

不同人體肢段參數之 重心動態性誤差研究

黃長福、陳重佑、陳帝佑
國立臺灣師範大學
劉宇、李志明
中國文化大學

摘要

本研究的主要目的是以測力板分析獲得原地垂直跳時的重心位置、速度和加速度為效標，計算影片分析法中不同人體肢段參數獲得的人體重心位置、速度和加速度的整體誤差值。實驗以 Kistler 測力板分析系統 (600Hz) 收集、計算國內健康大專男生 18 名 (22.8 ± 3.5 歲、173.5 ± 5.2 公分、67.9 ± 5.5 公斤) 進行原地垂直跳時的重心運動學參數變化，並同步以 Peak Performance 影片分析系統 (120Hz) 記錄動作過程，通過影片分析法輸入不同人體肢段參數，以計算原地垂直跳時的重心運動學參數，再與測力板過程的運動學參數比較其誤差的大小。影片分析使用的人體肢段參數包括：Dempster 屍體法、Clauser 迴歸公式法、Zatziorsky & Seluyanov 的 γ -射線法、胡德貴的電腦斷層掃描法、Hanavan 模型法、Matsui 的數學模型法和王金成的數學模型法。

研究結果顯示垂直跳動作的用力階段重心位移、速度和加速度平均估計標準誤差分別為 0.029 ± 0.009m、0.164 ± 0.040m/s、2.369 ± 0.527m/s²；騰空階段重心位移、速度和加速度平均誤差分別為 0.041 ± 0.016m、0.187 ± 0.061m/s、0.897 ± 0.263m/s²。而通過 Zatziorsky & Seluyanov 的 γ -射線法、胡德貴的電腦斷層掃描法和 Hanavan 模型法獲得的人體肢段參數，對於本研究動作描述重心運動學參數的誤差明顯小於其他的肢段參數 (p<.05)。

本研究的結果將可提供給國內生物力學研究者作為選擇不同人體肢段參數的動態性誤差範圍參考，而本研究開發的方法對於人體測量學的研究與誤差的探究上不僅是一個頗具創意的手段，也是誤差偵測在方法學上的重要突破。

關鍵詞：生物力學、人體測量學、重心、誤差

壹、緒論

一、問題背景

生物力學的研究方法中，影片分析法 (Cinematography) 是研究動作過程的一個重要手段，可是，由於生物力學研究的生物體運動乃屬於非線性、非保守系統、非解析連續性與非均質性 (蘇芳慶, 1991) 的因素，又因為生物活體常常被假定為剛體 (Rigid Body) 結構的鉸鏈連結運動 (Winter, 1990)，為此，不管實驗者在進行影片分析法的數位化過程時，個別肢段 (Segment) 中心計算的精確度，亦或是人體、動物體的整體重心計算之精確度，往往會受到人體肢段參數擇取的影響。

楊亮梅、王金成和翁梓林 (1992) 和呂維加、蘇品和洪友廉 (1990) 以一維人體重心反應板 (Reaction-board) 法為效標，分別進行台灣地區與大陸地區男、女生的不同人體肢段參數使用的重心差異研究，他們的研究結果確有極大的不同：楊亮梅等人認為 Matsui 的人體參數適合於其研究的男、女生受試者 (男生小於 2.63cm、女生小於 0.18cm)；可是呂維加等人的研究卻指出 Zatziorsky & Seluyanov (1983) 的方法較適合於國內的情況 (誤差值小於 $\pm 1.2\text{cm}$)，而 Matsui 的方法也普遍低於實測值 (男生 0.486cm-1.098cm、女生 0.490cm-1.606cm)；楊亮梅等人指出的 Dempster、Clauser 迴歸公式及 Matsui 等三種參數皆適於女生測量重心使用的結論，與呂維加等人認為由男性樣本得到的數據計算女性重心位置會帶來較大的誤差結論是迥然不同的。

除了上述的一維重心反應板法評估人體參數的誤差以外，王順正 (1997) 也曾經以原地垂直跳 (Counter movement jump) 動作的影片分析法中採用 Dempster 和 Zatziorsky & Seluyanov 二種人體參數與通過同步測力板的地面反作用力計算的重心位置變化，觀察三者間的位置差異，並總結出此二種人體參數計算的平均重心差異達 3.82cm，而通過測力板估算的重心上升高度誤差僅達 0.41cm，是最為精準的方法。

綜上所述的人體重心誤差研究，大多人體參數的誤差計算是以靜態的方式進行測試的，縱使呂維加等人曾改變四種姿勢計算重心位置，這依然屬於靜態的測試方法，更遑論人體肢段參數研究者自行測試的靜態方法了；再者，根據 Nigg 指出數學方法推算的各肢段重心與各肢段重量占人體重量的百分比是最為精確的說法，其仍然有 2cm 左右的

誤差，王金成(1993)以數學方法推估而得的人體參數的重心誤差亦有5cm之多。因此，本研究認為為了研究人體運動而擇取人體肢段參數種類的考量，並非單就體型、性別和種族的差異因素來選擇而已，事實上，依據實驗設計的需要，探究誤差的範圍，並依據此一範圍內闡述、分析實驗的結果，方是誤差探求的重要真諦，這也就是說，在今日科技儀器日新月異的環境中，對於一個已能確切的掌握實驗技巧，以盡量避免人為疏失的研究者而言，如何立足於實驗誤差範圍的界線內，作出大膽假設，並予以小心求證的科學態度，才是研究的重點。

二、研究目的

本研究根據測力板測量人體從事原地垂直跳動作的地面反作用力，以積分法（或稱動力學逆過程法）依序計算出人體從事原地垂直跳時的重心加速度、重心速度、重心位置作為效標；並同步攝影系統，通過數位化的處理，與不同人體肢段參數（Dempster屍體法、Clauser迴歸公式法、Zatziorsky & Seluyanov的 γ -射線法、胡德貴的CT法、Hanavan模型法、Matsui的數學模型法和王金成的數學模型法）的重心位置、速度、加速度計算，而推算出原地垂直跳整個過程的重心運動學參數在影片分析法與測力板法間的學估計標準誤差(Standard error of estimate, SEE)值。

貳、研究方法與步驟

一、受試者

本研究的受試者是以國內18名身體健康且肢體發展勻稱的大專學生作為研究對象；其平均年齡、身高和體重分別為 22.8 ± 3.5 歲、 173.5 ± 5.2 公分和 67.9 ± 5.5 公斤。

二、影片分析

研究中原地垂直跳動作的重心運動學資料收集，是以Peak Performance人體動作分析系統Windows版為主要工具。一台Peak高速攝影機(120Hz)架設在受試者的右側，攝影機的主光軸與受試者的矢狀面垂直。同時Peak系統專用的反光球則被固定於受試者之右側頭顱的中心位置、右肩關節、右手肘關節、右手腕關節、右髖關節大轉子處、右膝關節、右踝關節和第五蹠趾關節等，以作為數位化處理時的標誌點，在假設人體左右對稱的情況下，將人體分為7個肢段的剛體結構。

三、測力板分析

受試者原地垂直跳的運動學參數效標，是以Kistler 9287型測力板進行地面反作用

力的收集。本研究以每秒 600 次的頻率收集垂直地面方向的地面反作用力，再通過 BioWare Performance Module 1.0 版分析系統計算原地垂直跳時的重心加速度、速度和位置變化。

四、實驗步驟

實驗測試前先為受試者量測身體的 32 個基本肢段長度、圍度和皮脂厚度等，以作為 Hanavan 人體模型的肢段參數計算。原地垂直跳的測試，乃先啟動 VCR 的攝影系統開始記錄動作的整個過程，再令受試者站上測力板，待其站穩不動後，啟動測力板開始收集地面反作用力的資料，並隨即下達開始動作的口令，使受試者下蹲後起跳離地至落地站好止，為一次測試。每位受試者記錄三次原地垂直跳動作的過程，再擇取最佳的動作過程一次進行數位化的分析。

五、資料的處理

影片分析的數位化處理是以自動追蹤的方式點取人體關節上的標誌點，再藉由輸入七種不同的人體肢段參數，以計算出原地垂直跳動作過程的重心垂直位置、速度和加速度變化；影片分析的數位化處理中，均以零相位移四階數位濾波法 (Butterworth Fourth-Order Zero Lag Digital Filter) 進行平滑 (Smoothing) 的處理，截止頻率 (Cutoff frequency) 選取最佳。測力板的原始力量資料經過 80Hz 的低通濾波處理後，依序計算出垂直方向的重心加速度、速度和位移變化曲線。

上述數值分析中的積分乃採用 Simpson 法計算：

$$\int_0^{N \cdot \Delta t} f(x) \cdot dx = f_0 + \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=0}^{N-2} (f_i + 4f_{i+1} + f_{i+2})$$

Δt 為樣本間的距離、 N 為樣本的個數

以測力板計算的重心運動學參數為實際值效標，不同人體肢段參數計算的重心運動學參數為測量值，進行估計標準誤差值的計算，並找出整個過程的誤差最大值與此一時刻的時相。整個誤差的計算處理，是以 Microsoft Excel 97 版分析。估計標準誤差值的計算公式如下：

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - R_i)^2}{N}}$$

其中 X_i 為影片分析法的測量值； R_i 為測力板的實際值效標。

七種人體參數計算得的運動學參數估計標準誤差值，使用重複量數單因子變異數分

析 (repeated measures one-way ANOVA) 作為差異的顯著性檢定；在達到顯著差異後，則再以杜凱氏 HSD 法 (honestly significant difference) 進行事後比較。本研究的顯著水準設定為 $\alpha = .05$ 。

參、結果與討論

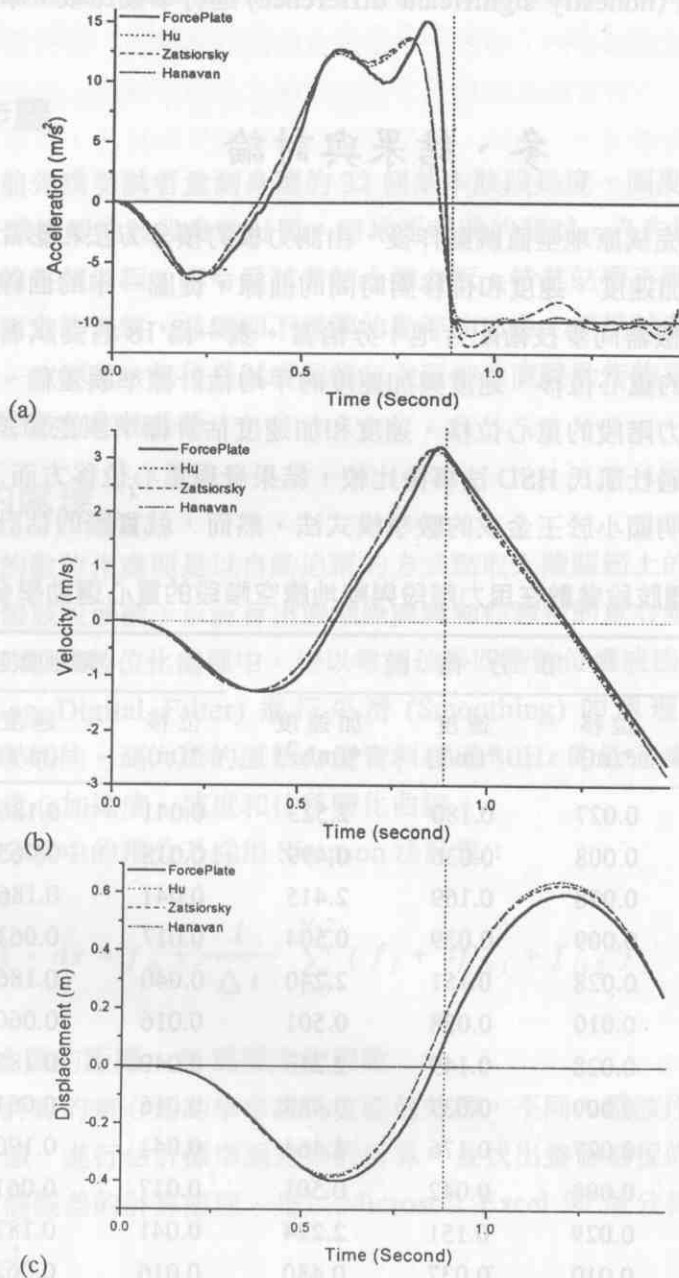
圖一為受試者 A 完成原地垂直跳動作後，由測力板的積分方法和影片分析的微分方法計算得的人體重心加速度、速度和位移對時間的曲線。從圖一中的曲線起始點結合程度，可以知道實驗的儀器同步技術配合地十分恰當。表一為 18 名受試者在測力板用力階段和離地騰空階段的重心位移、速度與加速度的平均估計標準誤差值。

由於在測力板用力階段的重心位移、速度和加速度估計標準誤差值差異達 .05 的顯著水準，因此，再經過杜凱氏 HSD 法事後比較，結果發現重心位移方面，Dempster 屍體法的肢段參數誤差明顯小於王金成的數學模式法，然而，就實際的估計標準誤差值來

表一 不同人體肢段參數在用力階段與離地騰空階段的重心運動學參數誤差

肢段參數	用 力 階 段			離地騰空階段			
	位移 *(m)	速度 *(m/s)	加速度 *(m/s ²)	位移 *(m)	速度 (m/s)	加速度 (m/s ²)	
Dempster	平均數	0.027	0.180	2.523	0.041	0.186	0.921
	標準差	0.008	0.036	0.499	0.018	0.063	0.297
Clauser	平均數	0.028	0.169	2.415	0.041	0.186	0.919
	標準差	0.009	0.039	0.504	0.017	0.061	0.305
Zatsiorsky	平均數	0.028	0.151	2.240	0.040	0.186	0.905
	標準差	0.010	0.038	0.501	0.016	0.060	0.245
胡 德 貴	平均數	0.028	0.149	2.213	0.040	0.185	0.888
	標準差	0.009	0.037	0.489	0.016	0.061	0.236
Matsui	平均數	0.027	0.176	2.463	0.041	0.190	0.901
	標準差	0.008	0.042	0.501	0.017	0.061	0.244
Hanavan	平均數	0.029	0.151	2.224	0.041	0.187	0.858
	標準差	0.010	0.037	0.480	0.016	0.062	0.239
王 金 成	平均數	0.032	0.174	2.505	0.046	0.191	0.889
	標準差	0.010	0.042	0.507	0.018	0.060	0.284
	總平均	0.029	0.164	2.369	0.041	0.187	0.897
	總標準差	0.009	0.040	0.527	0.016	0.061	0.263

*p<.05



圖一 受試者 A 完成原地垂直跳動作，以測力板法和代入三種人體肢段參數的影片分析法後的垂直方向重心加速度-時間曲線 (a)、重心速度-時間曲線 (b)、重心位移-時間曲線 (c)。垂直於時間軸的虛線代表受試者離地瞬間；運動方向向上時，數值為正。

說，王金成身體參數的誤差值不過較 Dempster 參數高約 0.005m 至 0.006m 而已。在重心速度和重心加速度的誤差比較方面，則有 Dempster 屍體法、Matsui 數學模式法、Clauser 迴歸公式法和王金成數學模型法的誤差值明顯大於 Zatziorsky & Seluyanov 的 γ -射線法、胡德貴的電腦斷層掃描法和 Hanavan 模型法的人體肢段參數資料，誤差值的差異約為速度 0.030m/s、加速度 0.310m/s²。

離地騰空階段的重心運動學誤差，除了重心位移對於不同人體肢段參數有顯著差異外，重心速度和重心加速度在不同人體肢段參數的誤差值皆沒有達顯著的不同，顯示騰空階段的重心加速度和重心速度估計標準誤差值分別平均為 0.897m/s² 和 0.187m/s。由於重心位移的估計標準誤差值在不同人體肢段參數方面有顯著差異，所以，本研究進一步以杜凱氏 HSD 法進行事後比較，結果發現王金成的數學模式法在離地騰空階段肢重心位移誤差值，都明顯大於其他的人體肢段參數計算得的誤差值約 0.003 至 0.005m。

總合了騰空階段與用力階段的不同人體肢段參數在運動學變數之誤差分析結果，對於運動中的人體重心位移分析，影片分析時採用 Zatziorsky & Seluyanov 的 γ -射線法或胡德貴的 CT 法，本研究並沒有支持呂維加、蘇品和洪友廉 (1990) 以靜態方法進行肢段誤差計算的結果，而且，以本研究採動態方法估算重心位移的誤差值也較先前關於人體肢段誤差計算的靜態方法誤差值大。至於重心速度和重心加速度的誤差計算，並沒有其他的研究對於此二重心運動學參數進行探討，所以，本研究無法進一步與其他的文獻研究深入比較。不過，對於不同人體肢段參數的使用方面，本研究也支持 Nigg (1994) 指出以核磁共振法、 γ -射線法或 CT 法估算重心運動學參數的精確程度高於其他方法之觀點。

從變異數分析的結果看來，本研究對於採用不同的人體肢段參數在重心運動學變數的描述上，呈現了顯著的差異，可是，不同人體肢段參數產生的誤差範圍大多相當接近，不過數公分之間。關於實驗分析的精度控制和最佳的人體肢段參數選擇問題，雖然不是本研究的主要目的，可是，從研究的分析結果也可以發現每一種肢段參數也有其許程度的誤差，而誤差研究的重要性，主要是在揭露實驗數據可解釋、比較的有效範圍，以期生物力學研究者避免產生實驗數據的統計考驗達顯著差異，差異值卻又屬於實驗誤差值的範圍中，而妄自斷下錯誤的結論。

肆、結 論

本研究根據測力板測量人體從事原地垂直跳動作的地面反作用力，以積分法（或稱動力學逆過程法）依序計算出人體從事原地垂直跳時的重心加速度、重心速度、重心位置作為效標，探討通過影片分析法的七種不同人體肢段參數之運動學誤差，結果顯示垂直跳動作的用力階段重心位移、速度和加速度平均估計標準誤差分別為 0.029 ± 0.009m、

0.164 ± 0.040m/s、2.369 ± 0.527m/s²；騰空階段重心位移、速度和加速度平均誤差分別為 0.041 ± 0.016m、0.187 ± 0.061m/s、0.897 ± 0.263m/s²。而通過 Zatziorsky & Seluyanov 的 γ -射線法、胡德貴的電腦斷層掃描法和 Hanavan 模型法獲得的人體肢段參數，對於本研究動作描述重心運動學參數的誤差明顯小於其他的肢段參數 (p<.05)。

由於本研究僅針對人體運動時的重心運動學參數變化之誤差進行評估，所以，關於人體肢段參數的轉動慣量動態性誤差研究，將是日後研究技術發展的方向。

參考文獻

- 王金成 (1993)。我國男女成人身體肢段資料肢測量研究。國科會計畫編號：NSC81-0301-H-003-507。
- 王順正 (1997)。運動技術分析——運動生物力學研究。高雄：高雄復文。
- 呂維加、蘇品和洪友廉 (1990)：國外五種人體慣性參數的實測研究。(中國運動生物力學學會編)，運動生物力學論文選 (pp.185-202)。北京：人民體育。
- 胡德貴 (1994)：用 CT 法進行中國人體慣性參數的研究。中國體育科學學會學報，14 (4)，50-58。
- 楊亮梅、王金成和翁梓林 (1992)。不同人體之段參數在測量平躺時重心之差異比較。中華民國大專院校八十一年度體育學術研討會專刊 (pp.271-277)。台北：中華民國大專體總。
- 蘇芳慶 (1991)。人體運動生物力學。機械工程，180，19-24。
- Clauser, C.E., McConville, J.T., and Young, J.W. (1969). Weight, volume, and center of mass of segments of the human body. Amrl Technical Report (TR-69-70). Wright-Patterson Air Force Base, OH.
- Dempster, W.T. (1955). Space requirements of the seated operator. WADC Technical Report (TR-55-159). Wright-Patterson Air Force Base, OH.
- Matsui, H. (1958). A new method to determine the center of gravity of a human body by somatometry. (Japanese)
- Nigg, B.M. (1994). Inertial properties of the human or animal body. (In B.M. Nigg and W. Herzog eds.). Biomechanics of the musculo-skeletal system. NY: John Wiley & Sons.
- Winter, D.V. (1990). Biomechanics and motor control of human movement. N.Y.: John Wiley & Sons.
- Zatsiorsky, V. and Seluyanov, V. (1983). The mass and inertial characteristics of the

main segments of the human body. (In H. Matsui and K. Kabayashi eds.), Biomechanics VIII-B. II: Human Kinetics.

Acknowledgment : 本研究感謝中華民國行政院國科會給與專題研究 (編號 : NSC88-2314-H-003-043) 的經費補助。

投稿日期 : 88年11月
審稿日期 : 89年2月
接受日期 : 89年3月

Abstract

The purpose of this study is to use the displacement, velocity, and acceleration of body center of mass when performing the standing vertical jump from the force plate as a criterion to compare the error of videotape when using different body segment parameters. Eighteen healthy male academics were served as the subjects for this study. A Kistler force plate (600N) and a Peak Performance high speed camera (1000) were used to collect the subject performing the landing vertical jump. The vertical ground reaction forces and subject mass were used to calculate kinematic variables for the body center of mass during the vertical jumping. It was used as a criterion to compare the results of the body center of mass calculated from the videotape by using different methods of body segment parameters. Those methods included Dempster, Cavonius & Schuyman, H. H. Hansen, Matsui, and Wang studies. The results showed the average standard error of estimate for displacement, velocity, and acceleration during landing phase were $0.029 \pm 0.009m$, $0.104 \pm 0.030m/s$, $1.200 \pm 0.220m/s^2$, respectively. During the flight phase, the average standard error of estimate for displacement, velocity, and acceleration were $0.041 \pm 0.010m$, $0.157 \pm 0.030m/s$, $0.897 \pm 0.100m/s^2$, respectively. This study also indicated the error of kinematic variables in the body center of mass by Xistorsky & Seluyanov, Ha, and Hanavan model were lower significantly than the other body segment parameters.

The Study of Dynamical Movement of the Human Center of Mass Measurement Errors by Different Body Segment Parameters

¹Chen-Fu Huang, ¹Chung-Yu Chen, ¹Ti-Yu Chen,

²Yu Liu, & ²Chih-Ming Lee

¹National Taiwan Normal University

²Chinese Culture University

Abstract

The purpose of this study is to use the displacement, velocity, and acceleration of body center of mass when performing the standing vertical jump from the force plate as a criterion to compare the errors of videotape when using different body segment parameters. Eighteen healthy male academics were served as the subjects for this study. A Kistler force plate (600Hz) and a Peak Performance high speed camera (120Hz) were synchro-nized to collect the subject performing the standing vertical jump. The vertical ground reaction forces and subject mass were used to calculate kinematical variables for the body center of mass during the vertical jumping. It was used as a criterion to compare the results of the body center of mass calculated from the videotape by using different methods of body segment parameters. Those methods including Dempster, Clauser, Zatziorsky & Seluyanov, Hu, Hanavan, Matsui, and Wang studies. The results showed the average standard error of estimate for displacement, velocity, and acceleration during action phase were $0.029 \pm 0.009\text{m}$, $0.164 \pm 0.040\text{m/s}$, $2.369 \pm 0.527\text{m/s}^2$ respectively. During the flight phase, the average standard error of estimate for displacement, velocity, and acceleration were $0.041 \pm 0.016\text{m}$, $0.187 \pm 0.061\text{m/s}$, $0.897 \pm 0.263\text{m/s}^2$ respectively. This study also indicated the error of kinematical variables in the body center of mass by Zatziorsky & Seluyanov, Hu, and Hanavan model were lower significantly than the other body segment parameters.

Keywords: Sports Biomechanics, Errors, Anthropometry, Center of Mass