ 轉變成 $\theta_{\text{forearm}} \leq \theta_{\text{upperarm}}$

- 當 $\theta_{\text{forearm}} \leq \theta_{\text{upperarm}}$ ，代表球出手



Definition:

$x_{\text{right elbow}}$, $y_{\text{right elbow}}$: 右手手肘位置

$x_{\text{right wrist}}$, $y_{\text{right wrist}}$: 右手手腕位置

$x_{\text{right knee}}$: 右膝水平位置

$x_{\text{right shoulder}}$, $y_{\text{right shoulder}}$: 右手肩膀位置

x_{nose} : 鼻子水平位置

θ_{upperarm} : 上臂和水平線正向的夾角

θ_{forearm} : 前臂和水平線正向的夾角

3.3 2nd-Phase Pitching Detection - 最大肩外旋 (MER)

投球手最大肩外旋：

1) 手肘的位置會在手腕前面，也會在右膝前面

$$x_{right\ elbow} > x_{right\ wrist} \text{ and } x_{right\ elbow} > x_{right\ knee}$$

2) 外旋角度：

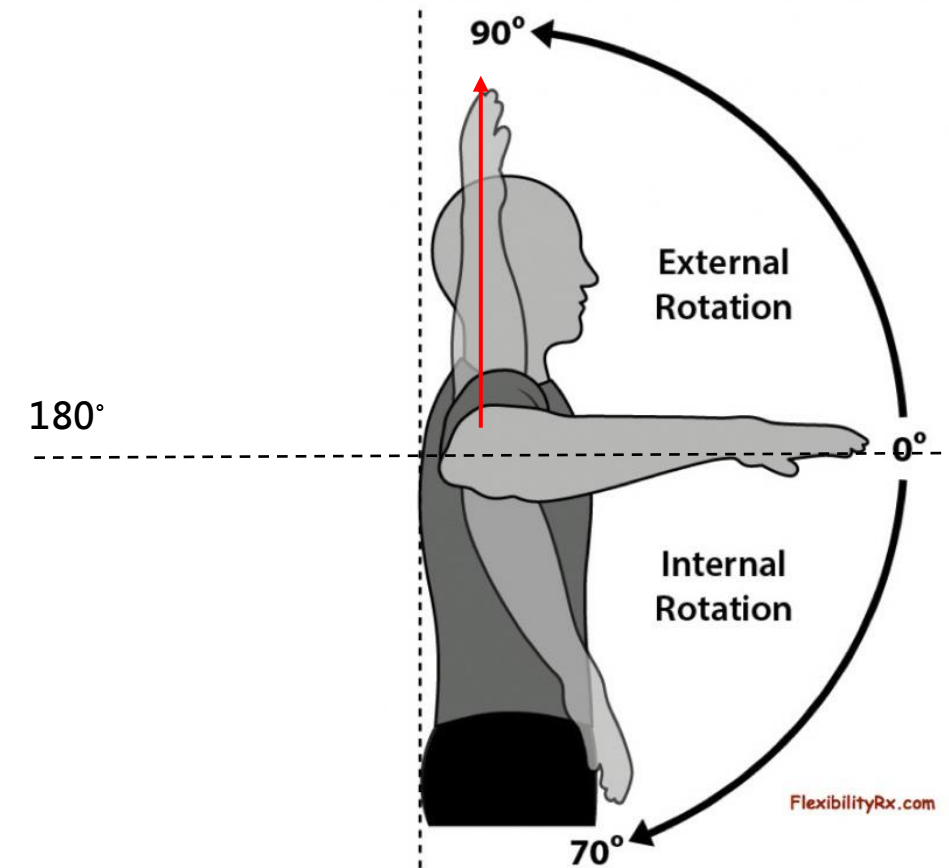
$$\theta_{right\ arm} = \arctan2(\Delta y, \Delta x) * \frac{180}{\pi}, -180^\circ < \theta_{right\ arm} < 180^\circ$$

反正切函數 $\arctan2(\Delta y, \Delta x)$ 。(2D影像的像素座標 Y 軸朝下)

$$-\Delta y = y_{right\ elbow} - y_{right\ wrist}$$

$$-\Delta x = x_{right\ elbow} - x_{right\ wrist}$$

3) 找出落地後、出手前的最大角度即為最大肩外旋



Definition:

$x_{right\ elbow}$, $y_{right\ elbow}$: 右手手肘位置

$x_{right\ wrist}$, $y_{right\ wrist}$: 右手手腕位置

$x_{right\ knee}$: 右膝水平位置

$\theta_{right\ arm}$: 右前臂和水平線正向的夾角

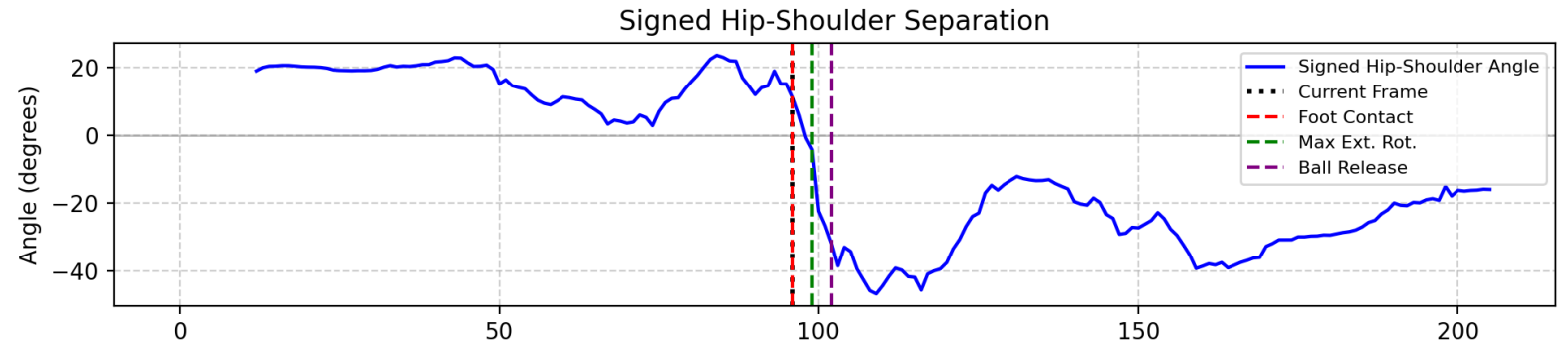
4.1 Analyst Using Hip-Shoulder Separation Angle - 肩髖分離

肩髖分離角度偵測：

- 1) 利用 $x_{right\ shoulder}$, $z_{right\ shoulder}$ 和 $x_{left\ shoulder}$, $z_{left\ shoulder}$ 標出肩膀向量 $v_{shoulder}$ ($v_{x\ shoulder}$, $v_{z\ shoulder}$)
- 2) 利用 $x_{right\ hip}$, $z_{right\ hip}$ 和 $x_{left\ hip}$, $z_{left\ hip}$ 標出髖向量 v_{hip} ($v_{x\ hip}$, $v_{z\ hip}$)
- 3) $\theta_{shoulder} = \arctan2(v_{x\ shoulder}, v_{z\ shoulder})$
- 4) $\theta_{hip} = \arctan2(v_{x\ hip}, v_{z\ hip})$
- 5) 算出肩髖分離角： $\Delta\theta_{hip} = \theta_{hip} - \theta_{shoulder}$

肩髖分離效應：

- 1) 核心扭轉機制：前腳落地瞬間，骨盆已率先朝向本壘板旋轉打開，而肩膀與軀幹仍保持側向關閉狀態，上下半身之間產生明顯的角度差。
- 2) 創造橡皮筋張力：分離角越大，核心與腹斜肌群被拉伸的程度越深。這能像拉滿的弓一樣儲存巨大的彈性能，隨後瞬間釋放，轉化為強烈的軀幹旋轉爆發力。
- 3) 極大化球速、保護手臂：完美的肩髖分離能確保動力鍊的能量完美向上傳遞（鞭打效應），讓投球依賴軀幹的旋轉動能而非單靠手臂硬催，進而在提升球速的同時，大幅降低肩關節與手肘的受傷風險。



觀察上圖選手，在前腳落地瞬間，呈現出良好的肩髖分離姿態。從影像骨架與下方圖表曲線可以看出：在前腳落地當下，下方圖表的藍色曲線位於正值區間（大約落在 $+10^\circ$ 至 $+15^\circ$ 間）。這代表他的髖部已經領先上半身率先啟動旋轉並面向本壘板方向，而肩膀仍保持關閉狀態。這成功拉伸了核心肌群，就像拉滿的橡皮筋一樣儲存了彈性能，為隨後的轉體爆發與鞭打效應奠定了堅實基礎。。

Definition:

$x_{right\ shoulder}$, $z_{right\ shoulder}$: 右肩膀位置

$x_{left\ shoulder}$, $z_{left\ shoulder}$: 左肩膀位置

$x_{right\ hip}$, $z_{right\ hip}$: 右髖位置

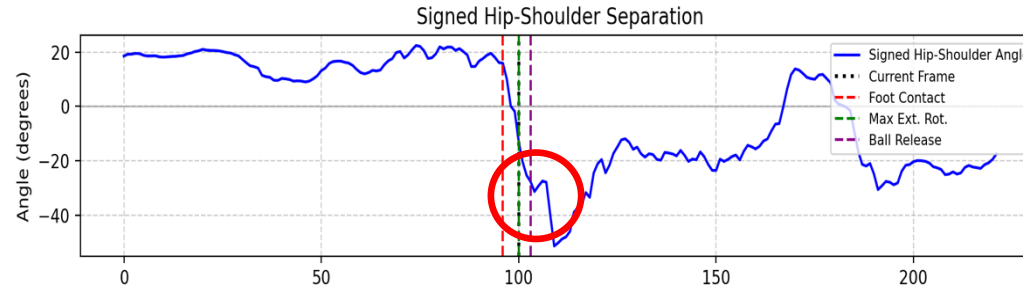
$x_{left\ hip}$, $z_{left\ hip}$: 左髖位置

$\theta_{shoulder}$: 肩膀相對於X軸的夾角

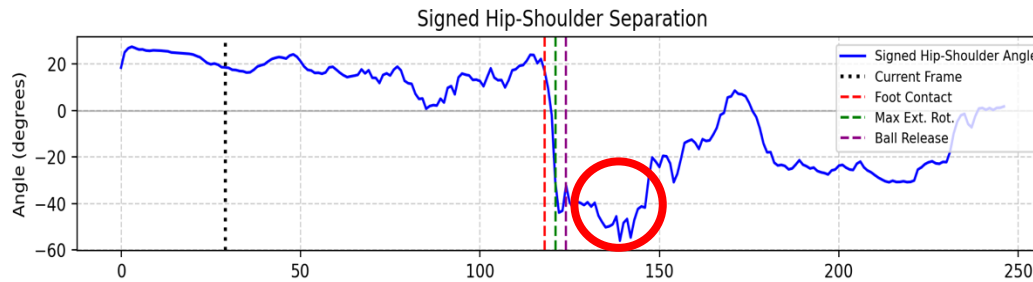
θ_{hip} : 髖部相對於X軸的夾角

4.1 Analyst Using Hip-Shoulder Separation Angle - 肩髖分離最大角度

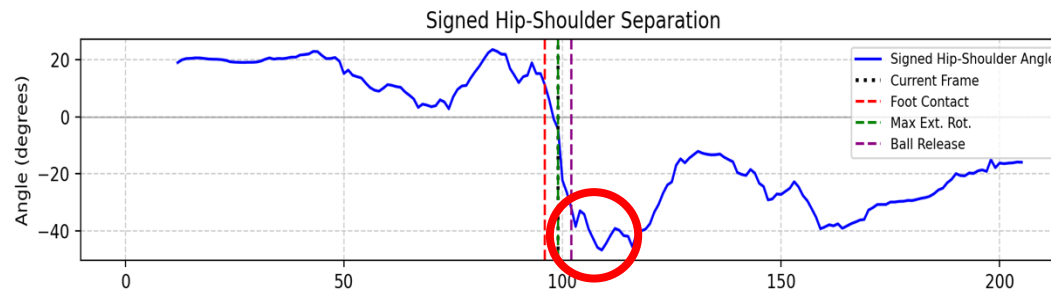
1. 投球肩髖分離最大角度 - 觀察投手在投球階段肩髖分離角度之最大值



1) 肩髖分離角度**適中** (約 40° – 60°)：適中的分離角度可有效儲存軀幹旋轉的彈性能量 (stretch-shortening cycle)，使動能由下半身順利傳遞至上肢，提升投球速度與效率，同時減少肩肘的負擔與受傷風險。



2) 肩髖分離角度**過大** ($>60^{\circ}$)：過大的分離角會造成軀幹肌群過度拉伸，導致核心穩定度下降與運動鏈協調失衡；若軀幹追趕髖部的時機延遲，肩與肘的旋轉扭矩顯著增加，提升肩袖或內側副韌帶 (UCL) 受傷風險。



3) 肩髖分離角度**過小** ($<40^{\circ}$)：分離角不足表示軀幹與髖部幾乎同步旋轉，導致下半身動能無法有效傳遞至上肢，使投球動作主要仰賴手臂力量，不僅球速下降，也增加手肘與肩部的疲勞與慢性傷害風險。

4.2 Analyst Using thigh-shank Angle -前腳煞車

投球前腳煞車偵測：

- 1) 利用 x_{hip} , y_{hip} 和 x_{knee} , y_{knee} 標出大腿向量 v_{thigh}
- 2) 利用 x_{knee} , y_{knee} 和 x_{ankle} , y_{ankle} 標出小腿向量 v_{shank}
- 3) 利用 $\cos(\theta_{leg}) = \frac{v_{thigh} \cdot v_{shank}}{\|v_{thigh}\| \cdot \|v_{shank}\|}$, $\theta_{leg} = \arccos(\cos(\theta_{leg})) * \frac{180}{\pi}$
- 4) 觀察 v_{thigh} , v_{shank} 交角 θ_{leg} 大小是否合適
- 5) 觀察 θ_{leg} 大小是否在FC後持續增加趨近180度
- 6) 判斷投手是否達成好的前腳煞車效果

投球前腳煞車效應：

- 1) 前腳落地後，讓身體向前的移動速度減慢，動量轉移到骨盆與軀幹旋轉，提升投球速度。
- 2) 創造 hip-shoulder separation：前腳越穩，骨盆越早停下、上半身越能延遲旋轉，增加扭矩與能量儲存。
- 3) 保護手臂、提升效率：有效煞車能減少手臂單獨承受的負擔，讓力量由下而上傳遞，降低受傷風險、提高動作效率。



Foot Contact (134°)



Max External Rotation (145°)



Ball Release (154°)

觀察上圖選手，從 FC 到 MER 再到 BR 的過程中， θ_{leg} 的角度持續變大，到完成投球動作時接近180°，表示此選手的前腳煞車部分表現良好，有助於保存下肢力量並傳導到上半身。

Definition:

x_{hip} , y_{hip} : 投手前腳側髖部位置
 x_{knee} , y_{knee} : 投手前腳膝蓋位置
 x_{ankle} , y_{ankle} : 投手落地腳腳踝位置
 v_{thigh} , v_{shank} : 投手大、小腿向量
 θ_{leg} : 大腿和小腿的夾角

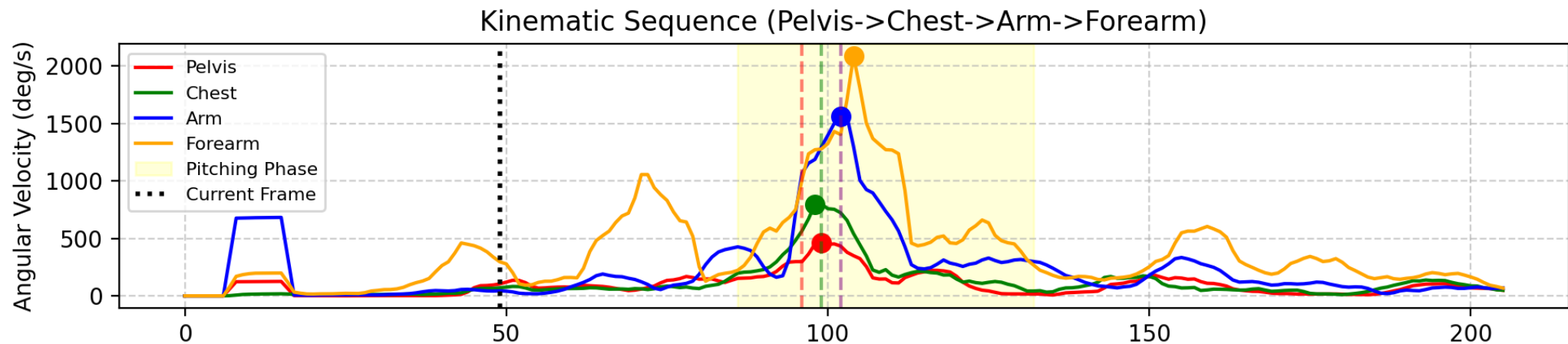
4.3 Kinematic Sequence Peaks Analysis - 投手投球峰值分析

投球峰值分析：

- 1) 投球非單一關節發力，而是力量依序由 骨盆 → 軀幹 → 上臂 → 前臂傳遞，理想投球動作中，每個身體段落的「最大旋轉速度 (Peak) 」會依照由下而上的順序出現。
- 2) 計算骨盆、軀幹、上臂、前臂旋轉角速度，並標出峰值：

$$\text{瞬時角速度計算 } \omega_t = \frac{\theta_t - \theta_{t-1}}{1/fps}$$

- 3) 如果順序正確：動力鍊完整、能量有效放大、投球效率佳
- 4) 如果順序異常：上肢代償、下肢貢獻不足、潛在傷害風險



5.1 Discussion and Future Works

1. 討論 (Discussion):

- (1) Accessibility: 本次研究開發 Python GUI 介面成功降低了投手生物力學分析的門檻，相較於昂貴的設備，本系統僅需單一攝影機即可運作。
- (2) Automation: 自動投球分期偵測 (FC, MER, BR) 大幅減少了教練手動標記影片的時間成本與主觀判斷誤差。
- (3) Injury Prevention: 透過監控「肩髖分離角」，系統能提供客觀數據以識別「分離角度不足」(易導致手臂疲勞) 或具有「動力鏈時序問題」的投手。

2. 研究限制 (Limitations):

- (1) 2D Projection Error (2D 投影誤差): 相較於多鏡頭系統，MediaPipe 單鏡頭的深度估測 Z 軸在精確度上仍有先天限制。
- (2) 遮擋問題: 在特定投球階段 (如身體背對鏡頭時)，部分骨架關鍵點可能遭到遮擋，導致偵測數值產生抖動。

3. 未來展望 (Future Works):

- (1) 多視角融合: 整合第二台攝影機進行雙鏡頭分析，以提升 3D 角度計算的準確度。
- (2) Mobile Application: 將目前的 Python/PyQt5 系統移植至手機 App，以實現牛棚場邊的即時回饋。
- (3) 大數據分析 (Big Data Analysis): 收集不同層級投手的數據，建立區分「優良」與「不良」投球機制的標準化評分功能。