

跑步支撐期之動力系統模型

邱靖華

摘要

本研究主要目的是針對跑步支撐期動作建立人體動力系統，用以模擬跑者在支撐期間對地面的推蹬力，及身體各主要關節軸的力矩、功率與相對角動量。在研究方法上，本系統將人體關節結構，規劃成三十八個自由度的多變數系統，此外考量到未來研究上，可以應用本系統發展成爲人體動作控制系統，因此採用 Lagrange-Euler 方程，但捨棄以往學者所用的 D-H 轉換矩陣，改採一般描述齊次轉換矩陣之旋轉運算元及平移運算元，定義七型齊次轉換矩陣來進行設計，使本動力系統，既能用於人體分支體(Branching Body)系統，也能轉換爲狀態空間方程。接著應用兩部攝影機(Peak Performance)與測力板(Kistler)，測試一名受試者(年齡：22 歲；身高：1.81m；體重：75kg)跑步支撐期之相關資料，並經由本人以 C++ 編寫之電腦程式進行模擬，結果發現本動力系統確實能模擬跑者對地面的推蹬力，及人體各主要關節軸的力矩及功率。

關鍵字：支撐期、矩陣、力矩、功率、角動量

壹、前言

跑步是人類與生俱來的生活能力之一，同時也是田徑運動的基礎，就人體機械功能而言，跑步時身體移動速度，主要源自於支撐足對地面的推蹬力，及配合各活動關節肌群所產生的動力，來維持人體動作的穩定性與協調性。縱觀過去文獻，尚未見到一套有效方法，能完整的提供跑步支撐期的推蹬力，及各關節力矩、功率與相對角動量之相關資料。時下是講究高科技訓練的時代，尤其百公尺比賽，成績差距常在零點一秒以下，故教練與選手對於改進技術，與

提升競技成績相關訊息的企求，自不在話下，因此建立跑步支撐期動力系統，提供競技訓練之參考，更顯得十分必要。

由於人體關節系統的自由度眾多，因此跑步支撐期的人體動力系統十分複雜，在設計上，本研究根據人體關節結構，在不失跑步動作特性的情況下，將本系統規劃成三十八個自由度的廣義坐標、廣義速度及廣義加速度，做為動力系統的輸入變數。根據 Fu 等人(1987)及 Lewis 等人(1993)指出，一般 Lagrange-Euler 方程的動力系統，是以 D-H 轉換矩陣(Denavit-Hartenberg matrix)設計的，該矩陣除了可以簡潔的表示方程式之外，還可以讓 Lagrange-Euler 方程易於規劃成控制系統。不過從文獻得知，應用 D-H 轉換矩陣設計的動力系統，一般只運用在單鏈的機械人手臂，但對於人體肢段與肢段間具有分支連接現象的多鏈系統，並未提出有效的解決方案。為了探討此一問題，在本研究方法中，將不採用 D-H 轉換矩陣，而是應用一般齊次轉換矩陣(Homogeneous Transformation Matrix)之旋轉運算元(Basic Homogeneous Rotation Matrices)與平移運算元(Basic Homogeneous Translation Matrices)，定義七型齊次轉換矩陣來替代。

本動力系統所需的肢段參數，包括有肢段長度、質量及慣性張量。關於人體肢段參數，曾有諸多專家學者研究：如 Bate(1957)，Clauer (1969)，Dempster (1955)，Zatsiorsky & Seluyanov(1983)。其中 Zatsiorsky & Seluyanov 採用 Gamma-Ray 進行人體肢段參數研究，相較其他學者而言，他們所建立的人體肢段參數資料較為完整且精確，因此本動力系統所使用的肢段參數資料，將以 Zatsiorsky & Seluyanov 的研究資料為基礎。

本研究主要目的是針對跑步支撐期動作建立人體動力系統，用以模擬跑者對地面的推蹬力，及身體各主要關節軸的力矩及功率。本動力系統僅限於右足支撐期間的動作，不包括左足支撐期及人體騰空期間。而關於本動力系統之數值運算，將由本人輯寫之電腦程式(採用 C++ 物件導向程式輯寫)來進行演算。

一、符號說明

以下所列之數學方程符號與相關說明，是參考學者 Fu 等人(1987)、Lewis 等人(1993)及 Craig(1989)之定義。

L	Lagrangian 方程	K	人體動力系統的總動能
P	人體動力系統的總位能	q_i	廣義坐標
\dot{q}_i	廣義速度	\ddot{q}_i	廣義加速度

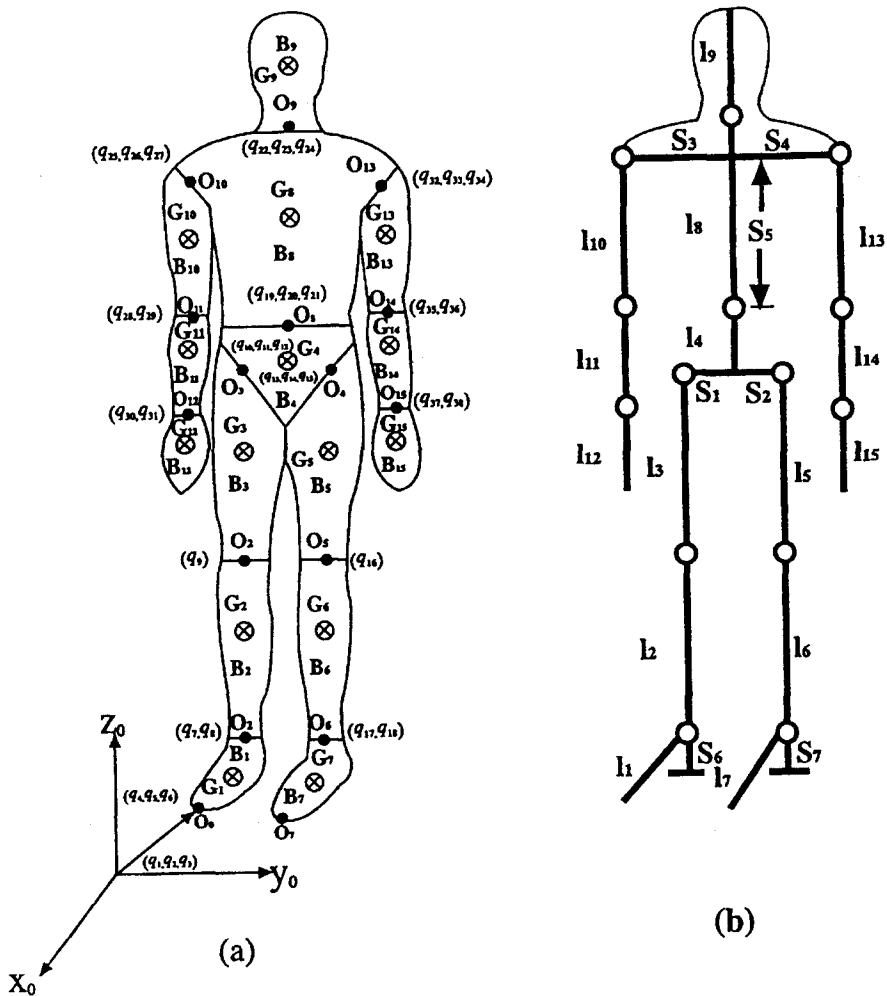
τ_i	廣義力矩	H_i	廣義角動量
P_i	功率	g	$g=[0,0,- g ,0]$, $g=9.8062 \text{ ms}^{-2}$
J_i	4×4 pseudo-inertia 矩陣	\bar{r}_i	第 i 肢段質心向量 $\bar{r}_i=(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T$
U_{ij}	定義為 $\partial^0 A_i / \partial q_j$	U_{ijk}	定義為 $\partial^0 U_{ij} / \partial q_k$
Q_i	為 U_{ij} 及 U_{ijk} 的輔助矩陣	$D(\ddot{q}(t))$	慣性矩陣
$h(q(t), \dot{q}(t))$	柯氏力及離心力向量	$c(q(t))$	重力向量
${}^{i-1}A_i$	第 i 座標框相對於第 $i-1$ 座標框的齊次變換矩陣	0A_i	從 0 坐標框到 i 坐標框的齊次變換矩陣 ${}^0A_i = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \dots {}^{i-1}A_i$

貳、研究方法

一、人體模型

本研究人體模型如圖一(a)所示，是採用 Zatsiorsky&Seluyanov(1983)十六肢段模型，為了簡化動力系統的設計，將原來模型的上腹部(肚臍以上)及胸部合併為上軀幹，即成為十五肢段人體模型，圖中 B_i ($i=1, \dots, 15$) 代表支體編號， B_1 及 B_7 為左右足掌， B_2 及 B_6 為左右小腿， B_3 及 B_5 為左右大腿， B_{12} 及 B_{15} 為左右手掌， B_{11} 及 B_{14} 為左右前臂， B_{10} 及 B_{13} 為左右上臂， B_4 、 B_8 及 B_9 分別為下軀幹、上軀幹及頭部。在圖一(a)中 O_i ($i=0, \dots, 15$)，除了 O_0 及 O_7 分別代表左右足尖外，其餘則表示活動關節點，另外 G_i ($i=1, \dots, 15$) 則表示肢段質心位置(Huston&Passerelle, 1982)。

圖一(b) l_i 表示肢段長度， l_1 及 l_7 為左右小腿長度， l_2 及 l_6 為左右大腿長度， l_3 及 l_5 為左右手掌長度， l_{12} 及 l_{15} 為左右前臂長度， l_{11} 及 l_{14} 為左右上臂長度， l_{10} 及 l_{13} 為左右上臂長度， l_4 、 l_8 及 l_9 分別為下軀幹、上軀幹及頭部長度， s_1 ， s_2 左右髖關節點位置至左右髖關節的距離， s_3 ， s_4 左右肩關節中點位置至左右肩關節的距離， s_5 左右肩關節中點位置至腰關節 O_7 的距離， s_6 ， s_7 左右踝關節至地面高度(Zatsiorsky&Seluyanov, 1983; Huston&Passerelle, 1982)。



圖一 人體模型與肢段長度

二、動力方程式

本研究亦將人體視為鋼體結構，比照此方法建立人體動力模型，如圖一(a)所示，使用右手法則(Right-Hand Rule)，在足掌之外取固定座標框 $ox_0y_0z_0$ 為起點(框表示一個座標系)，首先根據人體關節的結構，以 38 個自由度，做為本系統變數，而每一個自由度(變數)分別使用一個座標框。接著本研究參考學者 Fu 等人(1987)指出的機械手臂動力方程，將本動力系統 Lagrange 方程 $L=K-P$ 寫成：

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{38} \sum_{j=1}^{38} \sum_{k=1}^{38} [\text{Tr}(U_{ij} J_i^T U_{ik}^T) \dot{q}_j \dot{q}_k] + \sum_{i=1}^{38} m_i g^0(A_i \bar{r}_i) \quad (1)$$

而 Lagrange-Euler 方程可寫成：

$$\tau_i = d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i \quad (2)$$

則本系統廣義力可寫成：

$$\tau_i = \sum_{k=1}^{38} D_{ik} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^{38} \sum_{m=1}^{38} h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m + c_i \quad i=1,2,3,\dots,38 \quad (3)$$

方程式(3)中 D_{ik} 、 h_{ikm} 、 c_i 分別可寫成：

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^{38} \text{Tr}(U_{jk} J_j U_{ji}^T) \quad i,k=1,2,3,\dots,38 \quad (4)$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^{38} \text{Tr}(U_{jkm} J_j U_{ji}^T) \quad i,k,m=1,2,3,\dots,38 \quad (5)$$

$$c_i = \sum_{j=i}^{38} (-m_j g U_{ji} \bar{r}_j) \quad i=1,2,3,\dots,38 \quad (6)$$

根據 Fu 等人指出的方法，方程式(3)可用矩陣表示

$$\tau(t) = D(q(t)) \ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t)) \quad (7)$$

關於功率 P_i 則為廣義力與廣義速度的乘積，因此可寫成

$$P_i = \tau_i \dot{q}_i \quad i=1,2,3,\dots,38 \quad (8)$$

三、定義本系統的齊次轉換

一般用以描述齊次轉換矩陣之運算元，根據 Fu 等人(1987)與 Craig(1989)指出，包括有三個旋轉運算元(Basic Homogeneous Rotation matrices)及一個平移運算元(Basic Homogeneous Translation Matric-es)。以上之三個旋轉運算元分別以 $T_{x,q}$ 、 $T_{y,q}$ 及 $T_{z,q}$ 表示，如方程式(9)(10)(11)，而平移運算元則以 T_{tran} 表示，如方程式(12)。在旋轉運算元中以 q_i 代表廣義座標，且設 $c q_i = \cos q_i$ ， $s q_i = \sin q_i$ 。

則 $T_{x,q}$ 、 $T_{y,q}$ 、 $T_{z,q}$ 及 T_{tran} 矩陣形式則可寫成：

$$\mathbf{T}_{x,q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cq_i & -sq_i & 0 \\ 0 & sq_i & cq_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9) \quad \mathbf{T}_{y,q} = \begin{bmatrix} cq_i & 0 & sq_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sq_i & 0 & cq_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{z,q} = \begin{bmatrix} cq_i & -sq_i & 0 & 0 \\ sq_i & cq_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11) \quad \mathbf{T}_{tran} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & y_i \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

在 \mathbf{T}_{tran} 矩陣中 $(x_i, y_i, z_i)^T$ 位置向量，以 p_i 表示， p_i 為第 i 座標框對第 $i-1$ 座標框的平移量，在本研究中將用於描述肢段兩端點的相對位置向量。接著根據齊次轉換矩陣定理，本研究應用方程式(9)(10)(11)(12)之旋轉與平移運算元，定義以下七型齊次轉換矩陣來替代 D-H 轉換矩陣。第一型 i 座標框對 $i-1$ 座標框先平移後再對 X_{i-1} 軸旋轉時定義 ${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{x,q} \mathbf{T}_{tran}$ 。第二型 i 座標框對 $i-1$ 座標框先平移後再對 y_{i-1} 軸旋轉時定義 ${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{y,q} \mathbf{T}_{tran}$ 。第三型 i 座標框對 $i-1$ 座標框先平移後再對 Z_{i-1} 軸旋轉時定義 ${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{z,q} \mathbf{T}_{tran}$ 。當向量 p_i 元素 x_i, y_i 及 z_i 同時為零時，表示 i 座標框與 $i-1$ 座標框原點在同一位置。其次，第四型 i 座標框對 $i-1$ 座標框在 x_{i-1} 軸平移時定義：

$${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{tran-x,q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

第五型 i 座標框對 $i-1$ 座標框在 y_{i-1} 軸平移時定義：

$${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{tran-y,q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

第六型 i 座標框對 $i-1$ 座標框在 z_{i-1} 軸平移時定義：

$${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}_{tran-z,q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

以上第四型 $T_{\text{tran-x,q}}$ 、第五型 $T_{\text{tran-y,q}}$ 及第六型 $T_{\text{tran-z,q}}$ 齊次轉換矩陣，是運用平移運算元 T_{tran} 在三座標軸的平移量，改設為變數，此種定義方法詳見於 Fu 等人(1987)及 Craig(1989)之專書。最後，第七型齊次轉換矩陣 ${}^{i-1}S_i$ (i 為正整數) 較為特殊，既不平移也不旋轉，定義為 4×4 階單位矩陣：

$${}^{i-1}A_i = {}^{i-1}S_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

連續多個 ${}^{i-1}S_i$ 相乘則定義成：

$${}^mS_n = {}^mS_{m+1} {}^{m+1}S_{m+2} \dots {}^{n-2}S_{n-1} {}^{n-1}S_n \quad (m, n \text{ 為正整數, 且 } n > m) \quad (17)$$

從方程式(17)得知， mS_n 還是等於原來 ${}^{i-1}S_i$ 單位矩陣 (mS_n 與其他六型中任一型矩陣相乘，最後還是等於原來與它相乘的矩陣)。

四、定義系統變數

本動力系統如圖一(a)所示，從 $OX_0Y_0Z_0$ 固定座標框到各個肢段的齊次轉換，總共 38 個自由度，關於這些代表自由度的變數及 ${}^{i-1}A_i$ 型態，分別定義於表一中(Huston&Passerelle, 1982)。

表一 變數 q_i 及 ${}^{i-1}A_i$ 型態

變數	${}^{i-1}A_i$ 型態	說明
q_1	${}^0A_1 = T_{\text{tran-x,q}}$	右足掌 B_1 對固定座標框的平移
q_2	${}^1A_2 = T_{\text{tran-y,q}}$	
q_3	${}^2A_3 = T_{\text{tran-z,q}}$	
q_4	${}^3A_4 = T_{y,q} T_{\text{tran}}$	右足掌 B_1 對固定座標框的旋轉
q_5	${}^4A_5 = T_{z,q} T_{\text{tran}}$	
q_6	${}^5A_6 = T_{x,q} T_{\text{tran}}$	
q_7	${}^6A_7 = T_{y,q} T_{\text{tran}}$	右小腿 B_2 對右足掌 B_1 的旋轉
q_8	${}^7A_8 = T_{z,q} T_{\text{tran}}$	

q_9	${}^8A_9 = T_{y,q} T_{tran}$	右大腿 B_3 對右小腿 B_2 的旋轉
q_{10}	${}^9A_{10} = T_{z,q} T_{tran}$	下軀幹 B_4 對右大腿 B_3 的旋轉
q_{11}	${}^{10}A_{11} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{12}	${}^{11}A_{12} = T_{y,q} T_{tran}$	
q_{13}	${}^{12}A_{13} = T_{y,q} T_{tran}$	左大腿 B_5 對下軀幹 B_4 的旋轉
q_{14}	${}^{13}A_{14} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{15}	${}^{14}A_{15} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{16}	${}^{15}A_{16} = T_{y,q} T_{tran}$	左小腿 B_6 對左大腿 B_5 的旋轉
q_{17}	${}^{16}A_{17} = T_{y,q} T_{tran}$	左足掌 B_7 對左小腿 B_6 的旋轉
q_{18}	${}^{17}A_{18} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{19}	${}^{18}A_{19} = T_{y,q} T_{tran}$	上軀幹 B_8 對下軀幹 B_4 的旋轉
q_{20}	${}^{19}A_{20} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{21}	${}^{20}A_{21} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{22}	${}^{21}A_{22} = T_{y,q} T_{tran}$	頭 B_9 對下軀幹 B_8 的旋轉
q_{23}	${}^{22}A_{23} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{24}	${}^{23}A_{24} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{25}	${}^{24}A_{25} = T_{y,q} T_{tran}$	右上臂 B_{10} 對上軀幹 B_8 的旋轉
q_{26}	${}^{25}A_{26} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{27}	${}^{26}A_{27} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{28}	${}^{27}A_{28} = T_{y,q} T_{tran}$	右前臂 B_{11} 對右上臂 B_{10} 對的旋轉
q_{29}	${}^{28}A_{29} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{30}	${}^{29}A_{30} = T_{y,q} T_{tran}$	右手掌 B_{12} 對右前臂 B_{11} 的旋轉
q_{31}	${}^{30}A_{31} = T_{x,q} T_{tran}$	

q_{32}	${}^{31}A_{32} = T_{y,q} T_{tran}$	左上臂 B_{13} 對上軀幹 B_8 的旋轉
q_{33}	${}^{32}A_{33} = T_{x,q} T_{tran}$	
q_{34}	${}^{33}A_{34} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{35}	${}^{34}A_{35} = T_{y,q} T_{tran}$	左前臂 B_{14} 對左上臂 B_{13} 對的旋轉
q_{36}	${}^{35}A_{36} = T_{z,q} T_{tran}$	
q_{37}	${}^{36}A_{37} = T_{y,q} T_{tran}$	左手掌 B_{15} 對左前臂 B_{14} 的旋轉
q_{38}	${}^{37}A_{38} = T_{x,q} T_{tran}$	

五、 J_i 矩陣

根據 Fu 等人(1987)及 Lewis(1993)等人指出， J_i 矩陣被寫成

$$J_i = \begin{bmatrix} (-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{xy} & I_{xz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy} & (I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{yz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz} & I_{yz} & (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})/2 & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

在 J_i 矩陣元素中所需要的肢段參數，包括 i 肢段質量 m_i 、質心的位置向量 $r_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)^T$ ，及 i 肢段的慣性距 (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) ，與慣性積 (I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}) 。

六、日期、地點及影片之數位化資料

民國 88 年 3 月，在國立台灣師範大學分部田徑場進行實地影片拍攝。本研究利用 Peak 電腦軟體 Motus，首先將影片中人體設定成二十二個參考點位置，再把參考點轉換為 3D 數位化的座標資料。

參、結果與討論

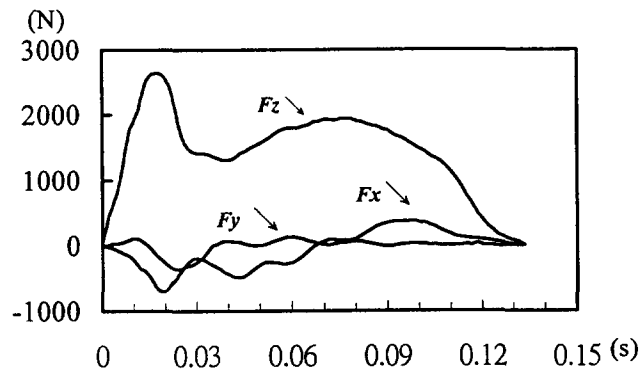
一、測試資料取得

本研究測試資料的取得，包括測力板與影片數位化資料兩部份。在測試過程，受試者熱身後，從距離測力板中心位置 30 公尺處逐漸加速，踩踏過測力板

中心位置 10 公尺以上，方開始減速直到停止。總共測試三次，每次受試者右腳掌必須完全踩在測力板上才算成功。吾人根據所拍攝的結果，取其中一次最為清晰的影片資料，作為本研究的樣本。

二、測力板資料

測力板的截取頻率為 600Hz，每次截取時間為 5 秒，蒐集的力量資料，包括了矢狀軸(前後)、橫軸(左右)及縱軸(上下)等三個方向軸力量，即固定座標框三個方向軸力量。受試者在支撐期間，身體重心的平均速率 7.739ms^{-1} ，測試的力量曲線(未經平滑修勻)，如圖二所示，支撐期時間 0.1333s，其縱軸 F_z 的蹬地力量曲線，剛開始出現的力量波形較尖銳較高，接著再出現一個較平滑的次大力量波形，分別為 2637 N 及 1934N，橫軸 F_y 力量介於 125 N 與 -359N 之間，矢狀軸 F_x 力量介於 -697 N 與 365N 之間。



圖二 測力板三個方向軸力量

三、影片數位化資料

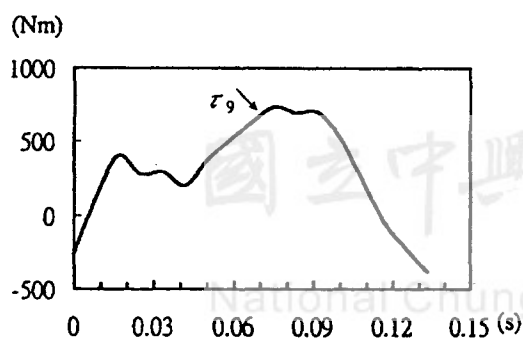
本研究影片數位化資料取得，是以兩部 Peak Performance 攝影機，拍攝以 25 個參考球架設的 $3 \times 2.5 \times 2.5\text{m}^3$ 實驗空間(矢狀軸 3m、橫軸 2.5m 及縱軸 2.5m)，根據 Peak Performance 原廠軟體(Motus 4.3 版)，自動按設定取得參考球的座標值，做為直接線性轉換(最小平方法)之已知條件，轉換後如附錄二所示。參考球的座標值與估計值之誤差：x 軸(矢狀軸)方向 0.003，y 軸(縱軸)方向 0.003，z 軸(橫軸)方向 0.006。此外，三個方向軸誤差百分比；x 軸方向 0.157，y 軸方向 0.150，z 軸方向 0.286。就一般三度空間的直接線性轉換，三個方向軸的誤差百分比 0.5 以下，尚屬容忍範圍，因此可確信本研究影片數位化資料，是在可信的範圍之內。

四、廣義座標

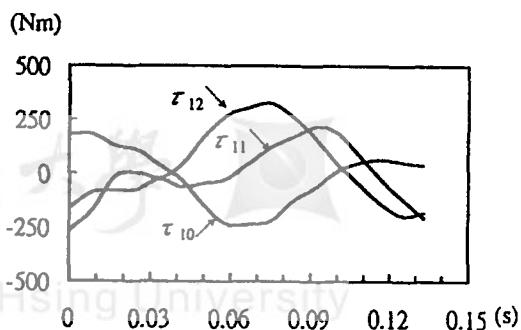
本研究經由影片取得跑步支撐期數位化資料，並以 Mutos 軟體內設 Cubic Spline，對人體 22 點數位化座標值予以平滑處理，再運用本人輯寫之電腦程式，將平滑後之座標值轉換為廣義座標 q_i ，其中 q_1, q_2, q_3 的單位為公尺(m)， q_4 至 q_{38} 的單位為弧度(rad)。由於本研究是採用攝影機與測力板同步蒐集資料，攝影機每秒拍攝 60 張，每張間隔 1/60s，而測力板以 600Hz 蒐集資料受試者踩板資料，取樣間隔 1/600s，兩者時間間隔相差十倍，為了使攝影機與測力板的搭配更精確，本研究在數位化座標值轉換為廣義座標之前，先以 Spline 內插法將影片數位化資料，內插成間隔 1/120s 數位化資料，使攝影機與測力板兩者的時間間隔，從相差十倍下降為五倍。

五、力矩

本動力系統模擬所獲得之廣義力， τ_1 至 τ_3 代表力，單位 Nm。 τ_4 至 τ_{38} 代表力矩，單位 Nm，其中 τ_4 至 τ_6 為足尖支點力矩，是屬於外力矩， τ_7 至 τ_{38} 為人體關節力矩。如圖三、四及五所示，僅列出支撐腳之右膝關節及右髖關節的力矩，其中右膝關節 τ_9 及右髖關節 τ_{12} ，所負載的力矩最大值相較人體其他關節大，它們有一個共同的特徵，皆以座標框 y 軸當旋轉軸，因此使支撐腿表現出來的動作，主要展現在跑步前進方向的推蹬能力。因此我們可以了解受試者跑步支撐期間，則以負責 y 軸轉向的肌肉力量較為重要，尤其是支撐腿之膝及髖關節。



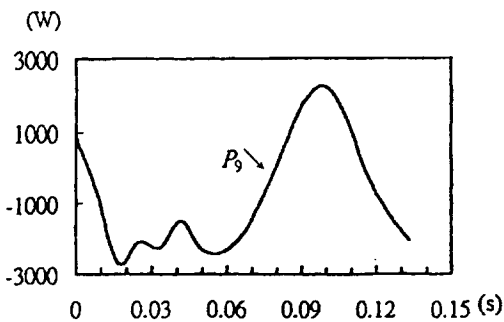
圖三 右膝關節力矩



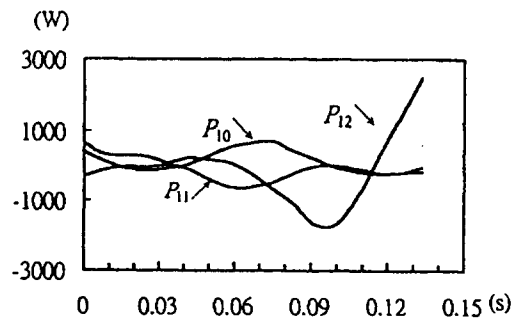
圖四 右髖關節力矩

六、功率

功率一詞，在跑步運動中所代表的意義，即肌肉爆發力，此爆發力量關係著在一特定時間內跑步的加速能力，及能量消耗。因此，人體跑步期間產生的功率，對於短跑或長距離跑選手的運動能力，是一個重要的參考資料。經模擬獲得之主要關節功率曲線，如圖五、六所示，僅列出支撐腳之右膝關節及右髖關節的力矩，其中以右膝關節 P_9 及右髖關節 P_{12} ，所負載的功率相較其他關節大，它們如同關節力矩一樣，旋轉軸皆為該座標框的 y 軸，由此可知跑步支撐期間之人體肌肉爆發力，主要用於腿部的推蹬(支撐腳)與前後擺動(擺動腳)。因此一百公尺或兩百公尺的短跑，訓練應以腿部肌肉爆發力的強化為主要訴求。



圖五 右膝關節功率



圖六 右髖關節功率

肆、結論

本研究歷經理論方法的設計，電腦程式的輯寫，一直到跑步支撐期實際動作的測試，最後發現：

- 一、本研究所定義之七型齊次轉換矩陣，比 D-H 轉換矩陣，更能廣義的描述人體分支體系統的肢段位置。
- 二、本研究成功的將跑步支撐期動作之影片數位化資料，轉化成人體之關節角度，其中涵蓋了具有 3 個自由度的關節軸。
- 三、經由測試結果得知，本動力系統確實能模擬跑者對地面的推蹬力，及人體各主要關節軸的力矩、功率。

陸、參考文獻

- Asada, H., & Slotine, J. J. E. (1986). Robot Analysis and Control. New York: Wiley & Sons, Inc.
- Banks, S. P. (1986). Control Systems Engineering. Britain: Prentice-Hall International (UK) Ltd.
- Barter, J. T. (1957). Estimation of the mass of body segments. WADC Technical Report., Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 57-160.
- Beckett, R., & Chang, K. (1968). An Evaluation of the Kinematics of Gait by Minimum Energy. *J. Biomechanics*, 1, 147-159.
- Clauser, C. E., McConville, J. T. & Young, J. W. (1969). Weight, volume and center of mass of segment the human body. AMRL Technical Report 60-70, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 69-70.
- Craig, John J. (1989). Introduction to Robotics Mechanics and Control U.S.A: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Dempster, W. J. (1955). Space Requirements of the Seated Operator. WADC Technical Report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 55-159.
- Fu, K. S., Gonzalez, R. C., & Lee, C. S. G. (1987). Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Hinrichs, M. N., Cavanagh, P. R. & Williams, K. R. (1987). Upper Extremity Function in Running. I: Center of Mass and Propulsion. *J. Biomechanics*, 3, 222-241.
- Hinrichs, M. N., Cavanagh, P. R. & Williams, K. R. (1987). Upper Extremity Function in Running. II: Angular Momentum Consideration. *J. Biomechanics*, 3, 242-263.
- Hinrichs, M. N., Cavanagh, P. R. (1983). Upper Extremity Contributions to Angular Momentum in Running. In Biomechanics VIII-B (edited by H. Matsui & K. Kobayashi), pp. 641-647. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Huston, R. L., & Passerelle, C. E. (1971). On the Dynamics of a Human Body Model. *J. Biomechanics*, 4, 369-378.
- Huston, R. L., & Passerelle, C. E. (1982). The Mechanical of Human Body Motion. In D. N. Ghista (Eds.). Human Body Dynamics: Impact, Occupational, and Athlete Aspects (pp. 204-247). Oxford: Clarendon Press.

- Lewis, F. L., Abdallah, C. T., & Dawson, D. M.(1993). Control of Robot Maripula-tors. New York : Macmillan Publishing Company.
- Lin, D. C., & Dillman, C. J. (1983). Optimal Stride Length in Running.Biomechanics in Sports. In J. Terauds (Eds.). Research Center for Sports, 317-337.
- Payne, A. H. (1983). Foot to Ground Contact Forces of Elite Runners .In Biomechanics VIII-B (edited by H.Matsui & K.Kobaya-shi) ,pp.746-753. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Ramey, M. R., & Yang, A. T. (1981). A Simulation Procedure for Human Motion Studies. J. Biomechanics, 14, 203-213.
- Spong, M.W., & Vidyasagar, M.(1989). Robot Dynamics and Control. New York: Wiley & Sons,Inc.
- Zatsiorsky, V. & Seluyanov,.(1983).The Mass and Inertia Charac-teristics of the Main Segment of the Human Body. In Biomechanics VIII-B (edited by H.Matsui&K.Kobayashi), pp.152-1159. Champaign, IL: Human Kinetics.

