

女子跳高選手助跑最後兩步與起跳動作之運動學分析

張立羣^{1*}、乃慧芳¹、莊銘修²

¹國立臺灣體育運動大學競技運動學系

²Max 肌力與體能工作室

摘要

目的：探討我國女子跳高選手助跑最後兩步與起跳動作特徵，提供給教練與選手作為改進動作之參考資料。**方法：**以 16 名女子跳高選手（年齡 20.4 ± 5.4 歲，身高 170.1 ± 4.7 公分，體重 58.5 ± 5.8 公斤，比賽成績 1.65 ± 0.06 公尺）為研究對象。利用兩部數位攝影機與三度空間影像分析方法，拍攝選手在全國運動會、大專校院運動會與中等學校運動會的跳高比賽過程，以動作分析系統獲得助跑最後兩步與起跳階段的運動學資料，以皮爾遜積差相關分析各項運動學參數與比賽成績之相關性，顯著水準設為 $\alpha = .05$ 。**結果：**與世界級選手相比，本研究選手動作特徵為助跑速度較慢，在起跳階段水平與垂直方向運動的轉換較差，起跳腿膝關節彎曲較大，起跳離地瞬間身體重心水平速度過快，起跳離地瞬間身體重心垂直速度較慢與起跳飛程角度較小。此外，助跑最後第二步水平速度、起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度、起跳階段身體重心速度轉換率、起跳飛程角度和飛程高度皆與比賽成績達顯著相關。**結論：**選手應提升助跑速度與下肢爆發力，並加強起跳階段水平與垂直方向運動的轉換技術。

關鍵詞：田徑、背向式跳高、生物力學

壹、緒論

跳高是一個對技術要求相當高的田徑跳躍項目，選手嘗試將身體重心提升至最大垂直高度 (Mateos-Padorno et al., 2021)，並且讓最大垂直高度的位置在橫竿的正上方。跳高是由助跑、起跳和過竿三個階段所組成，各階段動作環環相扣。助跑的目的是為了起跳創造適宜的條件，在起跳階段，選手對地面作用力的大小，決定選手離地後身體重心能達到的高度，並且也決定身體在過竿階段的角動量大小 (Dapena, 1988)。跳高的助跑與起跳階段扮演著重要關鍵角色 (Dapena et al., 1990; Greig & Yeadon, 2000)，因為過竿的問題大多數是由這兩個階段所造成。

*通訊作者: 張立羣 Email: lichun@ntus.edu.tw

地址: 404 臺中市北區雙十路一段 16 號

助跑階段由一個直線跑接著在起跳前 4 到 5 步的曲線跑所組成，稱為 J 字型助跑。選手應以一種固定的助跑形式來獲得最適當的速度並準確地踏到起跳點，使助跑速度得以有效的被利用 (Becker & Wu, 2015; Dapena et al., 1990)，世界級女子選手助跑速度一般在 6.1-8.0m/s 之間 (Dapena et al., 2006)。選手的目標是透過助跑達到一個適當的水平速度，當轉換為垂直速度時，使他們能夠獲得最大垂直高度越過橫竿。在助跑結束時所達到的速度將是選手在起跳時能夠控制的最高水平速度 (Dapena et al., 1990; Lundin & Berg, 1993; Mateos-Padorno et al., 2021)。

在起跳階段，如果助跑速度太快，容易使選手在執行起跳動作過程中，因向前動量大於向上動量，而無法完成垂直的起跳，因此要達到優異的成績表現將取決於助跑到起跳之間的水平速度轉換成垂直速度的過程。研究發現 2017 年世界田徑錦標賽女子跳高選手的助跑水平速度轉換為起跳垂直速度的速度轉換率可達 66.17% (Nicholson et al., 2018)，當速度轉換率越大，所獲得的垂直速度就越快，身體重心上升的高度也會越高，因此助跑速度越快，轉換為起跳垂直速度也越快 (Dapena et al., 1990)。在起跳離地後，選手要成功的過竿必須要產生適當的角動量 (Dapena, 2000)，若選手的角動量不足，會導致在過竿時身體旋轉不足失去平衡，造成過竿效率變差，影響到過竿時的高度，甚至導致橫竿掉落。在空中由於角動量守恒的情況下，選手可透過貓式旋轉 (catting)，讓身體在作用與反作用力的情況下使身體產生旋轉形成角動量 (Dapena, 1997)。當選手離開地面後角動量不能改變，就必須在起跳階段透過起跳腳在地面上施加的作用力來獲得角動量 (Dapena, 2000; Mateos-Padorno et al., 2019)。選手獲得的角動量與起跳階段開始和結束時身體傾斜角度有關，當身體從向後傾斜姿勢轉移到處於垂直位置過程中，身體傾斜角度有較大的變化，將產生較大向前旋轉角動量 (Dapena, 1988)。過去研究發現女子跳高選手在起跳階段產生空中旋轉的角動量比男子跳高選手小 (Dapena, 1997)。在觀察跳高選手動作技術表現，Ritzdorf (2009) 提出 7 項跳高技術的關鍵要素，包括增加助跑的步頻、助跑最後一步減少騰空時間、弧線助跑時身體向內傾斜、起跳腳著地前臀部加速、起跳腳著地時身體向後傾斜、起跳離地時身體完全伸展以及在橫竿上方的弓身或旋轉。在這 7 項關鍵要素中，就有 4 項為助跑動作，2 項為起跳動作，顯示出助跑與起跳這兩個階段對跳高成績表現的重要性。

目前女子跳高世界紀錄由 Stefka Kostadinova 在 1987 年創下的 2.09m (World Athletics, 2021)，而我國女子跳高紀錄是由李晴晴在 2021 年創下的 1.90m，打破保持 32 年的全國紀錄，但仍與世界紀錄相差 19 公分。從 2000 年以來，我國僅有 5 位選手跳高成績突破 1.80m (中華民國田徑協會, 2021)，這樣的現況是我國極需要突破的，近年來競技運動競爭激烈，選手技能水準也不斷提升，如何讓選手能有效地增強運動表現並提升競爭力，運動科學扮演著重要角色 (張簡旭芳、相子元, 2016)。有關我國女子跳高選手動作技術的運動科學研究相當缺乏，目前僅發現兩篇研究，一篇針對個案選手技術進行縱向研究 (李春安, 2010)，另一篇研究則是分析助跑最後三步的時間變化情形 (林芸蔓、張立羣, 2010)，對於我國女子跳高選手動作技術特徵以及動作優缺點，仍需要進一步深入研究。因此本研究目的在探討我國女子跳高選

手助跑最後兩步與起跳動作的特徵，其結果提供給教練與選手作為改進動作技術的參考資料。

貳、方法

一、研究對象

本研究以我國女子跳高選手 16 名為對象，包含參加全國運動會選手 9 名，大專校院運動會公開女子組選手 2 名以及中等學校運動會高中女子組選手 5 名，年齡為 20.4 ± 5.4 歲，身高 170.1 ± 4.7 公分，體重 58.5 ± 5.8 公斤，比賽成績為 1.65 ± 0.06 m，成績介於 1.75m-1.58m 之間。

二、研究程序

研究在三個正式比賽現場進行，在賽前二小時於跳高比賽場地後方的看台上架設兩台數位攝影機 (SONY CR-TRV15)，拍攝頻率為 60Hz，快門速度為 1/1000 sec，一台攝影機架設在面對跳高海綿墊的右側，另一台攝影機則置於左側 (圖 1)；兩台攝影機的主光軸對準跳高橫竿中心點，夾角約為 90 度，攝影機拍攝範圍皆可拍攝到以左腳和右腳起跳的選手，從助跑最後兩步至落入海棉墊的動作。之後拍攝在比賽場地的數個三度空間立體座標架 (長度 2.40m，寬度 1.20m，高度 2.00m，包含 18 個標記點)，其立體座標架所涵蓋的校正區域 (calibrated area) 大小為長度 12 m，寬度 3.6 m。比賽開始，拍攝全體參賽選手的比賽過程，過程中記錄選手比賽的起跳高度與起跳次數等相關比賽資料，比賽結束後依賽前的程序再拍攝乙次三度空間立體座標架。

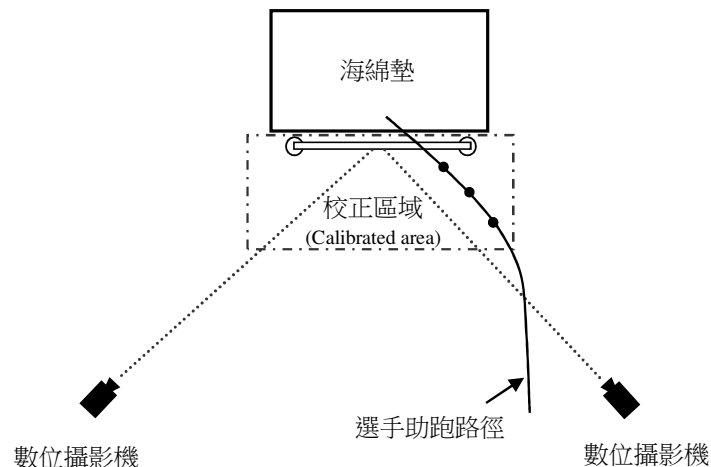


圖 1、實驗場地佈置圖

三、資料處理

本研究選取每名選手在比賽中最佳成績表現的試跳動作進行分析，由於兩台攝影機無同步啟動裝置，為了使擷取的資料都能相同於整個運動的時間序列，利用選手的起跳腳接觸地面瞬間作為兩台攝影機的同步畫面。接著擷取本研究所要分析的動作畫面，從選手助跑最後第二步支撐腳著地瞬間至起跳腳離地後身體在橫竿的最高點瞬間之影片。利用 Kwon 3D 3.1 動作分析系統，將每位選手從兩台數位攝影機所擷取的影片進行數位化處理，本研究人體肢段參數採用 14 個肢段、19 個標記點的人體模型（何維華，2006），首先以手動方式分別點取跳高橫竿末端兩側與身體標記點（包括頭頂、第七頸椎、會陰、左右肩峰、左右肘關節、左右腕關節、左右中指末端、左右腕關節、左右膝關節、左右踝關節、左右腳尖、左右腳跟）。然後將兩台攝影機所獲得的二度空間個別座標系統資料，以直接線性轉換（direct linear transformation）的方法進行處理，以獲得實際的三度空間座標資料，其空間重建誤差（Reconstruction error）為 0.37cm，定義 X 軸為左右方向（與跳高橫竿平行）、Y 軸為前後方向（與跳高橫竿垂直）、Z 軸為垂直方向。再利用 Kwon3D 3.1 系統中所提供的 Butterworth 4th order Zero Lag Digital 程式將原始資料進行修勻，截斷頻率為 6Hz。最後將修勻過的資料，利用 Kwon 3D 3.1 動作分析系統及 Microsoft Office Excel 2013 版資料分析軟體計算跳高三個高度、助跑最後兩步、起跳階段、以及起跳腳離地瞬間的各項運動學參數，進行分析與討論。

本研究分析的運動學參數分為四個部分：（一）跳高三個高度（圖 2），包括起跳高度（起跳腳離地瞬間，身體重心距離地面的垂直高度）、飛程高度（起跳腳離地後，其身體重心距離地面最大垂直高度減去起跳高度）、過竿高度（身體重心距離地面最大垂直高度減去橫竿高度）、以及起跳高度和飛程高度各占身體重心距離地面最大垂直高度之百分比。（二）助跑最後兩步（圖 3）：包括助跑最後兩步的步長（從腳離地瞬間腳尖到下一步腳離地瞬間腳尖之間的直線距離）、助跑最後第二步（助跑最後第二步的支撐腳離地瞬間）和助跑最後第一步（助跑最後第一步的支撐腳離地瞬間）的身體重心水平速度（X 軸和 Y 軸的身體重心水平速度之合速度）。（三）起跳階段（圖 4）：包括在起跳腳著地和離地瞬間的身體重心水平速度與身體重心垂直速度、身體重心速度轉換率（從起跳腳著地瞬間到起跳腳離地瞬間的身體重心垂直速度之變化量除以起跳腳著地瞬間身體重心水平速度）、起跳腳膝關節角度（大腿與小腿所形成的夾角）、起跳腳支撐時間（從起跳腳著地至離地瞬間之時間）、著地角度與起跳角度（在 YZ 平面，身體重心和踝關節的連線與水平線所形成之夾角）、以及起跳距離（起跳腳離地瞬間，起跳腳腳尖與橫竿之間的水平距離）（圖 3）。（四）起跳腳離地瞬間（圖 4）：包括起跳速度（起跳腳離地瞬間，身體重心水平速度和垂直速度之合速度）、起跳飛程角度（起跳腳離地瞬間，身體重心合速度向量與水平面所形成之夾角）、以及起跳高度。

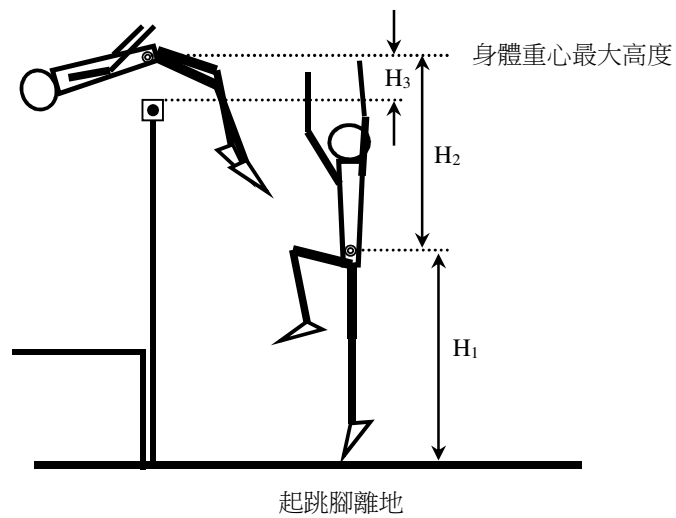


圖 2、跳高三個高度，起跳高度 (H_1)、飛程高度 (H_2)、過竿高度 (H_3) 定義圖

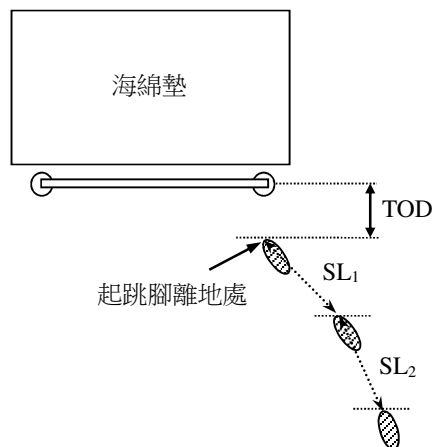


圖 3、助跑最後第二步步長 (SL_2)、助跑最後第一步步長 (SL_1)、起跳距離 (TOD) 定義圖

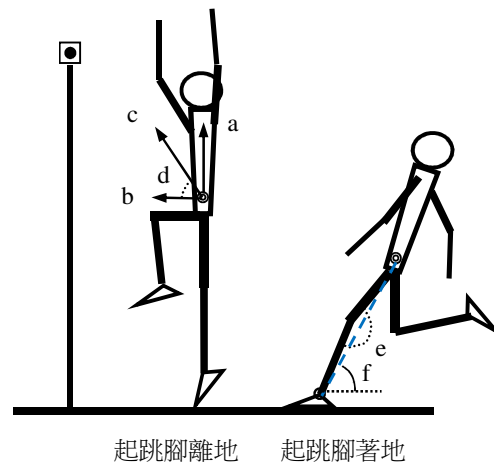


圖 4、起跳階段之運動學參數，身體重心垂直速度 (a)、身體重心水平速度 (b)、起跳速度 (c)、起跳飛程角度 (d)、膝關節角度 (e)、著地角度 (f) 定義圖

四、統計分析

本研究所收集的各項運動學參數資料，利用 SPSS for windows 18.0 (IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 統計分析軟體，以描述統計方法計算其平均數與標準差，以皮爾森積差相關 (Pearson product-moment correlation coefficient) 分析各項運動學參數與比賽成績之間的相關情形，顯著水準設為 $\alpha = .05$ 。

參、結果

在助跑最後兩步與起跳階段之運動學參數數據見表 1。研究結果顯示，以起跳高度占身體重心最大高度百分比為最大，占 70.70%，而飛程高度僅占 29.30%。在助跑階段，助跑最後第一步的水平速度與步長都比助跑最後第二步小。在起跳階段，起跳腳著地瞬間到離地瞬間，身體重心水平速度從 5.86m/s 減少為 3.52m/s，而身體重心垂直速度從 -0.15m/s 增加為 3.52m/s，其身體重心速度轉換率為 57.99%。起跳階段最大膝關節彎曲角度為 140.94°，起跳腳離地瞬間膝關節伸展角度為 168.55°，在起跳腳離地瞬間，影響身體重心飛行軌跡的三個要素，起跳速度、起跳飛程角度與起跳高度分別為 4.79m/s、42.66°、1.14m。

各項運動學參數與比賽成績之相關情形見表 1。研究結果顯示只有 6 個運動學參數與比賽成績達顯著正相關，分別是飛程高度 ($r = .813; p < .001$)，飛程高度占身體重心最大高度百分比 ($r = .778; p < .001$)，助跑最後第二步水平速度 ($r = .636; p = .008$)，起跳階段的起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度 ($r = .736; p = .001$)，起跳階段身體重心速度轉換率 ($r = .618; p = .011$) 和起跳飛程角度 ($r = .606; p = .013$)。

表 1、女子跳高選手助跑最後兩步與起跳階段之運動學參數數據 (N = 16)

運動學參數	平均數	標準差
跳高三個高度		
起跳高度 (m)	1.14	0.03
飛程高度 (m) *	0.48	0.07
過竿高度 (m)	0.01	0.05
起跳高度占身體重心最大高度百分比 (%)	70.70	3.20
飛程高度占身體重心最大高度百分比 (%) *	29.30	3.20
助跑階段		
助跑最後第二步水平速度 (m/s) *	6.44	0.73
助跑最後第一步水平速度 (m/s)	5.99	0.32
助跑最後第二步步長 (m)	1.68	0.15
助跑最後第一步步長 (m)	1.52	0.17
起跳階段		
起跳腳著地瞬間身體重心水平速度 (m/s)	5.86	0.26
起跳腳著地瞬間身體重心垂直速度 (m/s)	-0.15	0.13
起跳腳離地瞬間身體重心水平速度 (m/s)	3.52	0.37
起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度 (m/s) *	3.24	0.32
起跳階段身體重心速度轉換率 (%) *	57.99	3.90
起跳腳著地瞬間膝關節角度 (°)	164.88	5.78
起跳階段最大膝關節彎曲角度 (°)	140.94	7.21
起跳腳離地瞬間膝關節角度 (°)	168.55	4.05
起跳腳著地瞬間著地角度 (°)	59.42	3.87
起跳腳離地瞬間起跳角度 (°)	93.67	2.51
起跳距離 (m)	0.69	0.12
起跳腳支撐時間 (s)	0.18	0.03
起跳腳離地瞬間		
起跳速度 (m/s)	4.79	0.39
起跳飛程角度 (°) *	42.66	3.48
起跳高度 (m)	1.14	0.03

註：* 與比賽成績達顯著相關 ($p < .05$)。

肆、討論

本研究探討我國女子跳高選手助跑最後兩步與起跳動作的特徵，這是第一篇針對我國女子跳高選手進行較大樣本的研究，涵蓋國內三個綜合性運動賽會之參賽選手，其比賽最佳成績為 1.75m，僅 4 名選手成績超過 1.70m。

跳高技術的特徵是由跑步轉變為跳躍，由支撐轉變為騰空，由水平位移轉變為拋體運動(趙連甲、呂強、史鴻范, 1996)。跳高成績由三個高度所構成，起跳高度、飛程高度與過竿高度，本研究選手在這三個高度分別為 1.14m、0.48m 與 0.01m，其中起跳高度占身體重心最大高度百分比高達 70.7%，飛程高度僅占 29.3%，而世界級女子跳高選手這兩個高度占身體重心最大高度百分比，則分別為 62.3% (起跳高度 1.25m) 與 37.7% (飛程高度 0.76m) (Nicholson et al., 2018)。起跳高度受到選手身高與起跳時身體姿勢的影響，世界級選手身高平均為 1.82m (Nicholson et al., 2018)，比起本研究選手高出 0.12m，起跳高度也比本研究選手高出 0.11m，這意味著身高較高的選手就具有較大的內在優勢，然而世界級選手在起跳高度占身體重心最大高度百分比卻比本研究選手少 8.4%，顯示世界級選手有較大的飛程高度，使得此高度所占百分比高，相對的減少了起跳高度的百分比，因此如何提升飛程高度是跳高成績表現的關鍵因素。飛程高度代表起跳腳離地後，身體重心上升的最大高度，受到選手起跳離地瞬間身體重心垂直速度的影響 (Ritzdorf & Conrad, 1990; Conrad & Ritzdorf, 1990; Dapena, 1988)，本研究發現起跳離地瞬間身體重心垂直速度、飛程高度和飛程高度占身體重心最大高度百分比都與比賽成績達到顯著正相關，顯示選手起跳離地瞬間身體重心垂直速度越快者，將獲得越高的飛程高度，進而提高跳高成績。根據拋體原理，若要提升騰空的最大垂直高度，離地時身體重心垂直速度與距離地面高度是決定性因素，當垂直速度越快，騰空上升的垂直高度越高，其飛程高度就越高；當離地時身體重心距離地面高度越高，提升起跳離地時的起始高度，最後身體重心最大垂直高度就越高。從世界級女子跳高選手有較大的起跳高度 1.25m 和飛程高度 0.76m，其跳高成績可達到 1.95m，就能獲得證實 (Nicholson et al., 2018)，而本研究選手的飛程高度僅 0.48m，這是我國女子跳高選手成績落後的主要原因，也是未來訓練要提升的重要課題。

助跑的目的是為起跳創造適宜的條件，一個理想的助跑是選手能以一種固定的助跑節奏來獲得最適當的助跑速度，讓起跳腳準確地踏在起跳點上 (Humphrey & Nordquist, 2000)。根據牛頓第三運動定律，助跑速度快有助於選手對地面產生較大的垂直作用力，同時間選手也會獲得地面較大的反作用力來產生推蹬力及衝量，在起跳結束獲得較大的垂直速度，而將身體向上蹬離至空中 (翁梓林、邱志宏、杜之譽, 2015; Dapena, 2000)。本研究發現選手在助跑最後第一步水平速度為 5.99m/s，比世界級女子選手的 6.85-7.03m/s 慢很多 (阿江通良等, 2010; Nicholson et al., 2018)。Dapena 等 (1990) 研究 77 名優秀跳高選手發現，助跑結束時的水平速度與起跳結束時的垂直速度達顯著正相關，即助跑水平速度越快，所獲得的起跳垂直速度也越快。由於本研究選手的助跑水平速度較慢，所獲得的起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度也

僅為 3.24m/s，比起世界級女子選手的 3.42-3.98m/s 慢 (阿江通良等, 2010; Nicholson et al., 2018)。此外本研究發現助跑倒數第二步水平速度與比賽成績達顯著正相關，即選手的助跑倒數第二步水平速度越快，則跳高成績越好。在助跑倒數二至三步要強調在不損失水平速度的情況下降低身體重心 (Dapena, 1988)，助跑倒數第二步為起跳創造了先決條件，要積極的向前移動至助跑倒數第一步，來為起跳做準備 (Ritzdorf, 2009)，因此在助跑倒數第二步，其擺動腿 (即非起跳腿) 的膝關節會有較大的屈曲動作來支撐穩定身體並迅速向前移動，這需要較大的下肢力量才能達成 (Dapena, 2000)。若助跑倒數第二步身體重心水平速度較慢，或是非起跳腿的力量不足，將使得助跑倒數第一步和起跳腳著地瞬間的身體重心水平速度下降，無法產生較大的起跳垂直速度，獲得較高跳高成績。因此選手在助跑時產生的水平速度不足，或是不足以運用在起跳階段，那麼就不能透過助跑來幫助他跳得更高 (Dapena, 2000)。

起跳是跳高中最重要的階段，優秀選手能將助跑中所獲得的水平速度，透過起跳階段起跳腿對地面的作用力轉換成起跳的垂直速度，當垂直速度越大，身體重心上升越高，就能跳過更高的高度 (Humphrey & Nordquist, 2000)。因此，在起跳階段身體重心水平速度與垂直速度的轉換將決定跳高成績表現 (Dapena et al., 2006)，可透過速度轉換率 (即起跳階段身體重心垂直速度的變化量除以起跳腳著地瞬間身體重心水平速度) 來判斷選手在起跳階段身體重心速度的轉換效率，當速度轉換率的數值越高，代表選手能將助跑所獲得的水平速度多數轉換成起跳的垂直速度。本研究發現起跳階段身體重心速度轉換率與比賽成績達顯著正相關，即選手起跳階段身體重心速度轉換率越高，則跳高成績越好，本研究發現選手的速度轉換率為 57.99%，和世界級女子選手的速度轉換率達到 66.17%相差甚多 (Nicholson et al., 2018)。

影響速度轉換率有許多的因素，如起跳腿力量、起跳腳著地瞬間的膝關節角度和起跳腳著地瞬間的身體姿勢等 (Dapena, 2000; Greig & Yeadon, 2000; Ritzdorf, 2009)。在助跑結束時，起跳腳著地位在身體的前方，由於選手向前運動的慣性，膝關節伸肌用力阻止膝關節彎曲 (Dapena, 2000)，過去研究發現在起跳腳著地瞬間的起跳腳膝關節角度越大 (即膝關節幾乎不彎曲)，跳高的成績越好 (Greig & Yeadon, 2000)，如果選手起跳腿力量不足將無法克服彎曲程度，而不利於垂直速度的產生。本研究發現選手在起跳階段的最大膝關節彎曲角度為 140.94°，起跳離地瞬間膝關節角度為 168.55°，都小於世界級女子選手的 147°與 171° (阿江通良等, 2010)。Dapena (2000) 指出如果起跳腿能有較大的動態力量 (dynamic strength) 時，選手將能控制更快速且身體重心低的助跑動作，並在起跳時讓膝關節不會屈服 (buckling)。這顯示本研究選手可能因下肢肌力不足，在起跳階段讓起跳腿膝關節彎曲過多，加上離地時膝關節伸展不足，將不利於產生更大的推蹬力量，來提高起跳的垂直速度，這是造成我國選手起跳階段身體重心速度轉換率較低的原因之一。過去研究發現在起跳腳著地瞬間的著地角度較小 (即身體向後傾斜較多)，跳高的成績越好 (Greig & Yeadon, 2000)，本研究選手在起跳腳著地瞬間著地角度為 59.42°，比世界級女子選手的 50.1°大，代表我國選手在起跳腳著地瞬間身體處於較為直立姿勢，由於助跑向前方向的慣性，在起跳階段將使身體更快地向橫竿方向傾斜，降低起跳高度，將不利於身體重心速度的轉換，使得身體重心速度轉換率較低。此外由於起跳

腳著地瞬間身體處於較為直立姿勢，在起跳過程中身體傾斜角度的變化量較小，也不利於產生較大的角動量，進而影響到過竿動作與效率 (Dapena, 1988)。

此外本研究也發現，和世界級女子選手相比，我國選手有較慢的起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度，但在起跳腳離地瞬間身體重心水平速度 3.52m/s ，卻比世界級選手的 3.42m/s 快 (阿江通良等, 2010)。在起跳階段若身體重心水平速度過快時，將使選手在未完成起跳動作就提早向橫竿方向移動，除了影響水平速度與垂直速度的轉換外，也會讓選手缺乏向上起跳動作直接碰觸橫竿而試跳失敗。這樣結果可以從本研究選手起跳飛程角度 42.66° ，小於世界級女子選手 49.9° 獲得印證 (阿江通良等, 2010)。本研究也發現起跳飛程角度和比賽成績達到顯著正相關，即選手的起跳飛程角度越大，則跳高成績越好。起跳飛程角度是起跳腳離地瞬間身體重心合速度向量與水平面所形成之夾角，因此身體重心水平速度與垂直速度的大小將會影響起跳飛程角度。當起跳離地的身體重心水平速度大於垂直速度時，起跳飛程角度將小於 45° ，若要提升起跳飛程角度，則需要降低水平速度或是增加垂直速度來達成。在起跳階段，選手受到地面向後的反作用力，使得身體重心水平速度降低，過程中透過起跳腳的蹬伸動作與自由肢體（兩個手臂與擺動腿）擺動動作，來獲得身體重心垂直速度。因此起跳階段身體重心水平速度降低，若能轉換為更大的身體重心垂直速度（即較大的身體重心速度轉換率），將可增加起跳飛程角度，來提升跳高的高度。

伍、結論

我國女子跳高選手的助跑最後第二步水平速度越快、起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度越快、起跳階段身體重心速度轉換率越高、起跳飛程角度越大與飛程高度越高時，跳高成績表現越好。此外與世界級選手比較發現，助跑速度較慢，在起跳階段水平與垂直方向運動的轉換較差，起跳腿膝關節彎曲較大，在起跳離地瞬間身體重心水平速度過快，導致起跳腳離地瞬間身體重心垂直速度較慢與起跳飛程角度較小，進而影響跳高成績表現，是我國選手動作技術的缺點。本研究結果可提供教練與選手建立理想動作技術之參考資料，進而改進技術、提高運動表現並減少傷害的發生。

陸、實務應用

本研究透過運動生物力學研究方法，分析跳高選手動作表現，其研究步驟與分析運動學參數，可提供研究人員後續研究之參考，分析不同性別或不同等級選手動作表現，亦可針對特定選手進行縱貫性研究，提供給教練與選手做為改進動作技術之參考資料。

此外本研究發現我國女子跳高選手動作和世界級選手差異之所在，要改善這些缺點可透過速度訓練來增強選手絕對速度能力，提高助跑速度；增強最大力量、快速力量與反應力量能力，讓選手能控制以更快速且身體重心低的助跑最後兩步動作，在起跳時不讓膝關節過度

屈服，來獲得最大起跳垂直速度；透過技術訓練，強調助跑最後階段身體維持向內傾斜姿勢至起跳，在起跳腳著地瞬間身體向後傾斜和起跳腳膝關節微小彎曲，來創造良好的起跳開始姿勢，有助於起跳階段的速度轉移，獲得較大起跳垂直速度，來提升跳高成績表現。

利益衝突

本研究無涉及相關利益衝突。

致謝

本研究感謝國立臺灣體育運動大學研究計畫（102DG00107）經費補助，亦感謝研究團隊成員，使本研究計畫能順利執行。

引用文獻

- 中華民國田徑協會 (2020)。全國女子歷年二十傑 (2021 年止)。取自
[https://www.athletics.org.tw/Upload/Web_Page/全國女子歷年二十傑\(2021 年止\).pdf](https://www.athletics.org.tw/Upload/Web_Page/全國女子歷年二十傑(2021年止).pdf)
- 何維華 (2006)。人體測量之運動生物力學應用：核磁共振技術建立人體肢段參數。台北市：台灣運動生物力學學會。
- 李春安 (2010)。優秀跳高運動員的運動科學服務：運動科學的技術診斷 (未出版碩士論文)。國立臺灣體育學院，臺中市。<https://hdl.handle.net/11296/9v2jj7>
- 林芸蔓、張立羣 (2010)。跳高助跑倒數三步之時間分析。2010 台灣生物力學學會及台灣運動生物力學學會聯合年會暨學術研討會暨國際運動生物力學研討會。臺南市：台灣運動生物力學學會。
- 翁梓林、邱志宏、杜之譽 (2015)。穿戴髌腱加壓帶在連續跳躍中對下肢緩衝效果之影響。運動表現期刊, 2(2), 53-58。 <http://dx.doi.org/10.3966%2f240996512015120202004>
- 張簡旭芳、相子元 (2016)。運動表現之研究趨勢。運動表現期刊, 3(2), 49-54。
<http://dx.doi.org/10.3966%2f240996512016120302001>
- 趙連甲、呂強、史鴻范 (1996)。跳高訓練法。北京市：北京體育大學。
- 阿江通良、永原隆、大島雄治、小山紅之、高本惠美、柴山一仁 (2010)。第 11 回世界陸上女子走高跳上位入賞者の跳躍動作のバイオメカニク的分析。主編：佐佐木秀幸、小林寬道、阿江通良。世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術 (171-175 頁)。東京都：財団法人日本陸上競技連盟。
- Becker, J., & Wu, W. F. (2015). Integrating biomechanical and motor control principles in elite high jumpers: A transdisciplinary approach to enhancing sport performance. *Journal of Sport and Health Science*, 4(4), 341-346. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2015.09.004>
- Conrad, A., & Ritzdorf, W. (1990). Biomechanical analysis of the high jump. In G. P. Brüggemann,

- & B. Glad (Eds.), *International Amateur Athletic Federation Scientific Research Project at the Games of the XXIV Olympiad - Seoul 1988 : Final Report* (pp.177–216). Monaco: International Athletic Foundation.
- Dapena, J. (1988). Biomechanical analysis of the Fosbury Flop. *Track Technique*, 104, 3307–3317.
- Dapena, J. (1997). Contributions of angular momentum and catting to the twist rotation in high jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 239–253.
<https://doi.org/10.1123/jab.13.2.239>
- Dapena, J. (2000). High jump. In V. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (pp.284–311). Malden, MA: Blackwell Science.
- Dapena, J., Gordon, J. B., & Meyer, W. (2006). *Scientific Services Project (USA track & field) - High Jump #29 (women)*. Indianapolis, IN: USA Track & Field.
- Dapena, J., McDonald, C., & Cappaert, J. (1990). A regression analysis of high jumping technique. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6(3), 246–261.
<https://doi.org/10.1123/ijsb.6.3.246>
- Greig, M. P., & Yeadon, M. R. (2000). The influence of touchdown parameters on the performance of a High Jumper. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(4), 367–378.
<https://doi.org/10.1123/jab.16.4.367>
- Humphrey, S., & Nordquist, D. (2000). High jump. In J. L. Rogers (Ed.), *USA Track & Field Coaching Manual* (pp. 173–197). Champaign, III: Human Kinetics.
- Lundin, P., & Berg, W. (1993). Approach development in the jumps. *New Studies in Athletics*, 8(1), 45–50.
- Mateos-Padorno, C., García-Manso, J. M., Fuentes García, J. P., & Martínez-Patiño, M. J. (2021). Kinematic analysis of the final stride approach in Spanish elite high jumpers. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 21(3), 421–434.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2021.1908040>
- Mateos-Padorno, C., García-Manso, J. M., Martínez-Patiño, M. J., & Valverde-Esteve, T. (2019). Analysis of effectiveness of free segment actions and antero-posterior and lateral body displacements during the take-off phase of high jump (flop style). *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 19(1), 14–27. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1555737>
- Nicholson, G., Bissas, A., & Merlino, S. (2018). *Biomechanical Report for the IAAF World Championships London 2017 High Jump Women's*. Monaco: World Athletics.
- Ritzdorf, W. (2009). Approaches to technique and technical training in the high jump. *New Studies in Athletics*, 24(3), 31–34.
- Ritzdorf, W., & Conrad, A. (1990). Biomechanical analysis of the high jump. In G.P. Brüggemann and P. Sušanka (Eds.), *International Athletic Foundation Scientific Report on the 2nd World Championships in Athletics, Rome 1987* (pp.G1–50). Monaco: International Athletic

Foundation.

World Athletics. (2021). World Records. Retrieved from: <https://www.worldathletics.org/records/by-category/world-records>

Kinematic Analysis of the Run-Up and Takeoff Motions in Female High Jump Athletes

Li-Chun Chang^{1*}, Hui-Fang Nai¹, Ming-Hsiu Chuang²

¹Department of Sport Performance, National Taiwan University of Sport, Taichung, Taiwan.

²Max Power Fitness, Taipei, Taiwan.

Abstract

Purposes: To investigate the characteristics of the last two steps of the run-up and takeoff techniques in female high jump athletes, and to provide coaches and athletes with reference information to improve high jump motions. **Methods:** Sixteen female high jump athletes (age: 20.4 ± 5.4 years; height: 170.1 ± 4.7 cm; body weight: 58.5 ± 5.8 kg; best performance: 1.65 ± 0.06 m) were enrolled in this study. Two digital cameras, both with three-dimensional filming methods, were used to record the Taiwanese national games, national intercollegiate athletic games, and national high school athletic games. A motion analysis system was employed to obtain kinematic data on the last two steps of the high jump athletes' run-up and takeoff motions. The Pearson product-moment correlation coefficient was used to analyze the correlation between the various kinematic parameters and official results. Significance level was set as $\alpha = .05$. **Results:** Compared with world-class female athletes, the participants in this study registered slower run-up velocity, a weaker transfer from the horizontal to the vertical direction during the takeoff phase, a greater knee flexion angle during the takeoff phase, a faster horizontal velocity of the center of mass (COM) at the end of the takeoff, a slower vertical velocity of the COM at the end of the takeoff, and a lower takeoff angle. The horizontal velocity in the penultimate stride, vertical velocity of the COM at the end of the takeoff, velocity conversion ratio of COM during the takeoff phase, angle of takeoff, and height of COM during flight all exhibited significant relationships with high jump performance. **Conclusion:** High jumpers should aim to improve the velocity of their run-ups, the power of their lower limbs, and the transfer of horizontal motion to vertical motion during the takeoff phase.

Keywords: track and field, fosbury-flop, biomechanics
