第三章、方　法

本研究的方法與步驟分為七個部分加以說明：一、研究對象。二、實驗時間與地點。三、實驗儀器設備。四、實驗場地佈置。五、實驗步驟。六、資料收集方法。七、資料處理方法

第一節、研究對象

本研究以男性鉛球選手（慣用右手投擲）為對象，國內優秀之旋轉式與背向滑步式鉛球投擲選手各 3 名，共 6 名。

表 3-1-1：受試者基本資料表

	慣用投擲技術	年齡 (歲)	身高 (cm)	體重 (Kg)	正式比賽最佳成績 (m)
R1	旋轉式	23	194	133	18.18
R2	旋轉式	25	175	128	17.53
R3	旋轉式	22	165	72	14.81
G1	背向滑步式	21	177	109	15.92
G2	背向滑步式	20	176	103	15.47
G3	背向滑步式	18	178	111	14.10
	平均數	21	177	109	16.00
	標準差	2	9	21	1.58

第二節 、實驗時間地點

（一） 實驗時間：九十四年三月間進行實驗。

（二） 實驗地點：國立臺灣師範大學分部田徑運動場。

第三節、實驗儀器設備

本實驗儀器設備分為資料收集部分、資料處理部分、其他部分：

一、資料收集部分：

（一） Redlake 高速數位攝影機四台。

（二） 三度空間標定參考架一座（Peak Calibration Frame，25 點）。

（三） KISTLER 測力板二塊(60 cm X 40 cm)，包含個人電腦及放大器二部。

（四） A/D 類比-數位訊號轉換器

（五） 16 頻道的訊號接收器

二、資料處理部分：

（一） Kwon3D Motion System 影像分析軟體。

（二） KwonGRF 測力板擷取分析軟體。

（三） Redlake CAMARA 影像擷取軟體。

三、其他部分：

（一） 特製的投擲圈（見圖 3-3-1）。

（二） 鉛球一個。

（三） 插牌六個。

（四） 皮尺一捲。

（五） 號碼牌二組。

（六）攝影機腳架二個。

（七）遮陽傘五個。

（八）延長線六個。

圖 3-3-1：特製的投擲圈

第四節、實驗場地佈置

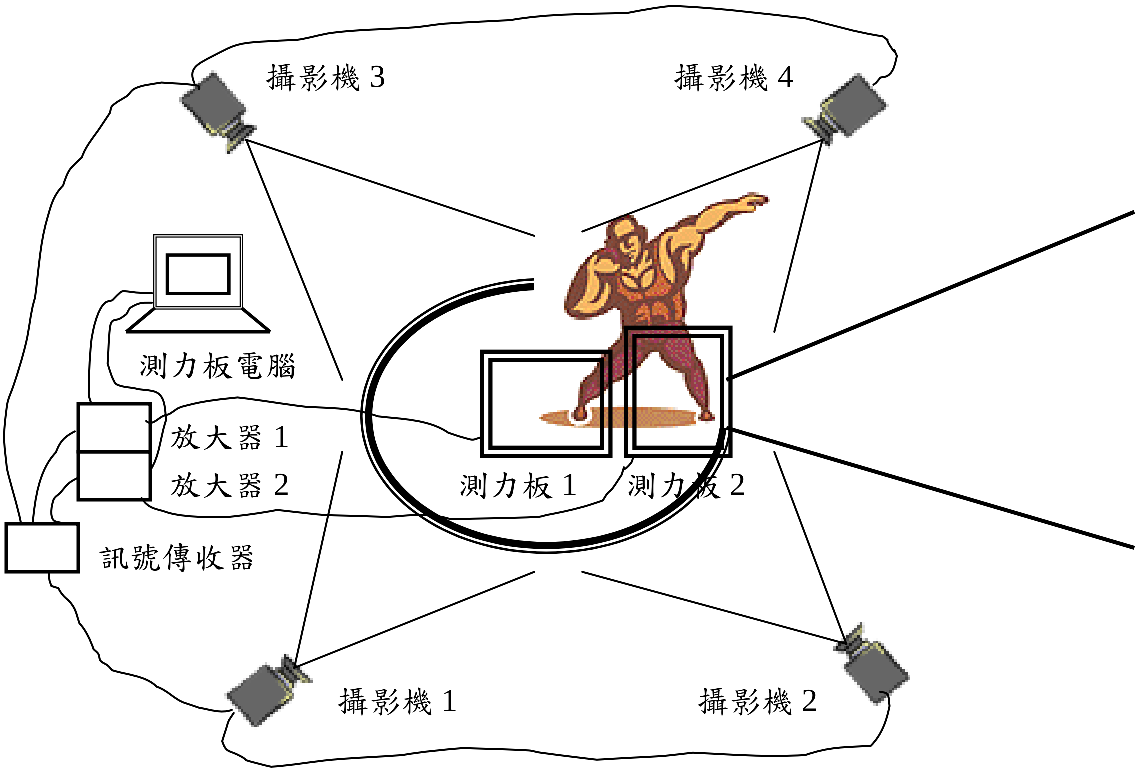

圖 3-4-1：實驗場地佈置

第五節、實驗說明與流程

本研究之實驗說明與流程分為（一）動作要求，（二）實驗流程等部分，依序說明如下：

（一）動作要求：

本實驗要求受試者持重量 16 磅的鉛球，執行最大努力之旋轉式與背向滑步式鉛球投擲動作。

（二）實驗流程：

本研究實驗流程如下：

1. 受試者填寫個人基本資料表，並告知其實驗過程、及此研究之目的。

2. 簽寫受試者同意書，並告知受試者隨時可以退出本實驗。

3. 實驗場地安全之維護：

   (1) 研究進行時，將聘請運動傷害防護員在旁，協助處理可能發生之運動傷害。

   (2) 投擲區將設警示線，以防其他人任意進入。

4. 要求受試者熱身 30 分鐘。

5. 將 Peak 三度空間標定參考架置於鉛球投擲圈內進行拍攝。

6. 正式拍攝時，要求受試者視此實驗如同正式比賽，盡全力投擲。

7. 每位受試者投擲一次完後，即進行投擲距離之測量。

8. 測量完投擲距離後，進行下一位受試者的投擲，依此類推，每人投擲六次。

9. 為了避免受試者投擲造成疲勞，受試者兩次投擲中間休息至少五分鐘，

10. 再次將 Peak 三度空間標定參考架置於鉛球投擲圈內進行拍攝。

11. 取投擲距離最佳之投擲動作進行運動學及關節力矩分析。

第六節、實驗資料收集方法

一、運動學資料收集方法：

本實驗利用 4 台 Redlake 高速數位攝影機（速度 125 Hz；快門 1/650 sec）進行受試者投擲動作影像之收集（見圖 3-4-1）。

二、動力學資料收集方法：

本實驗 Kistler 測力板所使用的訊號擷取為 1250Hz，而全部收集的時間為 3 秒，兩個測力板分別置於投擲圈中間及前半部，收集下肢動力學資料（見圖 3-4-1）。

第七節、實驗資料處理方法

本研究實驗資料處理的方法分為三個部分做說明：一、運動學資料處理方法；二、動力學資料處理方法；三、統計方法。

一、運動學資料處理方法：

本實驗透過 Redlake CAMARA 影像擷取軟體得到影像資料，之後再由 Kwon3D 動作分析系統進行直間線性轉換（DLT）與各參數的運算，其中三度空間的絕對直角座標與場地的相對關係如圖 3-7-1 所示，鉛球投擲方向定義為 Y 軸，垂直方向定義為 Z 軸，與投擲方向垂直的方向定義為 X 軸。並且以 Butterworth 4th-order Zero Lag Digital 程式（截斷頻率 6Hz），對原始資料進行修勻，最後得到所要的運動學參數資料。

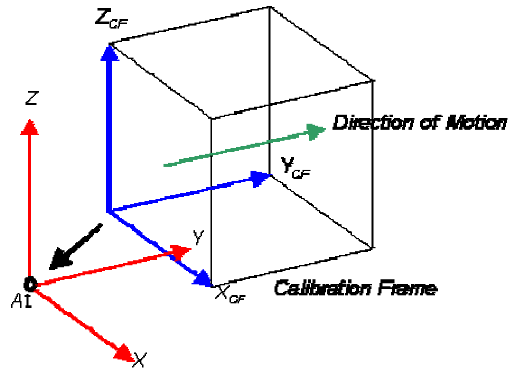

圖 3-7-1：三度空間絕對直角座標與場地座標的相對關係（擷取自 Kwon 3D 網站）

表 3-7-1：人體肢段參數

	肢段重心位置(離近端)(CM)(%)	肢段重量(Mass)(%)	肢段轉動慣量-額狀軸(Ixx)(kg · cm^2)	肢段轉動慣量-矢狀軸(Iyy)(kg · cm^2)	肢段轉動慣量-縱軸(Izz)(kg · cm^2)
軀幹	47.66	46.84	25.55	31.82	15.17
頭	50.00	8.26	25.82	26.47	28.36
上臂	43.60	3.25	29.98	30.69	12.08
前臂	43.00	1.87	28.80	29.23	10.35
手掌	46.80	0.65	46.28	50.84	25.59
大腿	43.30	10.50	32.04	31.51	13.58
小腿	43.40	4.75	29.18	29.18	7.67
足	50.00	1.43	25.69	26.94	12.45

（一）人體肢段模型

在人體模型方面，設定關節位置共二十一個標誌點（Landmark），以及鉛球重心一個標誌點，此外，將人體簡化成十四個肢段（Segment）(見圖 3-7-2)，且將人體的運動假定是各肢段密度相等的剛體（Rigid Body）結構，肢段參數採用 Kwon3D 動作分析系統之內建參數（見表 3-7-1）（Kwon, 1993, 1996, 2001）。以肢段近端及遠端的兩個點（關節點）來代表肢段位置，頸部包含在頭部內，軀幹則不考慮脊椎的彎曲。

1、二十一個人體標誌點（Landmark）為：

頭的中心位置、右耳、左耳、右肩關節、左肩關節、右手肘關節、左手肘關節、右手腕關節、左手腕關節、右中指根部、左中指根部、右髖關節、左髖關節、右踝關節、左踝關節、右腳跟、左腳跟、右腳尖、左腳尖（見圖 3-7-2）。

2、十四個人體肢段（Segment）為：

頭、軀幹、右上臂、左上臂、右前臂、左前臂、右手掌、左手掌、右大腿、左大腿、右小腿、左小腿、右足、左足（見圖 3-7-2）。

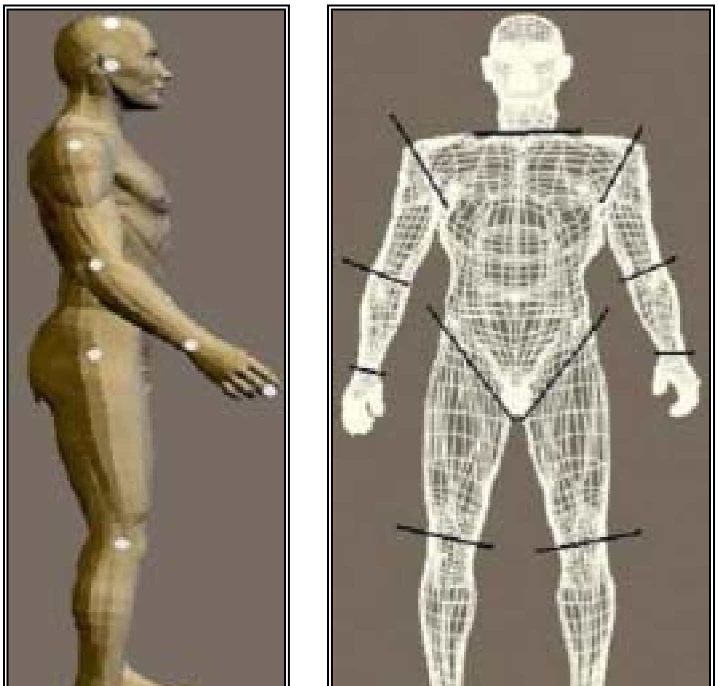

圖 3-7-2：人體標誌點、肢段模型

（二）運動學資料數位化的過程

1、資料數位化

本研究是使用 Kwon3D 動作分析系統，分別點取四部攝影機鉛球投擲動作的人體二十一個關節標誌點及一個鉛球標誌點，透過三度空間座標系統資料的直接線性轉換後，即可獲得實際的三度空間座標值。

2、資料的修勻

從影片轉換過來的座標數據稱為「原始數據」（Raw Data），而原始數據中常常參雜有干擾（noise），這些干擾的來源包括攝影機的震動、數位化過程的人為判斷誤差或是轉換過程中的一些隨機誤差…等（Winter, 1990），所以，利用數位平滑技術以降低誤差的方法就顯得相當重要。

本研究採用的平滑方法是 Kwon3D 動作分析系統提供的零相位移數位濾波法（Butterworth Fourth-order Zero Lag Digital Filter）將數位化後的原始資料加以修勻。

本研究的數位濾波法中，選用的截止頻率（Cutoff Frequency）是 6 Hz；修勻的方代是以原始數據帶入公式（3）中從頭至尾過濾一次，是為二階低通濾波（Butterworth-type low-pass filter of second order），可是這將會在截止頻率處有 90 度的滯後相移（phase lag），而產生相失真（phase distortion），所以為了消除此滯後相移的情形，則再將修勻後的

資料自尾至頭修勻一次，使相位前移 90 度，此即為零相位移數位濾波法。（Winter, 1990）

二、動力學資料處理方法：

由測力板所測得的資料將使用 KwonGRF 軟體中提供的程式進行 low pass 的濾波，擷取的頻率為 1250Hz。資料濾波後，再利用 KwonGRF 軟體程式計算分析出我們所需要的參數。利用 KwonGRF 軟體分析出的資料與 Kwon3D 軟體結合，來得到逆動力學參數資料，求得下肢各關節的力矩和 Power（肌肉做功率）。

由於測力板（KISTLER）是使用以“作用力”為方向的座標系統，見圖 3-7-3（a），也就是說所測量到的是人體作用在測力板上的力值，然而本研究在解釋主動的推進力（propulsion）和被動的制動力（braking force）時，是使用以“反作用力”為方向的座標系統，見圖 3-7-3（b），而且在計算逆動力學參數是以地面反作用力為外力作用在人體上，所以在測力板所測得的資料做以下的轉換：

（1）Y 方向的力、力矩值，正值改負值，負值改正值。

（2）X、Z 方向的位置座標值，正值改負值，負值改正值。

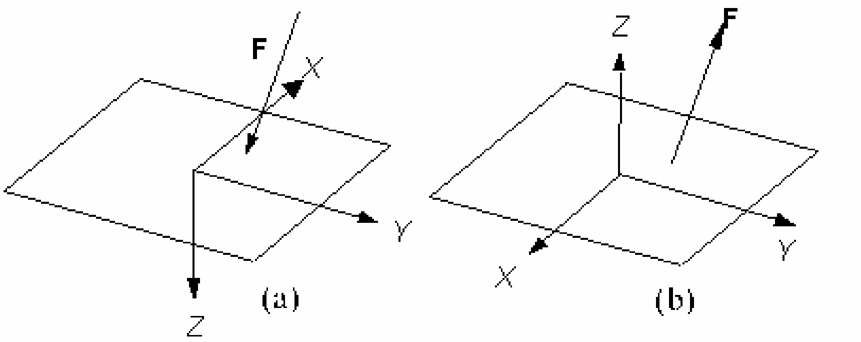

圖 3-7-3（a）：“作用力”為方向的座標系統
（b）：“反作用力”為方向的座標系統
（擷取自 Kwon 3D 網站）

（一）參考座標及相關定義

為了協助建構三度空間參考座標，在此做了一些相關之定義。髖中點定義為左髖與右髖連線的中點；肩中點定義為左肩與右肩連線的中點；軀幹向量定義為從髖中點指向肩中點的單位向量。

在本研究中，定義三度空間下肢左右髖、膝、踝參考座標（圖 3-7-4；表 3-7-2；表 3-7-3；表 3-7-4；表 3-7-5；表 3-7-6；表 3-7-7；表 3-7-8；表 3-7-9），來對各分解力矩做解剖學上的相關動作解釋，提供這些值的相關意義。髖參考座標是幫助解釋由軀幹作用到髖的力、力矩相關意義（表 3-7-3；表 3-7-7）；膝參考座標是幫助解釋由大腿作用到小腿的力、力矩相關意義，解剖學上的相關動作解釋及相關意義（表 3-7-4；表 3-7-8）；踝參考座標是幫助解釋由小腿作用到腳的力、力矩相關意義，解剖學上的相關動作解釋及相關意義（表 3-7-5；表 3-7-9）（Feltner & Dapena, 1986; Fleisig, Andrews, Dillman, Satterwhite & Escamilla, 1996）。

力、力矩值標準化的方法，力值除以體重（單位：牛頓－N），並以百分比表示（百分比體重－%BW），力矩值除以體重與身高（單位：公尺－m）的乘積，並以百分比體重-身高表示（百分比體重身高－%BW-BH）（Escamilla, Fleisig, Barrentine, Andrews & Moorman, 2002）

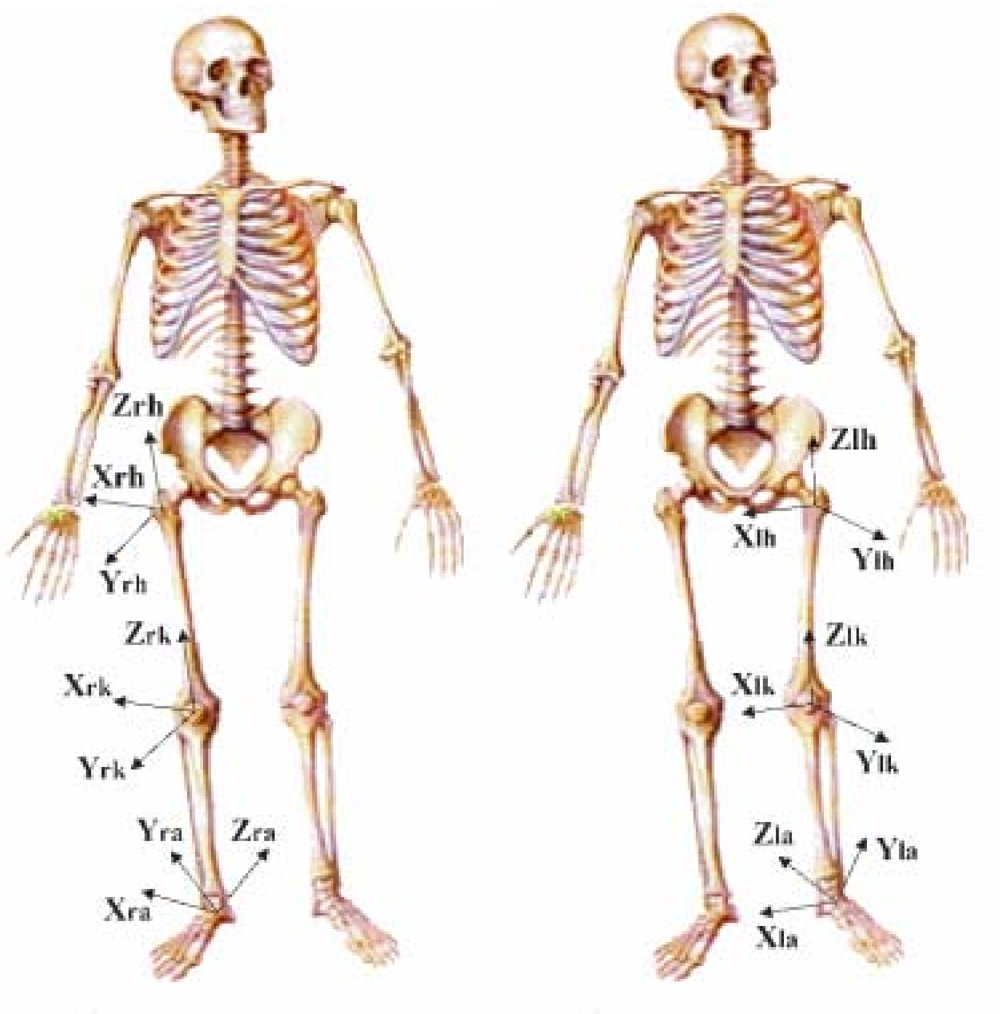

圖 3-7-4：左右髖、膝、踝參考座標圖

表 3-7-2：右髖、膝、踝參考座標

參考座標	單位向量	定義	描述
右髖參考座標 (R_{rh})	X_{rh}	$-Z_{rh}$向量和軀幹向量乘積的單位向量方向	右髖的向外方向
	Y_{rh}	Z_{rh}向量和X_{rh}向量乘積的單位向量方向	右髖的向前方向
	Z_{rh}	從右膝到右髖方向	右大腿的向近端方向
右膝參考座標 (R_{rk})	X_{rk}	$-Z_{rk}$向量和Z_{rh}向量乘積的單位向量方向	右膝的向外方向
	Y_{rk}	Z_{rk}向量和 X_{rk}向量乘積的單位向量方向	右膝的向前方向
	Z_{rk}	從右踝到右膝方向	右小腿的向近端方向
右踝參考座標 (R_{ra})	X_{ra}	$-Z_{ra}$向量和Z_{rk}向量乘積的單位向量方向	右踝的向外方向
	Y_{ra}	Z_{ra}向量和X_{ra}向量乘積的單位向量方向	右踝的向前方向
	Z_{ra}	從右趾到右踝方向	右腳的向近端方向

表 3-7-3：右髖力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

R_{rh}向量	右髖_力	右髖_力矩
$+X_{rh}$	向外 Lateral	屈曲 Flexion
$-X_{rh}$	向中 Medial	伸展 Extension
$+Y_{rh}$	向前 Anterior	內收 Adduction
$-Y_{rh}$	向後 Posterior	外展 Abduction
$+Z_{rh}$	向上 Superior	內旋 Internal rotation
$-Z_{rh}$	向下 Inferior	外旋 External rotation

表 3-7-4：右膝力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

向量	右膝_力	右膝_力矩
$+X_{rk}$	向外 Lateral	伸展 Extension
$-X_{rk}$	向中 Medial	屈曲 Flexion
$+Y_{rk}$	向前 Anterior	內收 Adduction
$-Y_{rk}$	向後 Posterior	外展 Abduction
$+Z_{rk}$	向上 Superior	內旋 Internal rotation
$-Z_{rk}$	向下 Inferior	外旋 External rotation

表 3-7-5：右踝力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

向量	右踝_力	右踝_力矩
$+X_{ra}$	向外 Lateral	足背屈 Dorsi flexion
$-X_{ra}$	向中 Medial	蹠屈 Plantar flexion
$+Y_{ra}$	向前 Anterior	內收 Adduction
$-Y_{ra}$	向後 Posterior	外展 Abduction
$+Z_{ra}$	向上 Superior	內翻 Varus
$-Z_{ra}$	向下 Inferior	外翻 Valgus

表 3-7-6：左髖、膝、踝參考座標

參考座標	單位向量	定義	描述
左髖參考座標 (R_{lh})	X_{lh}	$-Z_{lh}$向量和軀幹向量乘積的單位向量方向	左髖的向中方向
	Y_{lh}	Z_{lh}向量和X_{lh}向量乘積的單位向量方向	左髖的向前方向
	Z_{lh}	從左膝到左髖方向	左大腿的向近端方向
左膝參考座標 (R_{lk})	X_{lk}	$-Z_{lk}$向量和Z_{lh}向量乘積的單位向量方向	左膝的向中方向
	Y_{lk}	Z_{lk}向量和 X_{lk}向量乘積的單位向量方向	左膝的向前方向
	Z_{lk}	從左踝到左膝方向	左小腿的向近端方向
左踝參考座標 (R_{la})	X_{la}	$-Z_{la}$向量和Z_{lk}向量乘積的單位向量方向	左踝的向中方向
	Y_{la}	Z_{la}向量和X_{la}向量乘積的單位向量方向	左踝的向前方向
	Z_{la}	從左趾到左踝方向	左腳的向近端方向

表 3-7-7：左髖力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

向量	左髖_力	左髖_力矩
$+X_{lh}$	向中 Medial	屈曲 Flexion
$-X_{lh}$	向外 Lateral	伸展 Extension
$+Y_{lh}$	向前 Anterior	外展 Abduction
$-Y_{lh}$	向後 Posterior	內收 Adduction
$+Z_{lh}$	向上 Superior	外旋 External rotation
$-Z_{lh}$	向下 Inferior	內旋 Internal rotation

表 3-7-8：左膝力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

向量	左膝_力	左膝_力矩
$+X_{lk}$	向中 Medial	伸展 Extension
$-X_{lk}$	向外 Lateral	屈曲 Flexion
$+Y_{lk}$	向前 Anterior	外展 Abduction
$-Y_{lk}$	向後 Posterior	內收 Adduction
$+Z_{lk}$	向上 Superior	外旋 External rotation
$-Z_{lk}$	向下 Inferior	內旋 Internal rotation

表 3-7-9：左踝力和力矩解剖學上的相關動作解釋及相關意義

向量	左踝_力	左踝_力矩
$+X_{la}$	向中 Medial	足背屈 Dorsi flexion
$-X_{la}$	向外 Lateral	蹠屈 Plantar flexion
$+Y_{la}$	向前 Anterior	外展 Abduction
$-Y_{la}$	向後 Posterior	內收 Adduction
$+Z_{la}$	向上 Superior	外翻 Valgus
$-Z_{la}$	向下 Inferior	內翻 Varus

（二）逆動力學模型

本研究採用逆動力學模型計算下肢關節之力矩、功率，下列之逆動力學模型計算公式為擷取自 Kwon 3D 動作分析系統軟體之網站 http://kwon3d.com/theories/theories.asp，關於理論說明的部分，並且做些許的修改與整理，因為，本研究之力矩及功率皆利用 Kwon 3D 與 Kwon GRF 軟體結合，計算出結果。

1、關節力、力矩的計算

（1）肢段受力圖解（見圖 3-7-5）

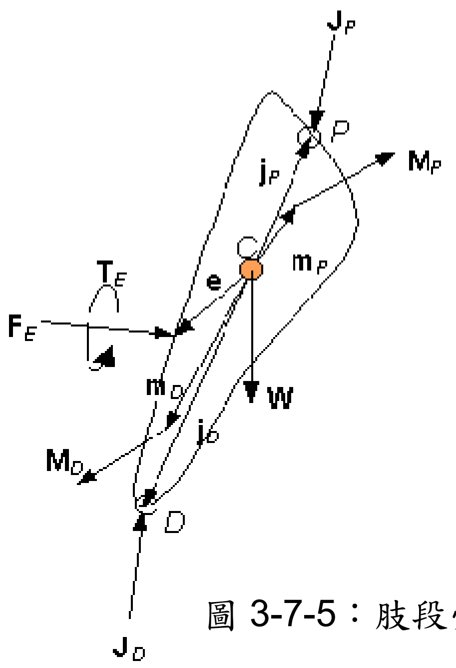

圖 3-7-5：肢段受力圖(a)

P：近端；**D**：遠端；**C**：肢段重心

W：肢段重量

M：肌肉作用力的總合（實際上，可視為離心力的總合，此力不通過關節中心）

J：關節反作用力（實際上，可視為向心力的總合，此力通過關節中心）

m 和 **j**：**M** 和 **J** 作用點對肢段重心的相對位置向量（通過肢段重心）

$\mathbf{M}_P$， $\mathbf{J}_P$， $\mathbf{m}_P$， $\mathbf{j}_P$ 和 $\mathbf{M}_D$， $\mathbf{J}_D$， $\mathbf{m}_D$， $\mathbf{j}_D$：分別代表 **M**， **J**， **m**， **j** 的近端 **P** 與遠端 **D**

$\mathbf{F}_E$：作用在肢段上的外力

$\mathbf{T}_E$：作用在肢段上的外力矩

e：$\mathbf{F}_E$ 作用點對肢段重心的相對位置向量

（2）肢段運動方程式

$$\sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{J}_P + \mathbf{M}_P + \mathbf{J}_D + \mathbf{M}_D + \mathbf{W} + \mathbf{F}_E = \dot{\mathbf{p}} \quad ......[1]$$

此式表示肢段所有作用力的總合＝肢段動量的改變率（p：肢段動量）

$$\sum_i \mathbf{T}_i = \mathbf{j}_P \times \mathbf{J}_P + \mathbf{m}_P \times \mathbf{M}_P + \mathbf{j}_D \times \mathbf{J}_D + \mathbf{m}_D \times \mathbf{M}_D + \mathbf{e} \times \mathbf{F}_E + \mathbf{T}_E = \dot{\mathbf{H}} \quad ......[2]$$

此式表示肢段所有作用力矩的總合＝肢段角動量的改變率（H：肢段角動量）

由式[1][2]得

$$\mathbf{J}_P + \mathbf{M}_P = \dot{\mathbf{p}} - \mathbf{J}_D - \mathbf{M}_D - \mathbf{W} - \mathbf{F}_E \quad ......[3]$$

$$\mathbf{j}_P \times \mathbf{J}_P + \mathbf{m}_P \times \mathbf{M}_P = \dot{\mathbf{H}} - \mathbf{j}_D \times \mathbf{J}_D - \mathbf{m}_D \times \mathbf{M}_D - \mathbf{e} \times \mathbf{F}_E - \mathbf{T}_E \quad ......[4]$$

令 $\mathbf{F} \equiv \mathbf{J} + \mathbf{M}$ ......[5]

此式表示 **F** 是關節反作用力和肌肉作用力的總合

將式[5]代入式[3][4]得

$$\mathbf{F}_P = \dot{\mathbf{p}} - \mathbf{F}_D - \mathbf{W} - \mathbf{F}_E \text{......[6]}$$

$$\mathbf{j}_P \times \mathbf{J}_P + \mathbf{j}_P \times \mathbf{M}_P - \mathbf{j}_P \times \mathbf{M}_P + \mathbf{m}_P \times \mathbf{M}_P$$
$$= \dot{\mathbf{H}} - \mathbf{j}_D \times \mathbf{J}_D - \mathbf{j}_D \times \mathbf{M}_D + \mathbf{j}_D \times \mathbf{M}_D - \mathbf{m}_D \times \mathbf{M}_D - \mathbf{e} \times \mathbf{F}_E - \mathbf{T}_E$$
$$\mathbf{j}_P \times \mathbf{F}_P + (\mathbf{m}_P - \mathbf{j}_P) \times \mathbf{M}_P = \dot{\mathbf{H}} - \mathbf{j}_D \times \mathbf{F}_D - (\mathbf{m}_D - \mathbf{j}_D) \times \mathbf{M}_D - \mathbf{e} \times \mathbf{F}_E - \mathbf{T}_E \text{......[7]}$$

令 $\mathbf{T} \equiv (\mathbf{m} - \mathbf{j}) \times \mathbf{M}$......[8]

此式 **T** 是肌肉繞著關節中心作用之力矩，即關節力矩，

(m-j)為肌肉作用點到關節點位置向量，如圖 3-7-6 所示

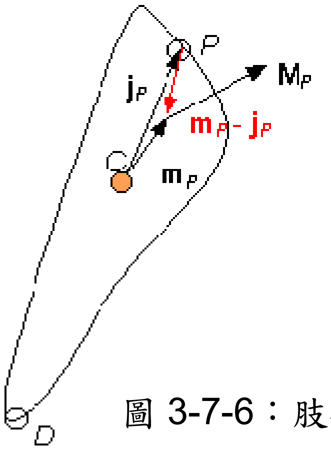

圖 3-7-6：肢段受力圖(b)

將式[8]代入式[7]得

$$\mathbf{j}_P \times \mathbf{F}_P + \mathbf{T}_P = \dot{\mathbf{H}} - \mathbf{j}_D \times \mathbf{F}_D - \mathbf{T}_D - \mathbf{e} \times \mathbf{F}_E - \mathbf{T}_E \text{......[9]}$$

從式[6][9]中，若假設 $\mathbf{F}_D$和 $\mathbf{T}_D$為已知，即可解出 $\mathbf{F}_P$和 $\mathbf{T}_P$。

M， **J** ， **m** 被 **F**，**T** 所取代，以方便計算及其實質意義的詮釋，因此，

下例兩個之肢段受力圖解（圖 3-7-7）是相同的。

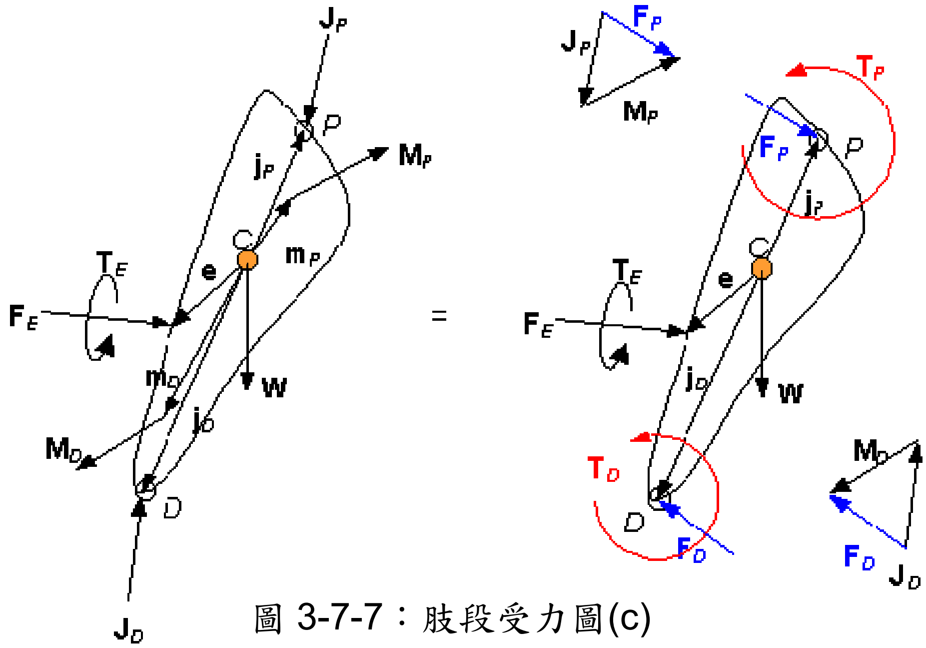

圖 3-7-7：肢段受力圖(c)

（2）解肢段運動方程式

欲解出上述之式[6][9]的 $\mathbf{F}_P$ 和 $\mathbf{T}_P$，則 $\mathbf{F}_D$ 和 $\mathbf{T}_D$ 必須為已知，有下例兩種可能的情況：

（a）沒有遠端肢段連結在所計算之肢段，此時 $\mathbf{F}_D$ 和 $\mathbf{T}_D$ 均為零。

（b）$\mathbf{F}_D$ 和 $\mathbf{T}_D$ 已由其連結之遠端肢段得知。

下肢方面，腳沒有遠端肢段連結，但腳與地面接觸，所以假設有外力作用於腳，如圖 3-7-8 所示，故式[6][9]可寫成：

$$\mathbf{F}_{AK/FT} = \dot{\mathbf{p}}_{FT} - \mathbf{W}_{FT} - \mathbf{F}_{GRF} \text{......[10]}$$

$$\mathbf{T}_{AK/FT} = \dot{\mathbf{H}}_{FT} - \mathbf{e}_{GRF} \times \mathbf{F}_{GRF} - \mathbf{T}_{GRF} - \mathbf{j}_{AK/FT} \times \mathbf{F}_{AK/FT} \text{......[11]}$$

$\mathbf{F}_{AK/FT}$ 為作用在腳之踝關節力；$\mathbf{T}_{AK/FT}$ 為腳肌肉作用產生之踝關節力矩；$\mathbf{j}_{AK/FT}$ 為踝關節對腳重心的相對位置向量；*GRF* 則代表地面的反作用力。

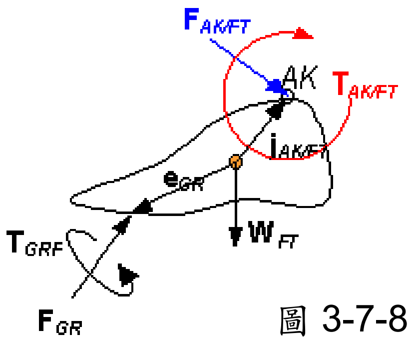

圖 3-7-8：肢段受力圖(d)

本研究假設所有肌肉均是作用在單一關節的，故在此根據牛頓第三運動定律可得到：

$\mathbf{F}_{AK/FT} = -\mathbf{F}_{AK/SH}$……[12]

$\mathbf{T}_{AK/FT} = -\mathbf{T}_{AK/SH}$……[13]

小腿部分與遠端肢段腳連結，如圖 3-7-9 所示，而且已知式[12][13]，故式[6][9]可寫成：

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{KN/SH} &= \dot{\mathbf{p}}_{SH} - \mathbf{F}_{AK/SH} - \mathbf{W}_{SH} \\ &= \dot{\mathbf{p}}_{SH} + \mathbf{F}_{AK/FT} - \mathbf{W}_{SH} \text{.....[14]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_{KN/SH} &= \dot{\mathbf{H}}_{SH} - \mathbf{j}_{AK/SH} \times \mathbf{F}_{AK/SH} - \mathbf{T}_{AK/SH} - \mathbf{j}_{KN/SH} \times \mathbf{F}_{KN/SH} \\ &= \dot{\mathbf{H}}_{SH} + \mathbf{j}_{AK/SH} \times \mathbf{F}_{AK/FT} + \mathbf{T}_{AK/FT} - \mathbf{j}_{KN/SH} \times \mathbf{F}_{KN/SH} \text{......[15]}\end{aligned}$$

$\mathbf{F}_{KN/SH}$ 為作用在小腿之膝關節力；$\mathbf{T}_{KN/SH}$ 為小腿肌肉作用產生之膝關節力矩；

$\mathbf{j}_{KN/SH}$ 為膝關節對小腿重心的相對位置向量，在此假設小腿無任何外力作用。

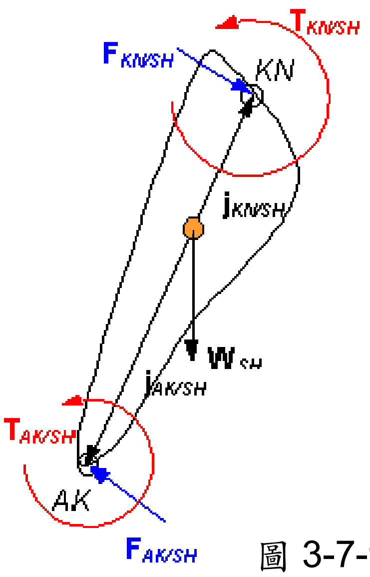

圖 3-7-9：肢段受力圖(e)

同樣地，大腿部分與遠端肢段小腿連結，式[6][9]可寫成：

$$\mathbf{F}_{HP/TH} = \dot{\mathbf{p}}_{TH} - \mathbf{F}_{KN/TH} - \mathbf{W}_{TH}$$
$$= \dot{\mathbf{p}}_{TH} + \mathbf{F}_{KN/FA} - \mathbf{W}_{TH} \text{......[16]}$$

$$\mathbf{T}_{HP/TH} = \dot{\mathbf{H}}_{TH} - \mathbf{j}_{KN/TH} \times \mathbf{F}_{KN/TH} - \mathbf{T}_{KN/TH} - \mathbf{j}_{HP/TH} \times \mathbf{F}_{HP/TH}$$
$$= \dot{\mathbf{H}}_{TH} + \mathbf{j}_{KN/TH} \times \mathbf{F}_{KN/FA} + \mathbf{T}_{KN/FA} - \mathbf{j}_{HP/TH} \times \mathbf{F}_{HP/TH} \text{......[17]}$$

$\mathbf{F}_{HP/TH}$ 為作用在大腿之髖關節力；$\mathbf{T}_{HP/TH}$ 為大腿肌肉作用產生之髖關節力矩；

$\mathbf{j}_{HP/TH}$ 為髖關節對大腿重心的相對位置向量，在此假設大腿無任何外力作用。

2、肌肉作功率（Power）的計算

腳、小腿肌肉在踝關節上之作功率，如圖 3-7-10 所示：

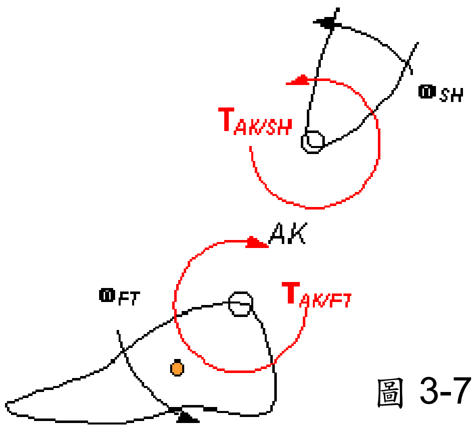

圖 3-7-10：肢段受力圖(f)

$P(M)_{AK/FT}=\mathbf{T}_{AK/FT}\bullet \boldsymbol{\omega}_{FT}$……[18]

$P(M)_{AK/SH}=\mathbf{T}_{AK/SH}\bullet \boldsymbol{\omega}_{SH}$

$=-\mathbf{T}_{AK/FT}\bullet \boldsymbol{\omega}_{SH}$……[19]

$\mathbf{T}_{AK/FT}$為腳肌肉作用產生之踝關節力矩；$\mathbf{T}_{AK/SH}$為小腿肌肉作用產生之踝關節力矩；$\boldsymbol{\omega}_{FT}$為腳之角速度；$\boldsymbol{\omega}_{SH}$為小腿之角速度。

在踝關節上之肌肉作功率為式[18][19]之總合，得到下式：

$P(M)_{AK}=P(M)_{AK/FT}+P(M)_{AK/SH}$

$=\mathbf{T}_{AK/FT}\bullet(\boldsymbol{\omega}_{FT}-\boldsymbol{\omega}_{SH})$ ……[20]

如果踝關節力矩和其角速度變化在同一個方向，$P(M)_{AK}$為正值，表示關節肌肉為收縮產生能功率；若 $P(M)_{AK}$ 負值，表示關節肌肉為收縮吸收能功率（Winter，1990），同樣方式可推至膝、髖關節。

三、統計方法

本研究使用皮爾遜積差相關（Pearson Product Correlation），顯著水準設定為 α=.05。