

國立臺灣師範大學資訊工程研究所

碩士論文

Department of Computer Science and Information Engineering

College of Science

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

競速直排輪不良姿勢偵測分析

Speed Skating Poor Posture Detection and Analysis



宋立晴

Sung, Li-Ching

指導教授：李忠謀 博士

Advisor: Prof. Greg Lee, Ph.D

中華民國 114 年 1 月

January 2025

## 摘要

競速直排輪運動要求學員在訓練中保持正確姿勢，以提升運動表現並減少傷害風險。然而，膝蓋與腳踝的常見姿勢問題對初學者的學習造成挑戰。隨著影像處理和人體姿態偵測技術的發展，將這些技術應用於運動姿勢分析為量化學員的姿勢表現提供了新方法，能輔助教學與學習過程。

本研究採用 OpenPose 作為人體姿態偵測工具，結合影像處理與數據分析技術，量化學員在直排輪練習過程中的膝蓋與腳踝角度特徵，並針對特定的姿勢問題進行分類與評估。實驗設計分為四個階段：第一階段開發步伐週期自動偵測系統，透過分析關鍵點座標自動切割完整步伐；第二階段驗證姿勢辨識的準確度，將系統判定結果與教練提供的標準（Ground Truth）進行比對評估系統表現；第三階段分析學員的姿勢表現，通過數據生成針對性的回饋評論；第四階段探討腕部位移與重心偏移的相關性，並利用動態閾值方法檢測滑行過程中的異常幀，分析異常對關節點偵測與姿勢分析的影響。

研究結果顯示，自動步伐偵測系統展現出 75.37% 的 F1 分數，能有效識別大部分的步伐週期，為未來全自動化姿勢分析奠定基礎。在後續的姿勢分析實驗中，為確保判斷的準確性，採用人工標記的步伐進行評估。結合影像處理與姿態偵測技術，可以有效量化學員的滑行姿勢表現，對膝蓋與腳踝等關鍵部位的姿勢特徵進行深入分析，並提供清晰的數據回饋，幫助學員理解與改善不良姿勢。本研究為競速直排輪運動中的姿勢分析提供了系統化解決方案，未來可進一步拓展至其他運動項目與即時偵測應用。

關鍵字：影像處理、深度學習、人體姿態偵測、姿勢分析、競速直排輪

# Abstract

Speed skating requires maintaining proper posture during training to enhance performance and reduce injury risk. Common posture issues in the knees and ankles present challenges for beginners. With advancements in image processing and human pose estimation, these technologies provide a new approach to quantifying posture performance, supporting both teaching and learning.

This study uses OpenPose as a pose estimation tool, integrating image processing and data analysis to evaluate knee and ankle angles during skating practice. The research is divided into four stages: the first develops an automated stride cycle detection system by analyzing key point coordinates; the second validates the system's posture recognition accuracy against coach-provided Ground Truth; the third generates detailed feedback on posture performance; and the fourth explores the relationship between hip displacement and center-of-gravity shifts, using dynamic thresholds to detect abnormalities and assess their impact on joint detection and posture analysis.

Results show that the automated stride detection system achieves an F1 score of 71.13%, effectively identifying most stride cycles. Combining image processing and pose estimation methods can quantify skating posture, analyze key features, and provide actionable feedback to help learners improve. This study offers a systematic approach to posture analysis for speed skating, with potential applications in other sports and real-time systems.

Keywords: image processing, deep learning, human pose estimation, posture analysis, speed skating

# 目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
附圖目錄.....	v
附表目錄.....	vi
1 第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
2 第二章 文獻探討.....	4
2.1 競速直排輪姿勢分析.....	4
2.2 以資訊科技方法改善運動學習.....	5
2.3 人體姿態估計方法.....	6
2.4 BlazePose 評估方法.....	10
2.5 OpenPose 評估方法.....	11
2.6 步伐週期偵測.....	12
3 第三章 研究方法.....	13
3.1 研究架構流程.....	13
3.2 影像資料.....	14
3.3 偵測人體關節.....	15
3.4 步伐週期偵測.....	16
3.5 姿勢判定.....	19
3.6 異常偵測.....	23

3.7 生成評論.....	24
4 第四章 實驗結果與討論.....	26
4.1 影像資料庫.....	26
4.2 實驗一：步伐週期偵測.....	29
4.3 驗證姿勢判定方法.....	30
4.4 實驗結果與討論.....	38
5 第五章 結論與未來展望.....	39
6 參考文獻.....	40



## 附圖目錄

圖 2-1：BlazePose[2]模型的人體關鍵點分布圖 .....	10
圖 2-2：OpenPose[5]系統處理流程圖 .....	11
圖 3-1：競速直排輪姿勢分析系統架構圖 .....	13
圖 3-2：運動攝影機與安全帽連接架設圖 .....	14
圖 3-3：透過架設之攝影機捕捉的畫面 .....	14
圖 3-4：OpenPose[5]人體關節點配置示意圖 .....	15
圖 3-5：OpenPose 關節點偵測結果圖 .....	16
圖 3-6：腳踝節點距離與步伐週期示意圖 .....	16
圖 3-7：步伐週期距離變化軌跡圖 .....	17
圖 3-8：膝關節標準姿勢(左)與內夾姿勢(右)比較圖 .....	20
圖 3-9：膝關節運動參數角度分布統計圖 .....	21
圖 3-10：腳踝標準姿勢(左)與外八姿勢(右)對比圖 .....	21
圖 3-11：腳踝運動參數角度分布統計圖 .....	22
圖 3-12：髖部位移異常偵測圖 .....	23
圖 3-13：姿勢分析結果圖 .....	24
圖 3-14：姿勢總結果圖 .....	24
圖 3-15：評論生成結果圖 .....	25
圖 4-1：GoPro 運動攝影機與安全帽連接架設圖 .....	26
圖 4-2：配戴攝影機的實際情況 .....	27
圖 4-3：攝影機最佳拍攝角度示意圖 .....	27
圖 4-4：步伐切分時間點比較圖 .....	30
圖 4-5：系統給予評論結果 .....	35

## 附表目錄

表 4-1：實驗對象詳細資料 .....	28
表 4-2：實驗對象詳細資料 .....	28
表 4-3：膝關節姿勢判斷混淆矩陣 .....	31
表 4-4：踝關節姿勢判斷混淆矩陣 .....	31
表 4-5：標準步伐比例與系統評論對應關係 .....	33
表 4-6：不標準姿勢頻率與細部評論對應關係 .....	33
表 4-7：系統評論與教練評語對照分析 .....	34
表 4-8：學生學習經驗與晃動比例關係分析 .....	36



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

競速直排輪運動在台灣蓬勃發展，根據教育部體育署 111 學年度統計年報顯示，全國國小運動社團中，以設立滑輪溜冰之學校最多，總計 943 隊，共有 839 所學校成立，佔全國國小總數的 31.46%。研究指出，直排輪運動對於學童的平衡能力與下肢肌耐力有顯著的提升效果[1]。然而，從休閒直排輪進階至競速直排輪的過程中，學習者常因設備的差異性而面臨技術瓶頸。競速直排輪鞋具有獨特的結構設計，使得動作控制難度顯著提升，導致學習者在姿勢控制上經常出現系統性的錯誤。

競速直排輪作為一項高速運動，其技術體系可分為起跑、直線與彎道三個階段，每個階段都需要精確的姿勢控制和持續的技術練習。正確的姿勢不僅是提升競速表現的關鍵，更是預防運動傷害的重要基礎。特別是在維持蹲姿滑行時，膝關節與雙腳的穩定控制對初學者的進步尤為重要。然而，現行的訓練模式存在明顯的局限性：學習者往往無法即時察覺自身姿勢的問題，而教練的即時回饋也受到場地大小和注意力分散等客觀條件的限制。

傳統的競速直排輪訓練主要依賴教練的經驗觀察和口頭指導，這種方式存在幾個關鍵問題：首先，學習者因無法看到自己的動作，難以建立準確的身體意識；其次，教練的主觀判斷缺乏量化標準，難以提供精確的改進建議；最後，在自主練習或團體訓練時，由於缺乏即時回饋，練習效果往往事倍功半。張詠岱[2]指出，持續以錯誤姿勢練習不僅會導致動作模式固化，更可能增加運動傷害的風險。這些挑戰凸顯了競速直排輪訓練中技術指導與回饋機制的重要性。

目前，運動科技的發展為解決上述問題提供了新的可能。深度學習技術在人體姿態估計領域的突破，使得透過影像分析進行動作評估成為可能。然而，檢索現有文獻發現，尚未有研究將這項技術應用於競速直排輪訓練中，更凸顯了開發針對競速直排輪的科技輔助方法的重要性。

根據以上，本研究提出競速直排輪學生於練習時能更清楚得知自身姿勢錯誤的應用，利用深度學習偵測學生骨架及關節點位置，加以分析評估學生姿勢，學生方能透過有別於傳統僅依靠教練的方式，以資訊科技作為輔助，了解自身需矯正的姿勢，以提升學習品質，並降低因姿勢錯誤造成運動傷害的不良影響。



## 1.2 研究目的

此研究探討競速直排輪動作分析中的姿勢偵測和評估問題。透過結合人體姿態估計技術與運動生物力學分析，研究目標在於解決初階競速直排輪學習者在姿勢控制與技術改進上所面臨的挑戰。

研究重點著重於建立競速直排輪姿勢評估的量化指標，包含膝關節及腳踝等關鍵技術動作的分析方法。透過分析運動過程中的姿勢穩定性，探討重心控制與下肢關節協調的量化評估方式。同時，驗證自動化姿勢分析在競速直排輪訓練中的應用價值和可行性。

研究成果預期將為競速直排輪訓練建立客觀的技術評估方法，並為運動科技在傳統運動訓練中的應用提供新的研究方向。這些發現能協助改善現有的訓練評估方式，為運動訓練的科學化發展提供理論基礎。



## 第二章 文獻探討

本章節系統性地回顧並分析與競速直排輪姿勢及人體姿態估計相關的研究文獻。透過深入探討現有研究成果，不僅能夠理解競速直排輪訓練的特殊需求，也能評估現有技術在解決這些需求上的可能性與限制。

### 2.1 競速直排輪姿勢分析

競速直排輪要求學習者掌握精確的姿勢控制，這種技能的養成需要長期且系統化的訓練。初學者通常每週進行一到兩次、每次約 90 分鐘的訓練，內容涵蓋基本姿勢、肌耐力訓練，以及起跑、直線、轉彎等專項技術的加強。在轉換至競速直排輪鞋的初期，學習者普遍面臨蹲不低、膝蓋內夾或抖動、重心不穩、踩刃錯誤和腳踝外八或施力錯誤等技術問題，且往往難以準確感知自身姿勢與標準動作間的差異。

競速直排輪的技術理論研究主要聚焦於姿勢的生物力學分析。Allinger 和 Bogert 等人[1]指出，競速直排輪選手在滑行期間應保持膝關節 90 度至 100 度的屈曲角度，此角度能降低空氣阻力並確保推蹬力量的傳導。王俊盛等人[20]的分析發現，有效的推蹬動作應與前進方向保持垂直，且踝關節需維持 50 度至 70 度的角度，以確保力量傳遞和滑行穩定性。

李凱文[21]研究膝關節內夾現象，發現此技術缺陷導致生物力學問題：長期的膝關節內夾造成髕骨關節壓力改變，引發關節兩側軟組織及生物力學的失衡，增加膝骨性關節炎的風險。

Cambridge 等人[3]與 Lewis 等人[12]提出使用彈力束帶改善姿勢。研究發現將彈力束帶綁在雙腿之間，給予大腿內收力量，能刺激相關肌群，改善膝關節內夾。然而此矯正方式無法應用於實際滑行過程，且學習者在定點矯正後，回到場上練習時仍可能回歸錯誤姿勢。

目前訓練主要依賴教練場邊觀察和口頭指導，面臨三個問題：教練難以同時關注多名學習者的動作細節；學習者缺乏即時視覺回饋；缺乏量化標準使技術改進過程較為模糊。

基於上述研究結果，結合影像分析技術的量化評估方法，可為競速直排輪訓練提供新的輔助工具幫助學習者更快速地掌握正確的技術要領。

## 2.2 以資訊科技方法改善運動學習

近年來，資訊科技在運動訓練領域的應用日益廣泛，多項研究證實科技輔助能提升運動學習效果。透過回顧相關研究，顯示此領域在各項運動中的具體應用。

在棒球運動領域，李詠哲[22]建立人體姿勢模型的打擊動作評估系統。該系統透過偵測髖部及肢體角度，結合權重設定評估打擊姿勢準確度。此研究實現動作評分量化，將資訊科技應用於運動情境。

游泳運動的研究方面，魏崇名[27]建立分析系統，用於分析運動員的髖關節角度、速度、跳水距離及滑頻滑距等參數。透過數據分析使選手能在練習後檢視表現，進行技術改進。

在飛鏢運動中，高翊捷[25]結合六軸感應器與即時影像辨識技術，建立姿勢分析系統。該系統分析飛鏢位置、手腕角度及手臂擺動速度，提供即時技術回饋，改變傳統依賴經驗的訓練模式。

姚述杰[28]在高爾夫球運動中應用紅外線攝影技術，研究選手在不同揮桿階段的姿勢控制參數。研究結果顯示準備期和上桿期的姿勢控制能力與擊球速度呈現正相關，為選手提供技術改進依據。

綜觀這些研究，資訊科技在運動訓練中提供動作分析、即時回饋、評估標準等功能。隨著深度學習技術發展，人體姿態估計成為運動學習的重要技術工具。目前這些技術在競速直排輪訓練領域的應用較少。由於競速直排輪運動的技術特性，需要針對其特定需求發展適合的分析方法。

## 2.3 人體姿態估計方法

人體姿態估計作為電腦視覺研究的基礎領域之一，在近年來取得了顯著的進展。隨著深度學習技術的發展，基於視覺的人體姿態估計不僅在準確度上有了突破性提升，在實時性能方面也達到了實用水準。這項技術的進步為運動訓練的科技化提供了堅實的技術基礎。

在運動表現分析方面，Jeroen 等人[18]的研究提供了一個重要的參考案例。他們運用 IMU 和壓力感測器等穿戴式裝置，建立了一套完整的滑冰選手性能測量系統。該系統不僅能夠產生詳細的頻率曲線以分析訓練細節，更重要的是，研究發現訓練後的深入分析對提升選手表現具有關鍵作用。

就技術層面而言，基於深度學習的人體姿態估計可分為二維和三維兩個主要研究方向。二維人體姿態估計[15]專注於從圖片或影片中計算人體關節點的平面坐標，這種方法在計算效率和實用性方面具有明顯優勢。相較之下，三維人體姿態估計[7]雖然能提供更完整的空間資訊，但往往需要複雜的設備配置和特殊的環境要求。

近年來，二維人體姿態估計技術在多個領域展現出實際應用價值。柯錦文等人[24]利用 Kinect 系統開發了步態分析應用，成功實現了日常步態的矯正功能。同時，在運動科學領域，透過紅外線高速攝影機的多角度拍攝，已能夠精確記錄和分析運動員的動作細節。然而，這些傳統方法在複雜環境中往往面臨準確度和即時性的挑戰。

隨著深度學習技術的進步，二維姿態估計的應用範圍進一步擴大。根據估計對象的數量，這類技術可細分為單人姿態估計和多人姿態估計兩個分支。單人姿態估計從早期基於圖結構模型的方法[10]，發展到現今基於深度學習的方案[17]，在準確度和實用性方面都取得了顯著進展。

多人姿態估計則面臨更大的技術挑戰。除了需要準確定位關節點外，還必須解決關節點歸屬問題，即判斷哪些關節點屬於同一個人。目前的研究主要沿

著自上而下 (Top-down) [11]和自下而上 (Bottom-up) [4]兩個方向展開，各有其優勢和局限性。

在這些技術發展的基礎上，考慮到競速直排輪訓練的實際需求，需要在準確度和實用性之間找到最佳平衡點，選擇著重探討最適合競速直排輪運動特性的姿態估計方法。

### 2.3.1 姿態估計問題

人體姿態估計 (Human Pose Estimation, HPE) 的核心在於建立準確的人體模型。隨著深度學習技術的發展，現代 HPE 研究主要分為二維和三維兩個主要方向，各自針對不同的應用場景提供解決方案。本節將深入探討這兩種方法的特點及其在實際應用中的考量因素。

二維人體姿態估計專注於從單一視角的影像中推算人體關節點的平面座標。這種方法的優勢在於實作門檻相對較低，僅需要普通的 RGB 相機即可實現。近年來，基於深度學習的方法使二維姿態估計的準確度有了顯著提升，使其在實際應用中展現出極高的性價比。特別是在運動分析等領域，二維姿態估計能夠提供足夠準確的動作資訊，同時保持系統的輕量化和易用性。

相對而言，三維人體姿態估計致力於重建人體關節點的空間座標，提供更完整的立體運動資訊。Qiu 等人[16]的研究展示了使用多視角融合技術實現三維重建的可能性。然而，這種方法需要複雜的硬體設置，如 Xia 等人[19]採用的深度相機系統。更重要的是，目前的三維估計系統往往需要在人體特定位置加裝標記點，且多限制在室內環境使用，這些限制降低了其在實際運動訓練中的適用性。

### 2.3.2 二維人體姿態估計

二維人體姿態估計技術在實際應用中已展現出廣泛的價值。在醫療康復領域，柯錦文等人[24]開發的 Kinect 步態分析系統成功實現了患者康復進度的量化評估。該系統提供客觀的數據參考，為日常步態矯正提供可行的解決方案。這種應用展示了二維姿態估計在精確度要求較高場景中的潛力。

在運動科學領域，利用多台紅外線高速攝影機進行動作捕捉和分析，可記錄運動員的動作細節。這種方法提供動作資料，但由於設備需求和環境限制，較難應用於日常訓練中。

隨著深度學習技術的進步，傳統姿態估計方法的諸多限制得到了有效改善。特別是在處理複雜背景和多人場景時，基於深度學習的方法展現出優勢。當前的研究重點主要集中在單人姿態估計和多人姿態估計兩個方向，這種分類不僅反映了技術發展的階段性，也代表了不同應用場景的實際需求。

在競速直排輪運動的特定場景中，選擇適當的姿態估計方法需要綜合考慮多個因素。首先，運動過程中的高速移動和姿勢變化要求系統具備足夠的處理速度。其次，戶外訓練環境的複雜光線條件和背景變化，對系統的強健性（robustness）提出了更高要求。最後，考慮到實際應用的可行性，系統應當儘量降低硬體需求，以便於推廣使用。

這些考量因素都指向了採用基於深度學習的二維姿態估計方法的合理性，能滿足技術需求，也能確保系統在實際訓練中的可用性和效果。在此基礎上，本研究將進一步探討如何最佳化和改進現有方法，以更好地服務於競速直排輪訓練的特定需求。

### 2.3.3 二維多人姿態估計

二維多人姿態估計技術在處理複雜場景和多人互動時面臨著獨特的挑戰。相較於單人姿態估計，多人情境下不僅需要定位各個關節點，還需要解決關節點的歸屬判定問題。目前的研究主要沿著自上而下（Top-down）和自下而上（Bottom-up）兩種技術路線發展，各自展現出不同的優勢與應用特點。

自上而下的方法採用兩階段處理策略，首先透過人體檢測器辨識畫面中的所有人體，再針對每個檢測到的人體進行單人姿態估計。Iqbal 等人[11]的研究展示了這種方法在理想條件下的可靠性。然而，此方法的效能受限於人體檢測的準確度，特別是在人體相互遮擋的情況下，檢測效果往往不盡理想。儘管 Fang 等人[9]透過參數化姿態和線性規劃最佳化，改善了擁擠場景下的檢測問題，但系統的即時性和運算效率仍然受到影響，尤其是在畫面中人數增加時，處理時間會隨之顯著增加。

自下而上的方法則採取不同的策略，先在整體畫面中偵測所有關節點，再進行分類與組合，重建出個別人體的姿態。Cao 等人[4]提出的方法展現了這種技術路線的優勢。這種方法雖然在處理遮擋問題時仍有改進空間，但在計算效率方面表現出色，特別是在需要即時處理的應用場景中具有明顯優勢。

針對複雜背景和關節點遮擋的問題，Chen 等人[8]提出了金字塔網路架構，結合 GlobalNet 和 RefineNet 兩個子網路。這種設計能夠有效定位容易觀測的關節點，如眼睛和手腕等，但在處理被遮擋的關節點時仍面臨挑戰。Newell 等人[14]則提出關聯嵌入（Associative Embedding）的概念，透過為每個關節點生成標記熱圖，實現關節點的分組與人體重建，為多人姿態估計提供了新的技術思路。

在眾多技術方案中，Cao 等人[5]開發的 OpenPose 系統特別值得關注。該系統透過卷積神經網路（CNN）架構，結合關節點置信圖（Confidence Map）和部分關聯場（Part Affinity Fields, PAF）兩種特徵，實現了穩定可靠的肢體預

測。更重要的是，這套系統在複雜背景和多人場景下仍能維持良好的準確度和處理速度，展現出極強的實用性。

自下而上方法的優勢在於其較快的處理速度，多項研究證實這類方法能達到即時運算的要求。然而，值得注意的是，當場景中的人數增加時，系統的處理效能仍會受到影響，這一特性在設計實際應用時需要特別考慮。

對於競速直排輪運動的特定應用場景，考量到訓練時通常需要同時觀察多名學員的動作，且可能出現局部遮擋的情況，自下而上的處理方法更為適合。

## 2.4 BlazePose 評估方法

BlazePose 為 Google 於 2020 年發表的單人姿態偵測模型[2]，採用機器學習方法從單一影格判斷人體關鍵座標位置。如圖 2-1 所示，BlazePose 模型追蹤 33 個人體關鍵點，包含面部特徵至四肢關節的人體架構。此模型在圖形處理器 (GPU) 運算下達到即時運算效能。

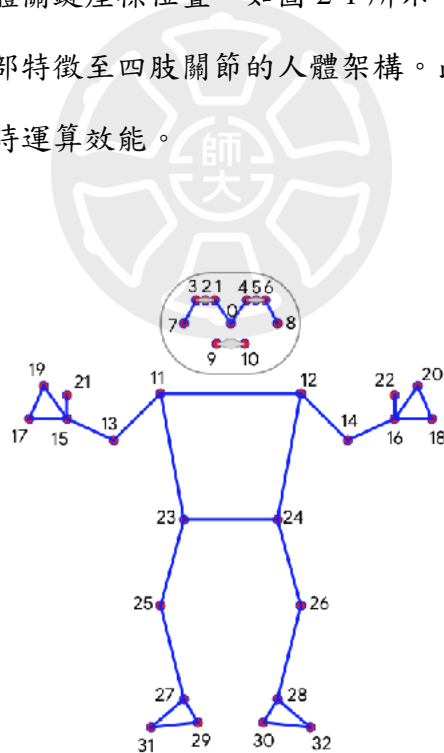


圖 2-1：BlazePose[2]模型的人體關鍵點分布圖

圖 2-1 中，BlazePose 模型的關鍵點包含：面部(0-10)、上肢(11-22)、軀幹(23-24)及下肢(25-32)，構成人體骨架結構。BlazePose 的偵測策略先對人臉進行

偵測，再延伸至全身姿態估計。研究發現在密集人群或局部遮蔽場景中，人臉區域較少受到干擾，因此以人臉作為初始辨識目標建立人體姿態模型。

網路架構包含關鍵點偵測 (keypoints detection) 和關鍵點迴歸 (keypoints regression) 兩組件。訓練階段透過特徵 (feature) 連結同時訓練，實際應用時僅保留關鍵點迴歸部分，以提升運算效率。但在高速移動或複雜技術動作下關節的精確度有限。

## 2.5 OpenPose 評估方法

OpenPose 由卡內基美隆大學(Carnegie Mellon University, CMU)感知計算實驗室開發，使用 RGB 影像即可進行人體關節點定位。相較於 Kinect 系統需同時運用紅外線與 RGB 雙鏡頭進行影像擷取，OpenPose 不受感測範圍限制，適用於各類姿勢評估場景。Nakai 等人[13]運用 OpenPose 分析籃球罰球動作；Chen 等人[6]透過分析關節下降速度、人體中心線與地面夾角等參數，建立跌倒偵測系統。

圖 2-2 呈現 OpenPose[5]的處理流程：系統接收輸入影像後，透過卷積神經網路 (CNN) 整合關節點置信圖 (Confidence Map) 與部分關聯場 (Part Affinity Fields, PAF)。使用偶匹配 (Bipartite Matching) 演算法建立關節點連結關係，再透過匈牙利演算法 (Hungarian Algorithm) 完成多人姿態解析。

部分關聯場 (PAF) 的設計使系統能處理遮蔽與複雜背景的情況。此特性適用於競速直排輪運動中的快速移動和肢體遮蔽場景，且能同時處理多人影像，因此選用 OpenPose 進行姿態估計。

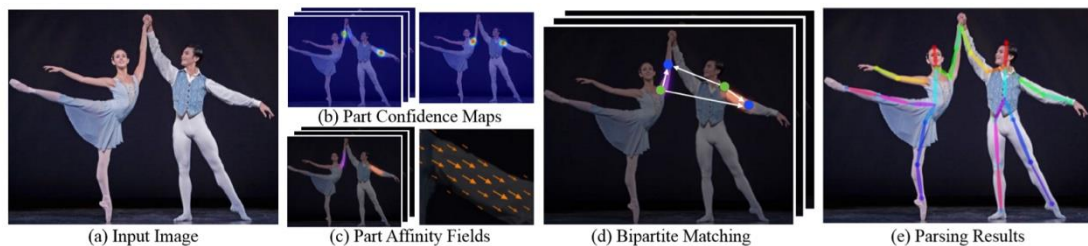


圖 2-2：OpenPose[5]系統處理流程圖

## 2.6 步伐週期偵測

步伐週期偵測是人體運動分析中的重要研究方向。吳郁樟[29]提出了一種基於步態特徵的步伐週期識別方法，為本研究提供了方法論啟發。該研究指出，在人體行走過程中，步伐週期具有明顯的週期性特徵，每經過一個步態週期，雙腿會做一次交叉，此時腳踝關節的距離將會是最接近的。研究利用人體姿態估計模型識別出人體腳踝的位置，通過計算兩個腳踝節點座標的距離，準確判斷步行週期的開始與結束。

這種方法的創新之處在於將步態週期的判定轉化為一個可量化的問題。透過追蹤腳踝關節的相對位置，建立了無需額外設備的步伐週期自動偵測。這種方法的優點在於：將複雜的步態週期偵測問題簡化為可追蹤的關節點距離變化、無需額外的感測設備，僅依賴影像處理技術，以及建立了通用的步伐週期自動偵測技術框架。

本研究從[29]獲得了關鍵啟發：步伐週期偵測可以基於關節點的空間位置變化進行。不同於步行，競速直排輪的步伐週期更為複雜，但底層偵測邏輯相似。本研究進一步發展適用於競速直排輪的步伐週期偵測方法，主要改進包括考慮競速直排輪特有的推進和收回兩個階段，引入更複雜的峰值和谷值篩選機制、引入動態閾值篩選機制，處理實際運動中的雜訊數據，以及考慮競速直排輪運動的特殊性，調整步伐週期判定策略。

這種方法不僅可以應用於競速直排輪，還為其他需要進行運動週期分析的領域提供了方法論參考。

## 第三章 研究方法

本章旨在詳細說明本研究所開發的競速直排輪姿勢分析系統。此系統基於人體姿態估計技術，目的在於協助學員在自主練習過程中進行姿勢校正。

### 3.1 研究架構流程

此章說明競速直排輪姿勢分析系統的設計與實作方法。系統利用人體姿態估計技術，協助學員在自主練習過程中進行姿勢校正。章節內容包含整體架構設計、資料收集流程、步伐週期偵測、姿勢判定方法、異常偵測機制，以及評論生成策略。

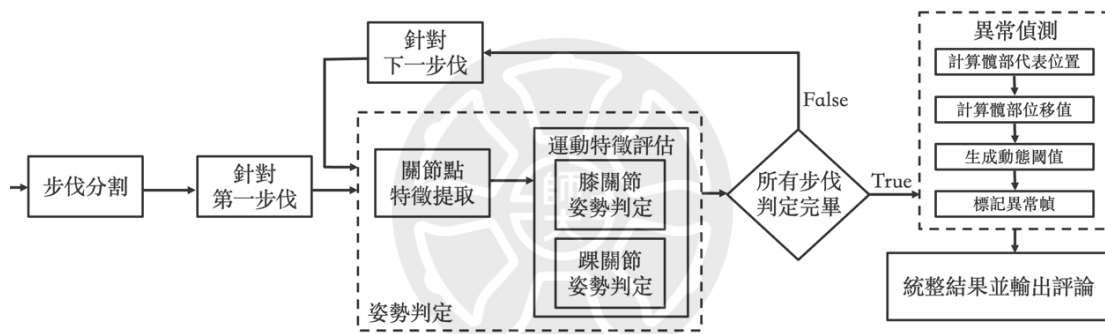


圖 3-1：競速直排輪姿勢分析系統架構圖

系統架構如圖 3-1 所示。透過固定於學員安全帽上的運動攝影機，以每秒 30 幀的取樣速率記錄訓練過程的正面影像。此架設方式確保影像穩定性，並完整捕捉下肢動作。

收集的影像資料首先進入步伐週期自動偵測模組，透過分析關節點座標數據來識別完整的步伐週期。接著，為了確保姿勢判斷的準確性，在後續的姿勢分析實驗中，採用人工標記的步伐進行評估。分析重點著重於初學階段常見的膝關節內夾及腳踝外八等技術問題，這些技術問題的選擇是來自於教練的實踐經驗與場外實際觀察統計而來。系統對這些姿勢進行判定，並執行異常偵測以評估重心穩定性。最後根據分析結果產生評論回饋，提供學員技術改進建議。

## 3.2 影像資料

影像資料的品質對姿勢分析系統的效能具有關鍵影響。本研究將運動攝影機透過可調式支架固定於學員的安全帽上（如圖 3-2 所示）。此架設方式確保影像擷取的一致性，能夠完整記錄學員的髖關節以下動作。攝影機的架設角度經調整，以在學員維持競速直排輪標準蹲姿時，完整捕捉下肢關節點。



圖 3-2：運動攝影機與安全帽連接架設圖



圖 3-3：透過架設之攝影機捕捉的畫面

圖 3-3 顯示透過此架設方式所捕捉的競速直排輪動作影像。從影像中可見下肢關節點包含髖關節、膝關節至腳踝皆完整呈現。此拍攝角度能夠確實記錄學員在滑行過程中的姿勢變化，有助於後續的動作分析。此外，這種架設方式較不會影響學員的正常訓練動作，確保了所收集資料的真實性與代表性。

### 3.3 偵測人體關節

人體姿態估計使用 OpenPose 骨架資料偵測關節點位置。如圖 3-4 所示，OpenPose 可定位 25 個人體關節點，其偵測結果以 JSON 格式輸出，記錄每一影格中各關節點的座標資訊。

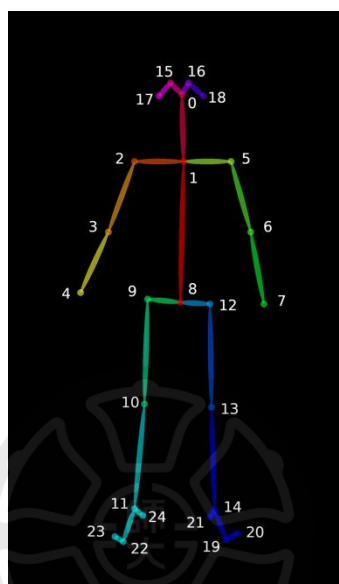


圖 3-4：OpenPose[5]人體關節點配置示意圖

在實際應用中，特別關注髖關節以下的關節點群組。此選擇基於競速直排輪的關鍵技術動作主要反映在下肢表現上，限縮分析範圍可提升運算效率和判斷準確度。系統從每一影格中擷取這些關鍵關節點的座標資訊，作為後續姿勢分析的基礎資料。

在關節點偵測過程中，考慮運動過程中可能出現的遮蔽情況，系統採用 OpenPose 的部分關聯場(PAF)技術進行追蹤。同時，針對快速移動導致的動態模糊問題，透過調整取樣頻率和影像品質參數進行處理。當關節點的置信度低於預設閾值時，系統標記該影格以便後續處理。

圖 3-5 呈現透過架設之攝影機所捕捉的競速直排輪動作畫面，並標示 OpenPose 辨識出的關節點位置。在影像中可觀察到系統成功識別出髖部、膝關節及足部等下肢關鍵點，這些座標資訊將用於後續的姿勢分析。



圖 3-5：OpenPose 關節點偵測結果圖

### 3.4 步伐週期偵測

如圖 3-6 所示，競速直排輪的步伐可以分為推出和收回兩個階段。每個階段單腿會做一次的推出，此時腳踝關節的距離將會是最遠的；以及一次單腿收回，此時腳踝關節的距離將會是最接近的。利用 OpenPose 人體姿勢演算法識別的腳踝位置，用左右腳兩個腳踝節點座標計算歐幾里得距離，判斷步伐的開始與結束，得到一個步伐週期。

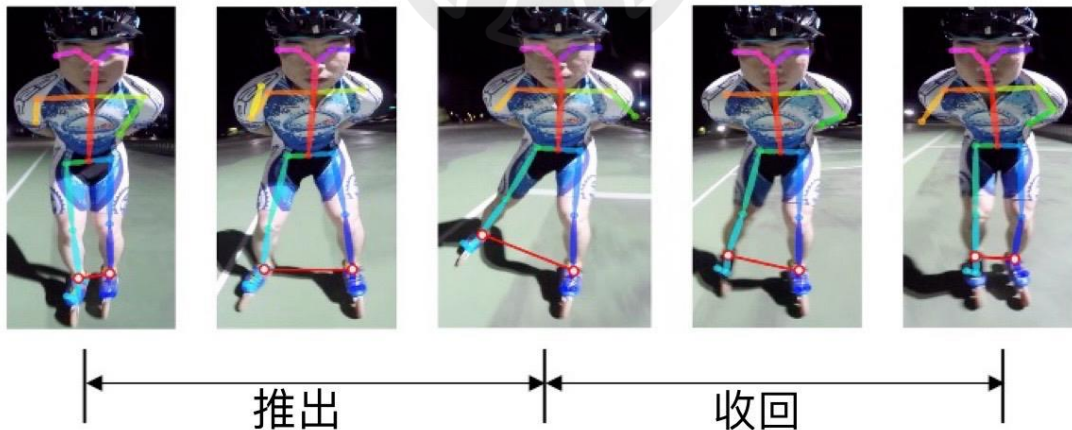


圖 3-6：腳踝節點距離與步伐週期示意圖

圖 3-7 繪製整段影片中腳踝節點的距離變化軌跡，可以清楚看出週期性的推出和收回兩個階段。圖中綠線表示經過平滑處理後的左右腳踝距離變化曲線，黑色虛線為整段影片的腳踝平均距離，紅色虛線和藍色虛線分別為動態閾值的上限 (upper threshold)和下限 (lower threshold)，用於識別有效的峰值和谷

值。當運動員推進時，左右腳會達到最大分開距離，對應圖中的峰值（紅點）；而在收回階段，左右腳的距離會達到最小值，對應圖中的谷值（藍點）。

在實際的步伐資料中，腳踝距離變化並非總是呈現完美的峰谷交替模式。有時會出現連續的峰值或谷值，如圖 3-7 中的藍點及紅點皆出現多次重疊現象，這是因為在腳收回過程中出現不完全的併攏動作，或是因為持續滑行而腳出現小幅度的距離波動，亦或推出過程中沒有一次將腳推到最直造成的。為了處理這種情況，設計了一套峰谷值篩選機制。

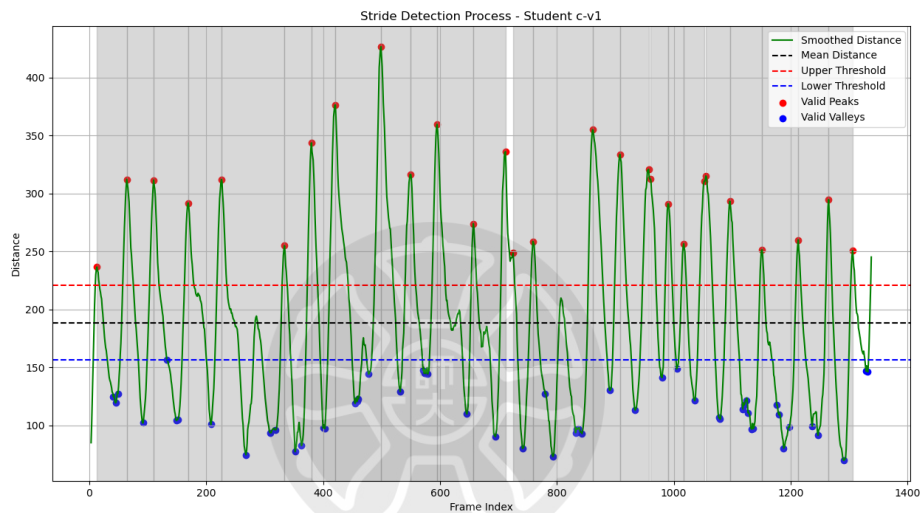


圖 3-7：步伐週期距離變化軌跡圖

步伐週期偵測算法採用了局部極值檢測策略，旨在準確識別競速直排輪運動中步伐週期的起始和結束點。在偵測過程中，首先對左右腳踝節點距離的變化曲線進行分析，重點關注局部極小值 (local minima) 和局部極大值 (local maxima) 的特徵。當系統檢測到一系列連續的局部極小值時，通過深入比較這些極小值的深度，選擇最小的值作為該步伐週期的起始點。這一方法建立在運動學的假設基礎上：運動員在收回腳部過程中可能存在多次微小的併攏動作，但真正完成完整收回動作的時刻，左右腳距離將達到最小值。

類似地，在檢測到連續的局部極大值時，算法將比較這些極大值的高度，並選擇其中最大的值作為步伐推進階段的參考點。這一策略揭示了競速直排輪運動的內在運動學特徵：儘管運動過程中存在多次距離波動，但完整的推進動

作將使兩腳距離達到最大值。通過這種精確的局部極值篩選方法，系統能夠有效區分真正的步伐週期，而不會被運動過程中的微小波動所干擾。

偵測流程採用了一種系統性的時間軸搜索策略。首先確定一個有效的局部極小值作為步伐週期的起始點，這標誌著運動員開始進入推出階段。隨後，算法沿時間軸向前搜索，直到找到一個對應的局部極大值，此時標誌著推進階段的結束、收回階段的開始。緊接著，系統繼續向前搜索，當找到下一個局部極小值時，即判定為該步伐週期的結束。這種基於局部極值的交替搜索方法能有效處理競速直排輪運動中複雜且多變的距離變化模式，顯著提高了步伐切分的準確性。



## 3.5 姿勢判定

競速直排輪運動對姿勢的精確控制有極高要求，尤其是在膝關節與腳踝的協調性方面。透過分析這些關節的運動參數角度特徵，建立姿勢判定的量化標準，為教練的主觀經驗提供依據。

### 3.5.1 關節點特徵擷取

根據競速直排輪的特性，著重分析膝關節與腳踝的動作表現。對初學者而言，保持膝關節與腳尖在同一直線上，以及維持適當的腳踝角度，是建立正確技術的關鍵。系統從 OpenPose 偵測的結果中，選取了十個關鍵點進行分析，包括左右髖關節、膝關節、腳踝、腳跟及腳內側點。這些關鍵點的座標以向量  $X$  表示如下：

$$X \in \{ x_{hl}, y_{hl}, x_{hr}, y_{hr}, x_{kl}, y_{kl}, x_{kr}, y_{kr}, x_{al}, y_{al}, x_{ar}, y_{ar}, x_{stl}, y_{stl}, x_{str}, y_{str}, x_{btl}, y_{btl}, x_{btr}, y_{btr} \}$$

其中， $(x_{hl}, y_{hl})$  表示左髖關節座標， $(x_{hr}, y_{hr})$  代表右髖關節座標，以此類推分別標示左右膝關節(k)、腳踝(a)、腳跟(st)及腳內側(bt)的位置座標。

基於這些關鍵點資訊，將姿勢狀態分為五類：標準姿勢（狀態 0）及四種需要改進的姿勢（狀態 1 至 4）。需改進的姿勢包括左膝關節內夾、右膝關節內夾、左腳踝外八及右腳踝外八。每一幀影像依據姿勢特徵被標記為這五種狀態之一，用以記錄學員在滑行過程中的姿勢變化。

### 3.5.2 運動特徵評估

為了分析學員的運動表現，針對膝關節與踝關節的運動參數角度變化建立評估標準。在專業教練的協助下，制定了膝關節與踝關節動作的評估參數，作為姿勢分析的依據。

### 3.5.3 膝蓋姿勢決策參數

在競速直排輪滑行過程中，膝關節與腳尖的對齊是確保正確施力的關鍵。如圖 3-7 所示，透過參數化模型定量分析膝關節姿勢，建立客觀的判定標準。圖中左側展示了標準的膝關節姿勢，標準姿勢中膝關節與腳尖保持一直線，圖中右側為常見的內夾問題，可看出姿勢出現明顯偏離。



圖 3-8：膝關節標準姿勢(左)與內夾姿勢(右)比較圖

為了精確定義膝關節運動參數角度 $\theta_k$ ，採用餘弦定理進行計算。使用髌部(h)、膝關節(k)及腳踝(a)的二維座標，計算出三個關鍵距離：髌膝距離 $d_{hk}$ 、膝踝距離 $d_{ka}$ 以及髌踝距離 $d_{ha}$ 。膝關節運動參數角度的計算方式如方程式(1)所示。

$$\theta_k = \arccos\left(\frac{d_{hk}^2 + d_{ka}^2 - d_{ha}^2}{2d_{hk}d_{ka}}\right) \quad (1)$$

分析訓練影片中的姿勢樣本，收集正確姿勢與左、右膝關節內夾各 1000 筆資料。圖 3-8 呈現這些樣本的運動參數角度分布狀況：深藍色為正確姿勢、淺藍色為右膝內夾、橘色為左膝內夾。根據競速直排輪專業教練的建議，標準推蹬姿勢下膝關節彎曲應維持在 160-180 度之間，考慮到運動過程中的動態變化，設定 200 度作為上限，圖中綠色虛線標示 200 度的臨界位置。

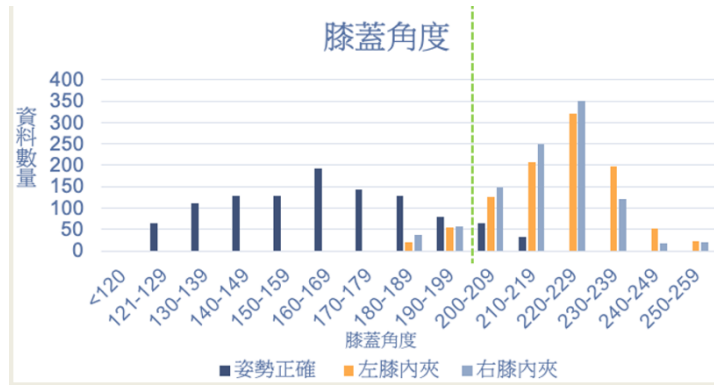


圖 3-9：膝關節運動參數角度分布統計圖

### 3.5.4 腳踝姿勢決策參數

腳踝姿勢的正確性對於維持有效的推蹬動作和穩定的滑行是必需的。推蹬動作完成後，腳尖與行進方向的平行保持是確保動作流暢性的關鍵因素。圖 3- 所示為標準腳踝姿勢與外八姿勢的典型對比，展示了標準姿勢中腳尖如何與行進方向平行，而外八姿勢則顯示了腳尖明顯的偏離。



圖 3-10：腳踝標準姿勢（左）與外八姿勢（右）對比圖

在數據驗證方面，分析 1000 筆標準姿勢和 1000 筆外八姿勢的樣本。標準姿勢的運動參數樣本角度主要分布在 160 度至 219 度之間，而外八姿勢的運動參數樣本角度則集中在 220 度以上。腳踝角度的計算方式如方程式(2)所示。

$$\theta_a = \arccos\left(\frac{d_{ka}^2 + d_{ai}^2 - d_{ki}^2}{2d_{ka}d_{ai}}\right) \quad (2)$$

其中， $d_{ka}$ 是膝蓋到腳踝的距離， $d_{ai}$ 是腳踝到腳內側的距離，而 $d_{ki}$ 是膝蓋到腳內側的距離。透過對訓練影片中的姿勢樣本進行分析，收集了各種姿勢正確與外八姿勢各 1000 筆，並在圖 3-10 中展示了這些樣本的運動參數角度分布情況，其中藍色代表標準姿勢，橘色代表外八姿勢，綠色虛線標示了 220 度的臨界位置。分析結果顯示，當踝關節運動參數角度小於此臨界值時，姿勢符合標準要求，從而確定 220 度作為判斷標準。

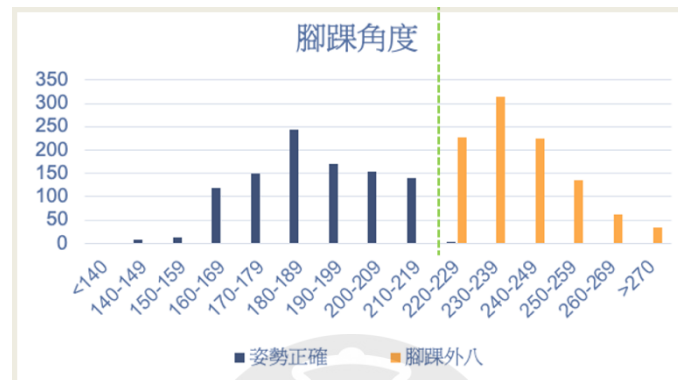


圖 3-11：腳踝運動參數角度分布統計圖

### 3.6 異常偵測

在競速直排輪訓練過程中，重心的穩定控制對技術動作的完成至關重要。分析影像資料時發現，學員在換腳時的重心轉換不穩定可能導致攝影機晃動，進而影響關節點的偵測結果。為評估重心穩定性，據此建立髖部位移分析的異常偵測方法。異常偵測分為四個步驟。首先以左右髖關節的中心點作為髖部代表位置，並將其作為重心的參考點，計算方式如方程式(3)所示。

$$x_{hip} = \frac{x_{hl} + x_{hr}}{2}, y_{hip} = \frac{y_{hl} + y_{hr}}{2} \quad (3)$$

其中， $x_{hl}$ ， $y_{hl}$ 表示左髖關節的水平與垂直座標， $x_{hr}$ ， $y_{hr}$ 表示右髖關節的水平與垂直座標。接著，計算連續影格間的髖部位置變化來量化重心的變化幅度，此計算用於反映身體重心的動態變化，計算方式如方程式(4)所示。

$$\Delta = \sqrt{(x_{hip,c} - x_{hip,p})^2 + (y_{hip,c} - y_{hip,p})^2} \quad (4)$$

其中， $\Delta$ 表示髖部在連續影格間的位移值； $x_{hip,c}$ ， $y_{hip,c}$ 為當前影格中髖部的水平與垂直座標， $x_{hip,p}$ ， $y_{hip,p}$ 則為前一影格中髖部的水平與垂直座標。

基於位移數據，進一步計算其平均值 $\mu$ 和標準差 $\sigma$ ，並以 $\mu + 3\sigma$ 作為動態閾值，來涵蓋正態分布中約99.7%的正常位移範圍。超出閾值的數據被標記為異常，表明可能存在重心轉換不穩定的情況。圖3-11呈現了髖部位移值（藍線）與動態閾值（紅線）的對比。超出閾值的點標記為異常（紅點），這些影格通常對應學員換腳時的重心晃動。異常偵測標記提供重心控制的評估指標，標示出技術問題可能發生的時間點。此機制同時用於識別因攝影機晃動造成的關節點偵測誤差，藉此調整分析結果。

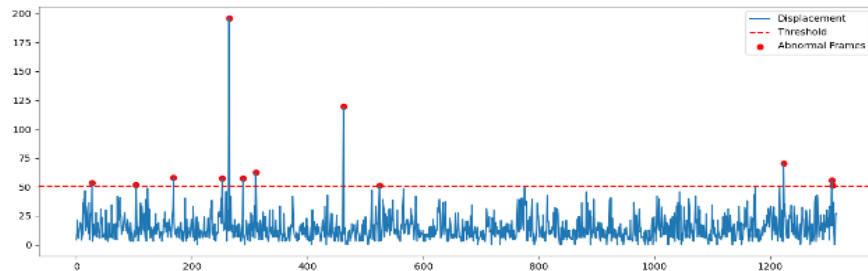


圖 3-12：髖部位移異常偵測圖

### 3.7 生成評論

依據姿勢分析結果產生訓練建議。系統以步伐為單位分析影格中的姿勢狀況，針對左右腳踝及膝關節進行標準性評估。當偵測到不符合預設標準的姿勢時，將相關關節部位標註為需要改進；反之則標註為正確姿勢。如圖 3-12 所示，橫軸代表步伐序列，每單位代表一完整步伐，縱軸顯示左右腳踝及膝關節的姿勢狀態，綠色表示正確姿勢，藍色表示膝蓋內夾，紫色表示腳踝外八。

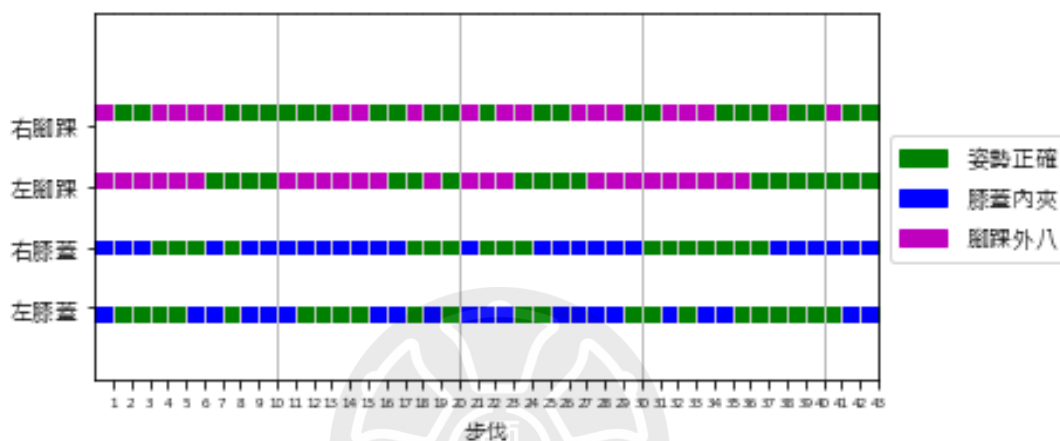


圖 3-13：姿勢分析結果圖

將同一關節部位的左右側評估結果進行整合。如圖 3-13 所示，當某部位的左右側動作皆符合標準時，在總結果中標記為正確；若任一側出現異常，則標記為需要改進。整合後的結果以步伐為單位呈現腳踝與膝關節的整體表現。如圖 3-14 所示，綠色表示姿勢正確，紅色表示姿勢不標準，提供更符合訓練情境的技術表現概覽。

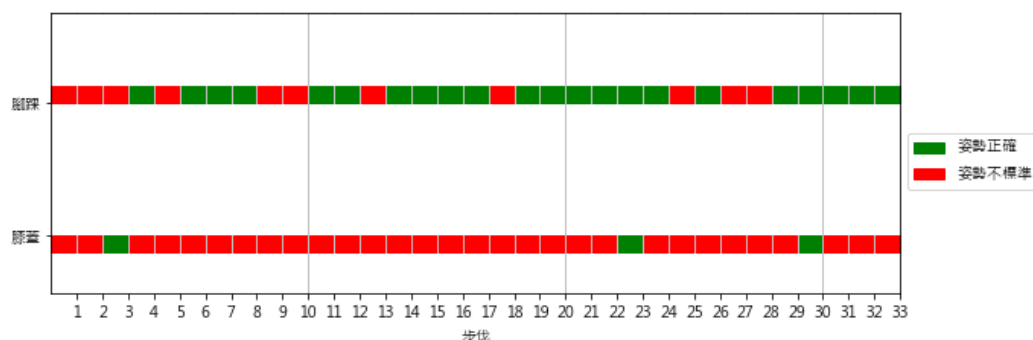
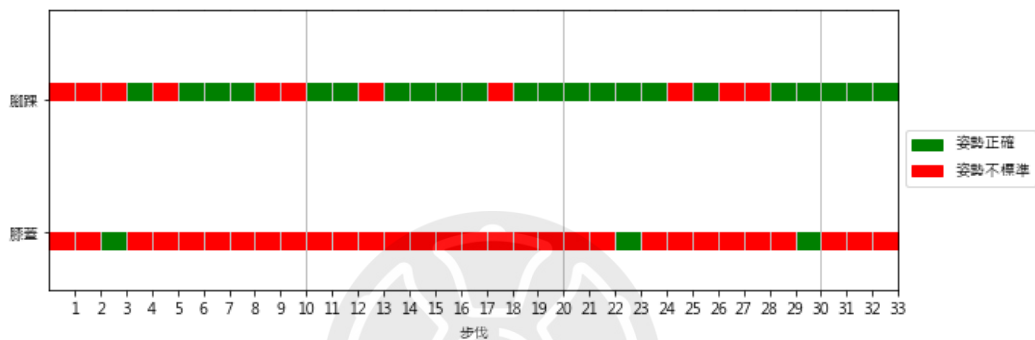


圖 3-14：姿勢總結果圖

根據標準步伐占總步伐的比例產生評論。當標準步伐比例達到或超過 90% 時，給予「溜得非常好」的評價；比例在 80%至 90%之間時，評價為「溜得很不錯」；比例在 70%至 80%之間時，評價為「溜得還可以」；當比例低於 70% 時，提示「姿勢需再加強」。

對於需要加強的情況，進一步分析不標準步伐的具體表現。當某類型的不標準步伐比例超過 30%時，提示「該類型不標準偶爾出現」；若比例超過 50%，則提示「該類型不標準有時出現」；當比例超過 70%時，提示「該類型不標準經常出現」。如圖 3-14 所示，評論生成機制依據姿勢分析結果和標準步伐比例，生成對應的評價與改進建議，提供明確的評估結果。



**姿勢需再加強！** 右踝外八偶爾出現，左膝內夾偶爾出現，右膝內夾經常出現

圖 3-15：評論生成結果圖

評論生成機制將各步伐的姿勢評估結果轉換成具體建議。內容包含整體表現評價及需改進姿勢的出現頻率。此機制以步伐比例為基準產生評論，使評估結果能直接應用於訓練指導。

## 第四章 實驗結果與討論

本章詳細說明研究的實驗設計與結果分析，透過系統性的實驗驗證所提出方法的可行性與效能。首先說明姿勢判定實驗所使用的影像資料庫建置過程，接著針對本研究提出的步伐週期偵測及姿勢判定方法進行三項關鍵實驗：步伐週期自動偵測準確度分析、姿勢辨識準確度分析、姿勢評論系統驗證，以及關節點位移與重心穩定性的關聯性研究。

### 4.1 影像資料庫

實驗環境設置於戶外直排輪滑輪場，採用固定於學員安全帽上的 GoPro 運動攝影機進行影像收集。如圖 4-1 所示，可調式支架設計使攝影機角度和距離可依據學員身高調整，確保在學員維持競速直排輪標準蹲姿時，能完整捕捉從髖部到腳掌的關鍵動作。



圖 4-1：GoPro 運動攝影機與安全帽連接架設圖



圖 4-2：配戴攝影機的實際情況



圖 4-3：攝影機最佳拍攝角度示意圖

邀請 5 位不同程度的學員參與實驗，收集了總時長 22 分鐘 54 秒，共 41,220 幀的影像資料，經步伐分割後得到 770 個完整步伐。如表 4-1 所示，實驗包含 19 段訓練影片，每位學員拍攝二至三圈標準滑行，以確保資料的完整性。表 4-2 詳細列出參與學員的背景資料，包括年齡、學習年資及訓練頻率等資訊。這些多元的取樣數據提供了完整的分析基礎。

表 4-1：實驗對象詳細資料

受試者人數	影片數量	總時長	總幀數	總步伐數
5	19	22 分鐘 54 秒	41,220 幀	770

表 4-2：實驗對象詳細資料

學員編號	年齡	學習年份	每週練習頻率	影片數量
A	11 歲	三年半	3 次	6 部
B	8 歲	一年半	2 次	4 部
C	7 歲	兩年	2 次	4 部
D	8 歲	半年	2 次	3 部
E	10 歲	半年	1 次	2 部

為建立系統評估的基準值 (Ground Truth)，邀請兩位具有競速直排輪專業背景的教練進行影片評估。第一位教練具有競賽選手經歷及多年教學經驗；第二位教練擁有十年以上教學資歷並具備國家級教練證照。在評估過程中，兩位教練採用了不同的記錄方式，以全面評估系統的性能。

教練 A 在了解實驗定義的五種姿勢狀態後，針對每一個步伐進行詳細的姿勢標記。他逐幀檢視每個步伐週期內運動員的膝關節和踝關節動作，並根據實驗設計的標準判斷其是否符合正確姿勢。這種逐步的標記方式生成了一個與系統輸出直接對應的資料集，可以將其與系統對每個步伐的姿勢判斷結果進行比對，從而精確地計算出系統在姿勢判定上的準確率、召回率等指標。

而教練 B 則從整體訓練的角度對每段影片提供綜合評語。對於每段訓練影片，教練 B 都給出一段文字評論。這些評語反映了教練在實際訓練中對運動員表現的整體判斷。通過比較教練 B 的評語與系統輸出的評論，我們可以評估系統在生成訓練反饋方面的有效性和實用性。

## 4.2 實驗一：步伐週期偵測

在第一項實驗中，為了評估步伐週期自動偵測系統的效能，使用人工標記的步伐切分時間點作為 ground truth，將其與系統輸出的步伐切分時間點進行比較。

使用一個 15 幀的容許誤差 (tolerance) 來判斷系統輸出與 ground truth 的匹配程度。如果系統識別的步伐切分點與人工標記的時間點之差小於等於 15 幀 (約 0.5 秒)，則認為是一個正確的匹配。透過比較系統輸出與 ground truth，計算出以下評估指標：準確率 (Precision)：系統正確識別的步伐數/系統輸出的總步伐數；召回率 (Recall)：系統正確識別的步伐數/人工標記的總步伐數；以及 F1 分數：準確率和召回率的調和平均數，綜合反映系統的整體性能。

實驗結果顯示，在總計 770 個人工標記的步伐中，系統正確識別出 583 個，召回率達到 74.55%。同時，系統共輸出了 765 個步伐，其中 583 個與 ground truth 匹配，準確率為 76.21%。綜合計算得到的 F1 分數為 75.37%，表明系統在實際訓練資料中具有良好的步伐切分效能。

為了更直觀地展示系統輸出與 ground truth 的對應關係，圖 4-1 繪製了步伐切分時間點的比較圖。圖中紅色的垂直線表示系統識別的步伐切分點，藍色的垂直線表示人工標記的 ground truth。綠色垂直線代表兩者之間的步伐切分點在容許誤差範圍內。

從圖中可以看出，大部分的系統輸出與 ground truth 都能很好地對齊，表明步伐週期偵測算法能夠準確地捕捉運動員的實際步伐模式。

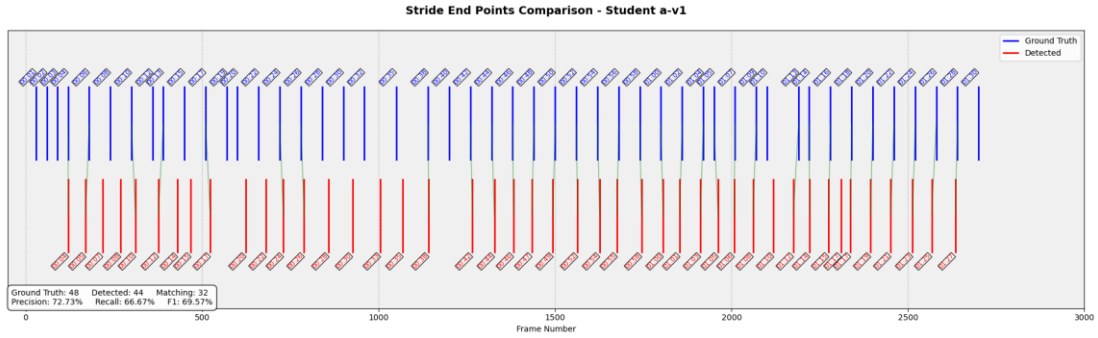


圖 4-4：步伐切分時間點比較圖

進一步分析了系統未能正確識別步伐的原因，發現有以下情況：連續峰值或谷值的處理上，儘管設計了專門的算法來處理連續的峰谷值，但在某些極端情況下，如運動員在腳收回後連續小幅度調整步伐時，系統仍然難以做出正確判斷。儘管存在這些誤差，系統在大多數情況下都能夠準確地識別步伐週期。

### 4.3 驗證姿勢判定方法

基於人工切分的單步伐影像資料，設計了一系列系統化的實驗來評估姿勢判定方法。實驗使用前述影像資料庫中的 770 個步伐，將系統判定結果與教練 A 建立的 Ground Truth 進行比對，藉此評估系統的實用性與可靠度。

#### 4.3.1 實驗二：姿勢判斷準確度分析

第二項實驗評估系統姿勢判定的準確性。與步伐週期偵測實驗不同，這裡採用人工切分的步伐作為分析單位，而非使用系統自動偵測的結果。這樣做的主要原因有兩個：首先，使用人工切分的步伐資料能夠確保每個步伐樣本的完整性和準確性。由於步伐週期偵測算法本身存在一定的誤差，自動切分的結果可能包含不完整或錯誤的步伐。這些噪音資料會直接影響姿勢判定的準確性評估。相比之下，人工切分的步伐經過了教練的仔細檢查和確認，能夠為姿勢分析提供更可靠的輸入。其次，採用人工切分的步伐資料可以讓我們更加專注於評估姿勢判定模組本身的性能，排除步伐切分誤差的干擾。我們的目標是測試

系統在給定正確步伐資訊的情況下，對運動員姿勢的判斷能力。通過使用統一的人工切分資料集，我們可以更加公平、客觀地比較不同姿勢判定方法的優劣。

需要注意的是，雖然在這項實驗中使用的是人工切分的步伐資料，但這並不意味著系統在實際應用中也需要依賴人工處理。相反，本研究的最終目標是建立一個完全自動化的姿勢分析流程，將步伐週期偵測和姿勢判定整合。

第一項實驗評估系統姿勢判定的準確性。以人工切分的步伐為單位，將系統的判定結果與教練 A 的專業標註進行對照，特別關注膝關節內夾和腳踝外八等關鍵技術問題的識別能力。採用準確率(Precision)、召回率(Recall)和 F1 分數(F1 Score)作為評估指標，分別評估膝關節和踝關節的判定效能。

在總計 770 個步伐樣本中，膝關節標準姿勢與不標準姿勢各有 385 個；腳踝部分則有 420 個標準姿勢和 350 個不標準姿勢。將系統輸出的姿勢標籤與教練 A 的人工標註結果進行比較，得到以下混淆矩陣：

表 4-3：膝關節姿勢判斷混淆矩陣

System \ Actual	標準	不標準
標準	77.92	22.08
不標準	22.08	77.92

表 4-4：踝關節姿勢判斷混淆矩陣

System \ Actual	標準	不標準
標準	83.33	16.67
不標準	20.00	80.00

根據混淆矩陣的結果，計算出膝關節和踝關節姿勢判定的評估指標。在膝關節姿勢判定中，系統對標準姿勢的 Precision 為 0.7792，Recall 也為 0.7792，綜合得到的 F1 Score 同樣為 0.7792。對不標準姿勢的判定效果與標準姿勢一致，Precision、Recall 和 F1 Score 均為 0.7792。這表明系統在區分膝關節的標準和不標準姿勢方面具有一定的平衡性和穩定性。在踝關節姿勢判定方面，系統對標準姿勢的 Precision 達到了 0.8333，Recall 和 F1 Score 也同樣為 0.8333。對不標準姿勢的判定效果略低於標準姿勢，Precision 和 Recall 均為 0.80，綜合得到的 F1 Score 也是 0.80。這表明系統在踝關節姿勢判定上的表現略有差異，但整體上仍然保持了較高的水準。

綜合來看，系統在競速直排輪姿勢判定任務中取得了一定的效果。在膝關節和踝關節的姿勢判定上，系統的各項評估指標都達到了 0.77 以上，其中踝關節姿勢判定的準確性超過了 0.80。這些結果表明我們提出的方法在實際應用中具有一定的有效性和可靠性。

然而，系統的性能仍有進一步提升的空間。在未來的工作中，可以從以下幾個方面對系統進行改良：首先，擴大訓練資料的規模和多樣性，提高系統應對不同運動員和場景的能力；其次，探索更先進的姿態估計和特徵提取方法，如引入時空關聯性建模和注意力機制，以期提升關鍵節點的定位精度；最後，優化系統的參數設置和決策閾值，在保證準確性的同時提高實用性和泛化能力。

本研究在競速直排輪姿勢判定領域進行了有益的探索，為運動員訓練和教練指導提供了新的技術視角。通過進一步的研究和優化，我們期望這一系統能夠在實際應用中發揮更大的作用，為競速直排輪運動的發展提供助力。

### 4.3.2 實驗三：針對姿勢狀況提出結果評論

第三項實驗評估系統生成評論的有效性和全面性。將系統針對每段訓練影片生成的綜合評論與教練 B 的專業評語進行了全局性的比較。與實驗一和實驗二不同，這裡的重點不在於逐幀或逐步伐的姿勢判定，而是評估系統對整段訓練過程的總體把握能力。

實驗採用兩種驗證方式：整體評語的對比分析，以及細部評論的準確度驗證。系統根據標準步伐的比例生成四個等級的評論，其判定標準如表 4-5 所示。對需要加強的情況，再依據不標準姿勢的出現頻率，提供細部評論，如表 4-6 所示。

表 4-5：標準步伐比例與系統評論對應關係

標準步伐比例	系統評論
$\geq 90\%$	溜得非常好！
$\geq 80\%$	溜得很不錯！
$\geq 70\%$	溜得還可以！
$< 70\%$	姿勢需再加強！

表 4-6：不標準姿勢頻率與細部評論對應關係

不標準步伐比例	系統評論
$> 30\%$	該類型不標準偶爾出現
$\geq 50\%$	該類型不標準有時出現
$\geq 70\%$	該類型不標準經常出現

如表 4-7 所示，將系統生成的評論與教練 B 的評語進行了逐項對照。在大多數情況下，系統能夠識別出訓練過程中存在的主要問題，並給出了針對性的改進建議。例如，對於一段膝蓋內夾和腳踝外八較為嚴重的影片編號 C-v2，系統的評論指出了這一問題，並建議學員注意右腳的姿勢。這與教練 B 的評語中提到的"膝蓋不要內夾，注意外八"的意見一致。

然而，在某些方面系統生成的評論還存在一定的局限性。首先，系統更多地關注了動作的標準性，欠缺更高層次的技術要點的判斷能力。這可能是由於目前的姿勢判定算法主要依賴於關鍵點位置，對動作的連貫性和流暢性的捕捉還有待加強。例如，在影片編號 C-V3 中，系統指出右膝蓋內夾經常出現，但教練的評語為"膝蓋站穩不要抖動"，可見系統雖指出了問題，卻無法提供更人性化的回饋。其次，相比教練 B 的評語，系統的表述較為機械和生硬，缺乏對個體差異的考慮和鼓勵性的言辭。例如在影片編號 C-V5 中，系統提出的腳踝部分評論雖與教練評語一致，但教練還另外提到了更針對性的評論"腳要大步推直"。這一點提醒我們，在未來的系統改進中，除了提高姿勢判定的精度外，還需要重視評論生成的語言風格和人性化程度。

表 4-7：系統評論與教練評語對照分析

影片編號	教練評語	系統評論
C-v1	注意內八	姿勢需再加強！左右踝外八、膝內夾有時出現
C-v2	膝蓋不要內夾，注意外八，不要翹腳尖	姿勢需再加強！右踝外八、膝內夾經常出現，左踝外八、膝內夾偶爾出現
C-v3	膝蓋站穩不要抖動	姿勢需再加強！右膝內夾經常出現，右踝外八、左膝內夾偶爾出現
C-v4	腳要推直，右腳內八	姿勢需再加強！右踝外八、膝內夾，左膝內夾有時出現
C-v5	不要內八，腳大步推直	姿勢需再加強！左右膝、踝不標準有時出現

儘管存在局限性，系統在總體上還是表現出了良好的評論生成能力。通過比較系統輸出和教練 B 的評語，發現兩者在關鍵問題的識別上達到了較高的一致性。這表明我們的方法能夠在一定程度上模擬專業教練的視角，為運動員提供有價值的反饋和指導。

如圖 4-5 所示，以一部共 33 個步伐的影片為例，系統依據各步伐的姿勢狀態進行評估。圖中顯示該學員右側腳踝偶爾出現外八姿勢、左側膝蓋偶爾出現內夾姿勢，以及右側膝蓋經常出現內夾姿勢，據此系統給予「姿勢需再加強」的整體評價，並提示「右膝內夾經常出現，右踝外八、左膝內夾偶爾出現」的具體建議。

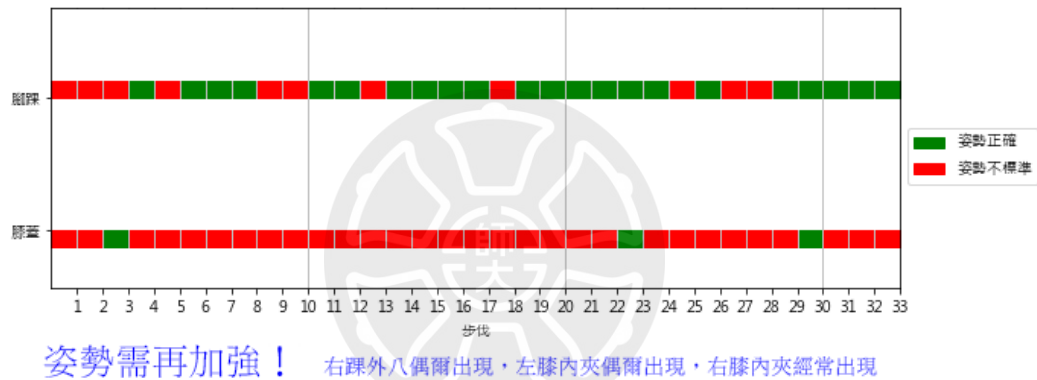


圖 4-5：系統給予評論結果

本實驗的結果為未來的研究指明了方向。一方面，需要進一步完善姿勢判定算法，提高系統對動作協調性和節奏感的理解能力；另一方面，也要探索更先進的自然語言生成技術，使系統的評論更加人性化和具有針對性。通過不斷的改進和優化，開發出一個全面、實用的競速直排輪訓練輔助系統，為運動員的技術提高提供有力支持。

### 4.3.3 實驗四：關節點位移與重心偏移的關聯

第四項實驗探討學員滑行時腕部位移的異常變化與重心穩定性之間的關聯。透過分析 19 部訓練影片中的腕部位移數據，發現幾個值得注意的現象。首先，大多數的異常位移出現在直線滑行階段，而非轉彎時刻。這個發現顯示學員在直線滑行時的重心控制可能比預期更具挑戰性。其次，攝影機的晃動程度與腕部位移值的突增呈現高度相關，反映了學員在換腳時重心轉換的穩定性問題。

為了量化分析這種關聯性，針對不同程度學員的表現進行了系統性的統計，結果如表 4-8 所示：

表 4-8：學生學習經驗與晃動比例關係分析

學生編號	學習年份	練習頻率	步伐總數	晃動步伐數	晃動步伐比例
A	三年半	3 次/週	226	11	4.8%
B	一年半	2 次/週	163	13	7.9%
C	兩年	2 次週	170	5	2.9%
D	半年	2 次/週	76	16	21%
E	半年	1 次/週	106	15	14%

分析結果揭示了幾個重要的發現。首先，鏡頭晃動與換腳時的姿態穩定性呈現明顯的關聯。當學員在換腳時重心不穩，往往會導致攝影機產生顯著晃動，這個現象為評估重心穩定性提供了一個客觀的量化指標。

其次，晃動比例與學習經驗之間存在負相關關係。經驗較淺的學員（D、E）展現出較高的晃動比例（14%~21%），而經驗豐富的學員（A、B、C）則維持較低的晃動比例（2.9%~7.9%）。這種關聯性驗證了系統的可靠性，也印證了學習經驗對重心控制能力的重要影響。

特別值得注意的是，在教練 B 的評語中，僅有學員 B 被明確指出存在重心問題。這反映了教練評估的優先順序特性。對於經驗較淺的學員，教練往往會優先關注較為明顯的基礎姿勢問題，而較少提及重心控制的細節。反之，對於具備一定經驗的學員，由於基礎姿勢相對穩定，教練得以進一步觀察到重心控制的問題，這種現象並不代表初學者的重心控制已臻完善。

這個發現突顯了本系統能夠同時關注多個技術層面，不受人為注意力分配的限制，在實際應用場景中能輔助教練暫時忽略的細節，尤其是在團體訓練或自主練習的場景中，數據化的評估能彌補教練注意力無法全面覆蓋的限制。



## 4.4 實驗結果與討論

四項實驗結果分析顯示，步伐週期偵測和姿勢辨識均取得了良好的效果。在步伐週期偵測方面，系統達到了 76.21% 的準確率和 74.55% 的召回率，F1 分數為 75.37%。儘管還有進一步提升的空間，但這一結果已經證明了所提出方法的有效性。影響步伐偵測效能的主要因素包括運動員的個體差異、連續步伐的複雜性以及影像品質等。未來可以通過引入更多的時空特徵和改進峰谷值識別策略來提高偵測精度。

姿勢辨識的準確率達到了 75% 以上，其中膝關節姿勢判定的 precision、recall 和 F1 score 均為 0.779，踝關節姿勢判定的這三個指標分別達到了 0.8333、0.8333 和 0.80。影響姿勢辨識準確度的因素包括競速直排輪運動的特性（如運動員的個體差異）以及資料收集的環境限制（如攝影機視角、關節點遮擋和光線變化等）。

評論系統的分析顯示，系統判定結果與教練評估具有互補性。系統能夠提供量化的技術分析，記錄問題發生的頻率。而教練則可以根據學員的個別特性給出更具針對性的修正建議。此評論機制能夠幫助初學學員及時了解自身在膝關節和腳踝姿勢方面存在的問題。

此外，本研究提出了一種基於髖部位移異常檢測的方法，用於建立重心控制的量化指標。這一指標能夠反映學員在滑行過程中的平衡性和穩定性。在團體訓練情境中，教練通常只能關注最明顯的技術缺失，而系統的分析能夠記錄每位學員的技術問題，為教練提供更全面的參考資訊。

當前的評論生成機制採用了固定的判斷標準，較難因應個別學員的特點和學習進度。未來的研究方向包括提升系統的適應性，以及探索如何將系統分析結果與教練的專業判斷進行更好的整合應用。

## 第五章 結論與未來展望

本研究針對競速直排輪訓練中教練評論資源有限以及初學者難以察覺自身姿勢問題等議題，提出了一種基於人體姿勢偵測的訓練輔助方法。通過步伐週期自動切分、姿勢判定以及綜合評論生成等環節，該方法能夠為運動員提供及時、客觀的技術回饋，彌補傳統訓練模式的不足。

實驗結果顯示，所提出的方法在三個主要方面取得了良好的效果：一、步伐週期偵測實現了 75.37% 的 F1 分數，為姿勢分析提供了可靠的資料基礎；二、建立了競速直排輪特定不良姿勢的判定準則，在膝關節和踝關節姿勢辨識上的準確率均超過 75%；三、開發了基於統計分析的評論生成機制，生成的綜合評價與教練的專業意見具有一致性，能夠為學員的自主訓練提供有效指導。此外，本研究還提出了一種基於髖部位移的重心穩定性量化指標，為教練監控學員的平衡控制能力提供了新的視角。

然而，目前的系統在一些方面還存在局限性。受限於單一攝影機的拍攝視角，系統對複雜動作序列的分析能力有待加強。同時，系統目前主要進行離線分析，尚不能提供實時的訓練回饋。在未來的研究中，可以考慮引入多攝影機系統，通過融合不同角度的影像資訊來提升姿勢捕捉的準確性。此外，隨著移動運算設備的發展，未來也可以嘗試將系統移植到邊緣裝置上，實現即時的姿勢辨識和評論生成。

總的來說，本研究所開發的姿勢分析與評論機制，為競速直排輪的科學化訓練提供了新的思路和工具。透過量化的技術評估和改進建議，系統能夠幫助學員更加清晰地認識自身的不足之處，並為教練提供更全面客觀的決策參考。在未來的實際應用中，這一方法有望進一步提升競速直排輪訓練的針對性和有效性，為該項運動的推廣和發展做出積極貢獻。

## 參考文獻

### 英文文獻

- [1] Allinger, T., & van den Bogert, A. J. (1997). Skating technique for the straights, based on the optimization of a simulation model. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(2), 279-286.
- [2] Bazarevsky, V., Grishchenko, I., Raveendran, K., Zhu, T., Zhang, F., & Grundmann, M. (2020). BlazePose: On-device real-time body pose tracking. arXiv preprint arXiv:2006.10204.
- [3] Cambridge, E. D. J., Sidorkevicz, N., Ikeda, D. M., & McGill, S. M. (2012). Progressive hip rehabilitation: The effects of resistance band placement on gluteal activation during two common exercises. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 42(9), 731-740.
- [4] Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2016). Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. arXiv preprint arXiv:1611.08050.
- [5] Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2017). Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7291-7299).
- [6] Chen, W., Jiang, Z., Guo, H., & Ni, X. (2020). Fall detection based on key points of human-skeleton using OpenPose. In *IEEE International Conference on Image*

Processing (pp. 1597-1601).

[7] Chen, Y., Tian, Y., & He, M. (2020). Monocular human pose estimation: A survey of deep learning-based methods. *Computer Vision and Image Understanding*, 192, 102897.

[8] Chen, Y., Wang, Z., Peng, Y., Zhang, Z., Yu, G., & Sun, J. (2018). Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7103-7112).

[9] Fang, H. S., Xie, S., Tai, Y. W., & Lu, C. (2016). RMPE: Regional multi-person pose estimation. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 2334-2343).

[10] Fischler, M. A., & Elschlager, R. A. (1973). The representation and matching of pictorial structures. *IEEE Transactions on Computers*, 22(1), 67-92.

[11] Iqbal, U., & Gall, J. (2016). Multi-person pose estimation with local joint-to-person associations. In *European Conference on Computer Vision* (pp. 627-642). Springer, Cham.

[12] Lewis, C. L., Foley, H. D., Lee, T. S., & Berry, J. W. (2018). Hip-muscle activity in men and women during resisted side stepping with different band positions. *Journal of Athletic Training*, 53(11), 1071-1081.

[13] Nakai, M., Tsunoda, Y., Hayashi, H., & Murakoshi, H. (2018). Prediction of

basketball free throw shooting by OpenPose. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (pp. 1325-1330).

[14] Newell, A., Huang, Z., & Deng, J. (2016). Associative embedding: End-to-end learning for joint detection and grouping. In Advances in Neural Information Processing Systems (pp. 2277-2287).

[15] Newell, A., Yang, K., & Deng, J. (2016). Stacked hourglass networks for human pose estimation. In European Conference on Computer Vision (pp. 483-499). Springer, Cham.

[16] Qiu, H., Wang, C., Wang, J., Wang, N., & Zeng, W. (2019). Cross view fusion for 3D human pose estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 4342-4351).

[17] Toshev, A., & Szegedy, C. (2014). DeepPose: Human pose estimation via deep neural networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1653-1660).

[18] van der Eb, J., Gereats, S., & Knobbe, A. (2020). Enhancing the performance of elite speed skaters using SkateView: A new device to measure performance in speed skating. *Sports Engineering*, 23(1), 1-12.

[19] Xia, L., Chen, C. C., & Aggarwal, J. K. (2011). Human detection using depth information by Kinect. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 15-22).

## 中文文獻

- [20] 王俊盛、邱文信 (2010)。以運動生物力學角度探討競速直排輪技術。運動生物力學研究，7(2)，45-52。
- [21] 李凱文 (2018)。肌內效貼對膝內翻者膝關節三維運動影響的研究。體育學報，51(2)，197-208。
- [22] 李詠哲 (2021)。利用 OpenPose 進行棒球打擊姿勢評估。國立臺灣師範大學資訊工程研究所碩士論文。
- [23] 余紹文 (2010)。直排輪運動訓練對學童平衡能力及下肢肌耐力之影響。體育學報，43(3)，87-98。
- [24] 柯錦文 (2020)。基於 Kinect 的步態分析系統設計與實現。醫療資訊雜誌，39(2)，45-56。
- [25] 高翊捷 (2020)。基於即時影像分析與物聯網技術之飛鏢投擲姿勢校正系統。國立臺灣科技大學電機工程系碩士論文。
- [26] 張詠岱 (2008)。競速直排輪運動之短距離 300 公尺技術報告書。國立體育大學教練研究所碩士論文。
- [27] 魏崇名 (2020)。使用改良 OpenPose 網路於跳水及游泳之骨架關節估計、修正和分析。國立清華大學資訊工程學系碩士論文。

[28] 姚述杰 (2019)。高爾夫球揮桿的姿勢控制與揮桿表現之相關性。體育學報，52(1)，57-68。

[29] 吳郁樟 (2019)。一個基於行走姿勢特徵的步態辨識系統。國立中央大學資訊工程學系碩士論文。

