



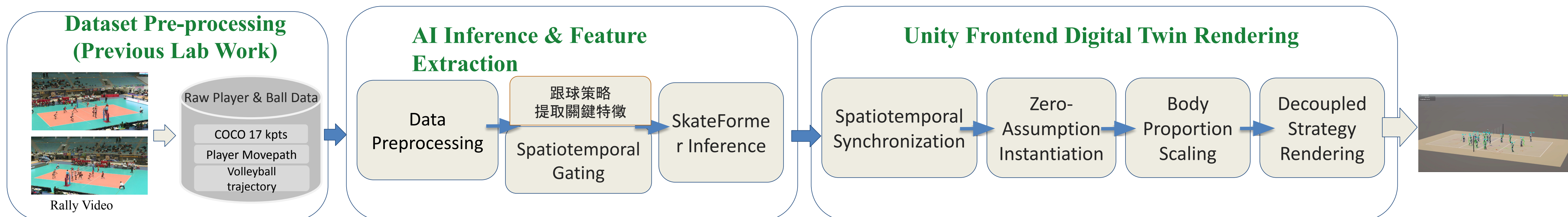
Introduction

Background :

骨架追蹤與排球軌跡預測的原始數據常伴隨極端雜訊與特徵丟失。數據要與實務戰術分析接軌，需要一套能容忍高頻雜訊、且具備「語意可讀性」的3D數位孿生平台。

Goal:

突破傳統 2D 轉播視角之透視遮蔽限制。利用Unity重建模擬排球戰術數位孿生 (Digital Twin)。
系統開發宗旨在於輔助運動分析，確保兼顧數據真實性 (Data Truthfulness) 和語意可讀性 (Semantic Readability)。



Methods

Backend - Spatiotemporal Gating (物理極值提取):

使用(Nature CubicSpline) 平滑軌跡，與二階導數突波 $|S''(t)|$ 提取物理擊球幀。

Backend - Action Inference (時序動作推論):

以跟球策略抓取擊球球員，綜合 AI 信心度與空間距離權重，進行語意推論與前搖預測 (Animation Offset Deduction)，確保動畫擊球動作與球軌跡吻合。

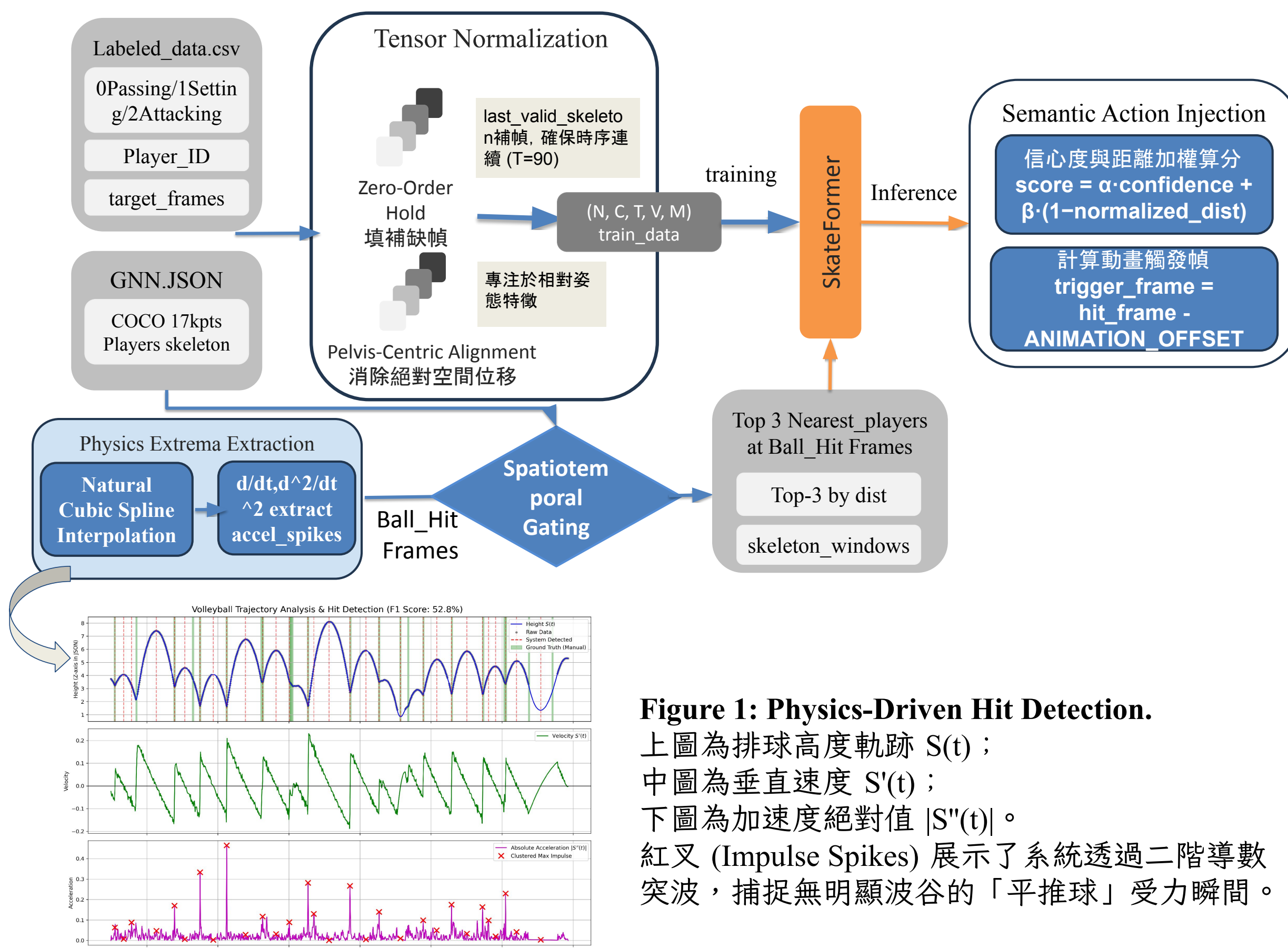


Figure 1: Physics-Driven Hit Detection.

上圖為排球高度軌跡 $S(t)$ ；
中圖為垂直速度 $S'(t)$ ；
下圖為加速度絕對值 $|S''(t)|$ 。
紅叉 (Impulse Spikes) 展示了系統透過二階導數突波，捕捉無明顯波谷的「平推球」受力瞬間。

Engineering Trade-offs

追蹤碎片化 vs. 數據真實性: 面對 MOT 多目標追蹤產生的 ID 切換問題，為避免插值或強制綁定造成的數據不真實，使用「Zero-Assumption Instantiation」為所有出現過的軌跡 ID 建立專屬永久模型，並配合「動態能見度開關」，僅在具備有效空間數據的影格才讓其現形。

殘缺骨架 vs. 渲染崩潰: 面對原始 COCO 17 關節點的嚴重特徵遺失與雜訊，捨棄高風險的常規 IK (逆向運動學) 強制綁定。使用「位移與姿態解耦渲染 (Decoupled Rendering)」，位移交由 3D 模型負責，並結合 SkeletonVisualizer 疊加繪製原始連線骨架。既保留 AI 推論瑕疵供人工判讀，又確保虛擬人物不扭曲、不破圖崩潰。

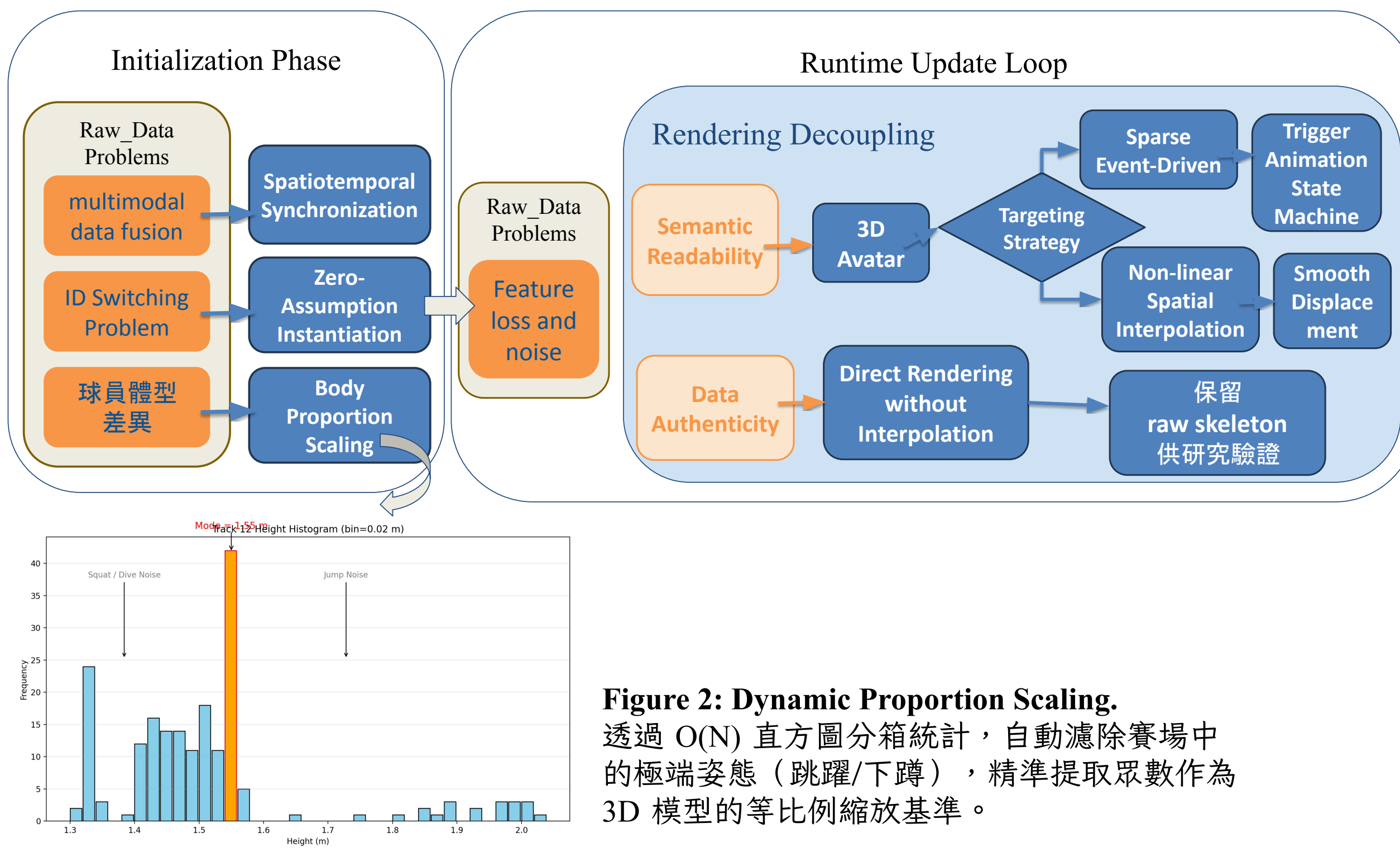


Figure 2: Dynamic Proportion Scaling.

透過 $O(N)$ 直方圖分箱統計，自動濾除賽場中的極端姿態 (跳躍/下蹲)，精準提取眾數作為 3D 模型的等比例縮放基準。

Experiments & Results

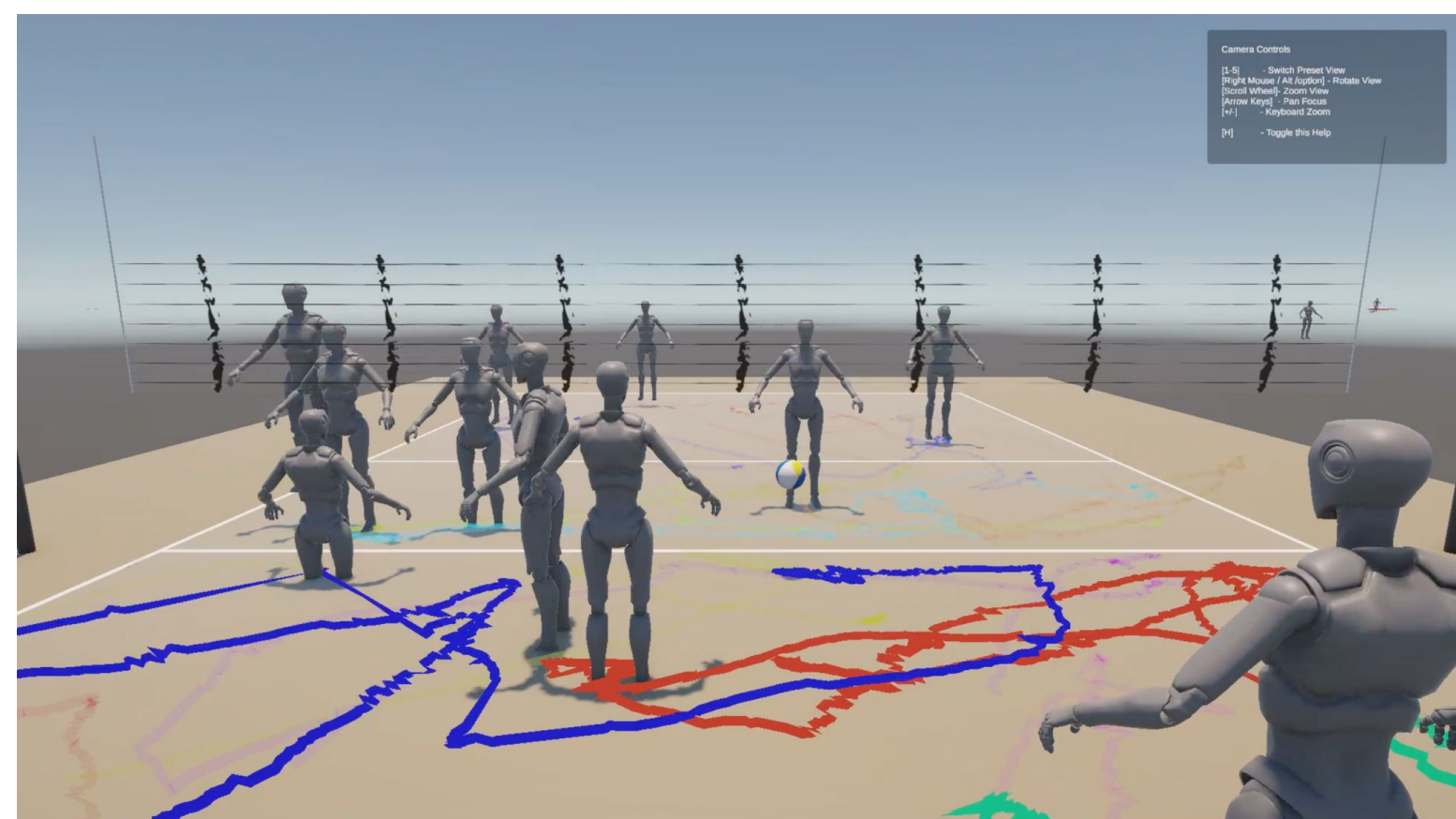


Figure3: Flattened Tactical Point Cloud.

消除 Z-fighting 視覺干擾，直觀呈現特定球員的跑位覆蓋率與戰術熱區。



球可以和模型姿勢完整貼合，重現球場畫面。

並非標準姿勢的動作則會產生誤差。

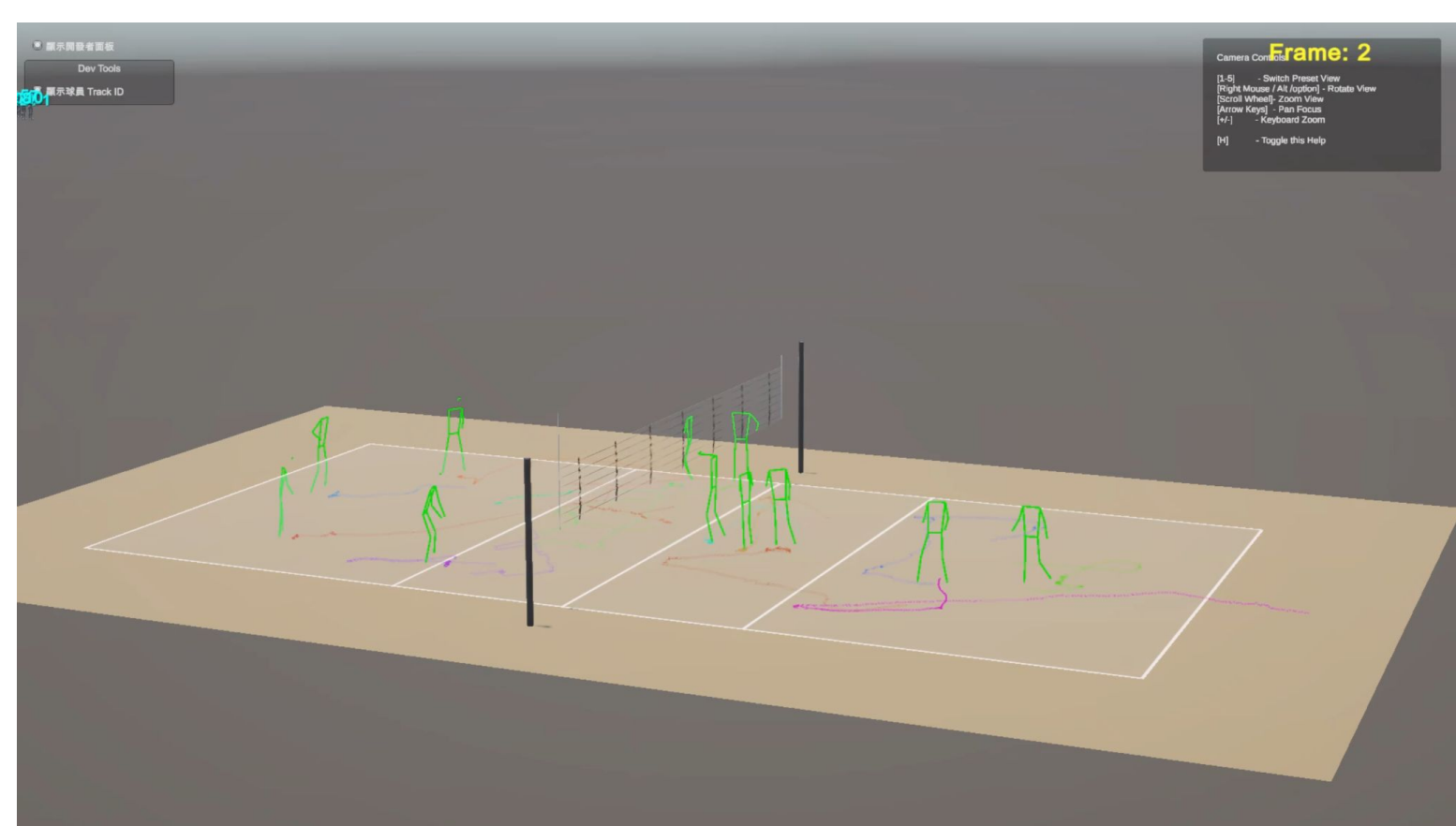


Figure4: SkeletonVisualizer 疊加繪製原始連線骨架

Future Work

- 模型抗幻覺與共識機制 (Mitigating AI Hallucination): 針對 SkateFormer 在極端遮擋下偶發的「高置信度誤判」，未來將導入多視角特徵共識機制 (Multi-view Consensus) 或動態圖神經網絡融合，以提升動作語意推論在雜訊環境下的絕對精準度。
- 全域相機自適應校準 (Global Spatial Calibration): 目前系統利用降維排序繞過了比例尺失真。未來期望整合攝影機外部參數自適應校準演算法，從根本上統一排球與球員之絕對 3D 座標系，實踐更精密的空間碰撞偵測。
- 邊緣即時串流管線 (Real-time Streaming Pipeline): 將現行的離線事件預處理 (Offline Pre-parsing) 升級為區塊化資料流緩衝 (Chunk-based Buffer) 架構，邁向極低延遲的 Live 戰術數位孿生實況平台。