第參章　研究方法與步驟

第一節、受試者

受試者皆為大專男子選手；優秀選手有 4 位(標槍專項甲組選手)，一般選手則有 5 位(標槍專項乙組選手)。每位選手之身高、體重、個人最佳紀錄等基本資料列於下表 3-1。其中值得注意的是「受試者一」為台灣師大的「周宜辰」，其最佳成績為 2005 年 5 月 3 日嘉義中正大學全國大專運動會中破全國紀錄成績 76.18 m，該成績至今（2006 / 7 / 31）仍為全國記錄。

表 3-1 受試者之基本資料

	受試者	年齡 (yrs)	身高 (cm)	體重 (kg)	最佳紀錄 (m)	參加過比賽	學校
優秀選手	受試者一	20	189	95	76.18	全國運動會、東亞運、亞洲盃、世大運	台灣師大
	受試者二	22	182	85	67	全運會	國立體院
	受試者三	20	181	85	63	全運會	國立體院
	受試者四	19	185	94	66	全運會	國立體院
	平均數	20.25	184.25	89.75	68.04		
	標準差	1.25	3.59	5.5	5.68		
一般選手	受試者五	23	167	67	54.18	全中運	國北師
	受試者六	23	177	68	55	無	國北師
	受試者七	25	188	89	47	無	國北師
	受試者八	19	181	90	67	全中運、大運會	台灣師大
	受試者九	29	174	85	55.56	大運會	台大
	平均數	23.8	177.4	79.8	55.74		
	標準差	3.63	7.82	11.38	7.17		

第二節、實驗日期與地點

一、實驗時間：本實驗共分 5 次進行，分別為民國 95 年 1 月 18 日、3 月 5 日、3 月 18 日、3 月 31 日及 4 月 18 日。

二、地點：國立台灣師範大學分部校區田徑場 標槍跑道

第三節、實驗儀器與設備

本研究所使用的儀器如下：

1. 四台同步之高速攝影機（Redlake，型號 0495、0985、0493、0492）。
2. 與攝影機同步之 Kistler 測力板一塊（型號 9281B，Kistler™ Winterthur, Switzerland），大小 60 x 40 cm，壓力中心（center of pressure）位於表面下方 5.4 cm，擷取系統為 Kwon GRF（Young-Hoo Kwon & Visol, Inc., version 3.016）軟體。
3. 符合 IAAF 規格之男子標槍一支（重量為 824.75 g，長度為 2.615 m）。
4. 三腳架五支。
5. 水平儀。
6. 25 點三度空間參考架一座（計算後整體誤差小於 0.5 cm，註）。
7. 皮尺、號碼牌。
8. #14 之白鐵絲、小顆保力龍球、反光貼片。

註：

	X 方向	Y 方向	Z 方向	整體
誤差(cm)	0.17	0.31	0.23	0.48

第四節、場地佈置

本實驗共架設四台同步 Redlake 高速攝影機，兩台拍槍體（擷取頻率：250 Hz，快門：2500 Hz），架設於跑道右側方。另外兩台架設在跑道左側方用以拍攝選手動作（擷取頻率：125 Hz，快門：1250 Hz）。測力板則透過同步處理器與攝影機同步，其擷取頻率設為 1250 Hz，擷取時間 5 秒（圖 3-1）。

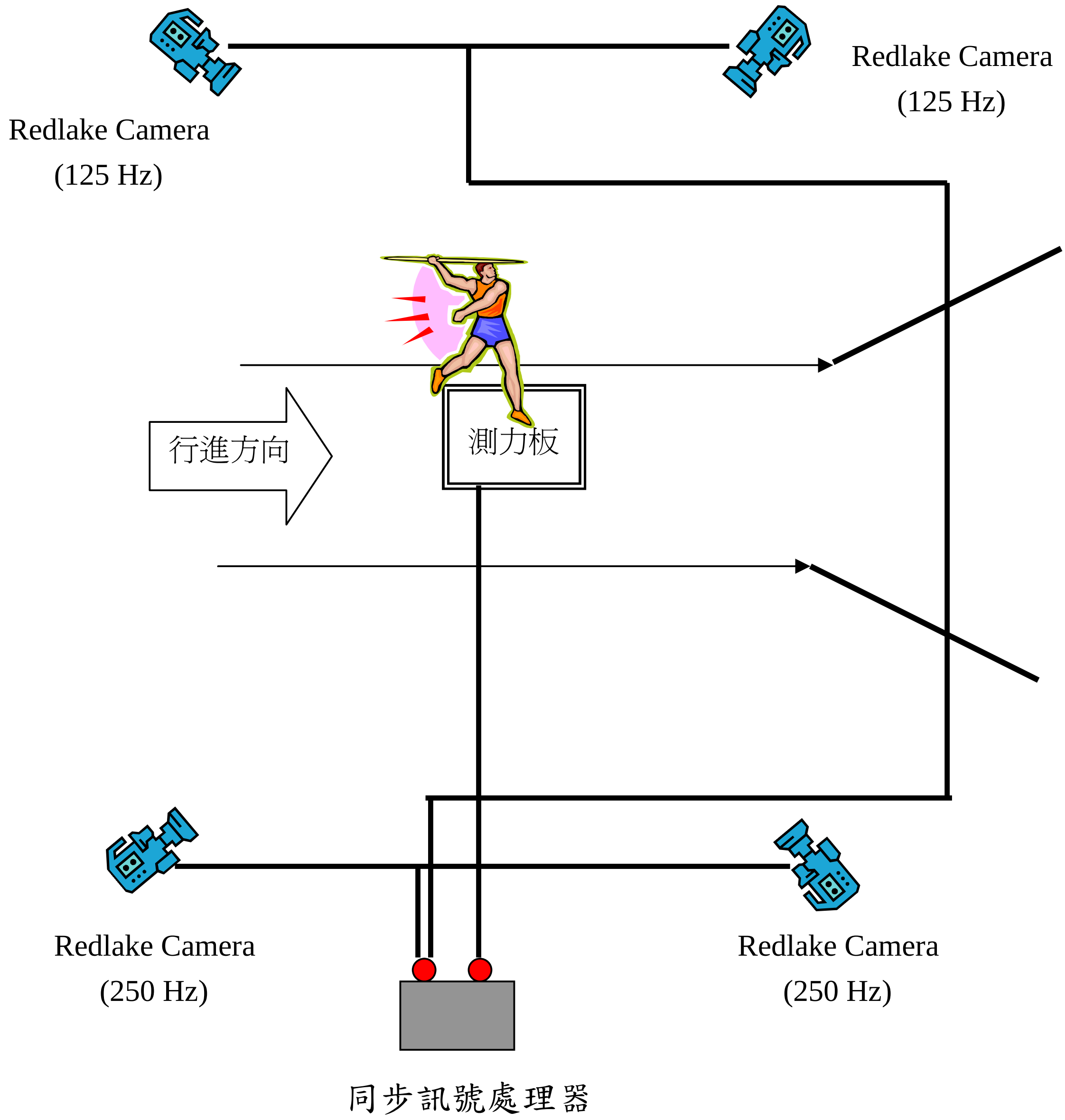


圖 3-1 實驗儀器及場地佈置圖

第五節、實驗流程

於實驗前三十分鐘先集合所有選手，向選手們講解本實驗的研究目的及受試者們所要做的動作，之後填寫個人資料表，填完之後便開始進行本次的實驗。

每位選手於正式拍攝前先暖身三分鐘，並試擲數次，接著正式開始。正式開始時要求受試者在出槍前最後一步盡量踩到測力板，過程中不管成功與否（即有無壓槍）皆予以記錄，每次擲完均給予適當的休息。每個人投擲 6~7 次以上，正式投擲時的規則一律採 IAAF 頒佈的標槍規則，即助跑在 30 m 以內，不准採犯規線（foul line）等，且實驗中所有選手一律使用筆者提供之 IAAF 新規格標槍。

第六節、資料擷取與分析

一、人體肢段之運動學分析

為了方便資料的點取與確認，我們分別在頭（三點，頭頂、左耳、右耳）、肩（兩點：左肩、右肩）、肘（兩點：左手肘、右手肘）、腕（兩點：左手腕、右手腕）、手指（兩點：左手指、右手指）、髖（兩點：左髖、右髖）、膝（兩點：左膝、右膝）、踝（兩點：左踝、右踝）、腳跟（兩點：左腳跟、右腳跟）、腳尖（兩點：左腳尖、右腳尖）等 21 個部位貼上標點。分析法是採用肢段分析法（segmental method），將人體由頭、肩、肘、腕、手、大腿、軀幹等關節分為十四個剛體肢段（頭假設成獨立個體，不和軀幹相連），並假設人體在動作過程中為剛體結構。

人體支段參數的部分是套用 Kwon 3D (Young-Hoo Kwon & Visol, Inc.) 軟體中內建的資料。本研究使用 Butterworth 4th- order Zero Lag Digital 方法，同時以擷取頻率（cutoff frequency）6 Hz，對原始資料進行修匀。但槍體的部分例外，由於槍體運動速度較快，在分析槍體運動時，擷取頻率是採 10 Hz 來修匀。

二、測力板資料擷取

由於測力板 Kwon GRF 軟體來擷取推蹬期及制動期之時間、各方向力量及衝量。擷取頻率設為 1250 Hz，擷取時間設為 5 秒。

三、槍體受力之計算方法

標槍部分則使用一支符合 IAAF 規格的男子標槍，其重量為 824.75 g，長度為 2.615 m。此外為了要計算標槍三維旋轉之角運動學參數，本研究共在槍體上固定三顆不共線之反光點。槍頭部分固定一個標點（A 點），另外在距離握把末端 46.5 cm 之尾端部分固定以兩條#14 之白鐵絲纏繞成翅膀狀的固定架，固定架連線垂直標槍縱軸且向兩端各突出約 5 cm，在固定架的兩末端各固定一顆直徑 1.8 ㎝的白色小保麗龍球（B 點及 C 點，見圖 3-2）；鐵絲的重量約為 7.4 g，兩顆保麗龍球共重為 0.175 g。固定架位置的考量主要依照下列三項原則順序及經過受試者實際測試後決定。

1. 不傷害到受試者。
2. 不妨礙到受試者投擲。
3. 盡量接近握把處，以期減少因槍體彎曲而造成計算上的誤差。

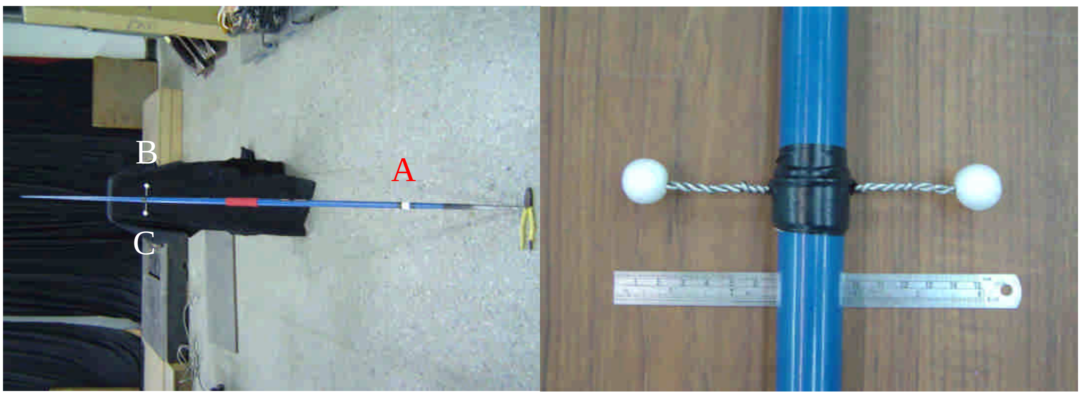


圖 3-2 標槍上三顆反光點位置圖（左）及固定架近照圖（右）

取得 A、B 及 C 三個反光點的原始位置向量資料（Butterworth 4th- order Zero Lag Digital 程式，cutoff frequency：10 Hz）後，以卡當角法（Cardan angle method）來計算繞槍體之三維旋轉參數。本研究中槍體上 Local 座標軸的定義為：設 P 點為 B 及 C 之中點，以向量$\overline{PA}$為 Z 軸，X 軸為向量$\overline{PC} \times \overline{PA}$（× 為外積），最後再以 Z 軸×X 軸求得 Y 軸。

卡當角法：槍體上的座標軸定義如上所述，旋轉矩陣的求得是採取相鄰兩張之相對矩陣。而卡當角法的計算由於牽涉到旋轉順序，在此是以先繞 Y 軸轉α角度，再繞 Z 軸（標槍縱軸）轉β角度，最後繞 X 軸轉γ角度，結果所得到的旋轉矩陣如矩陣一所示。

$$\begin{bmatrix} Cos(\alpha)Cos(\beta) & Cos(\alpha)Sin(\beta)Cos(\gamma)+Sin(\alpha)Sin(\gamma) & Cos(\alpha)Sin(\beta)Sin(\gamma)-Sin(\alpha)Cos(\gamma) \\ -Sin(\beta) & Cos(\beta)Cos(\gamma) & Cos(\beta)Sin(\gamma) \\ Sin(\alpha)Cos(\beta) & Sin(\alpha)Sin(\beta)Cos(\gamma)-Cos(\alpha)Sin(\gamma) & Sin(\alpha)Sin(\beta)Sin(\gamma)+Cos(\alpha)Cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

－－ 矩陣一

在做標槍逆過程計算時會需要一些標槍的物理量，其中由於轉動慣量的測量較不容易加上本標槍長度和 Maeda, Shamoto, and Moriwaki（1999）研究中的標槍長度一樣，故轉動慣量部分是採用該日本學者的研究資料：繞 Z 軸之轉動慣量： $0.411 \ kg \cdot m^2$，繞 X 或 Y 軸之轉動慣量：0.128×10^{-3} $\mathrm{kg \cdot m^2}$。而縱向及側向截面積、重心（center of gravity）和壓力中心（center of pressure）這部分，為了提升精確度，筆者親自測量。首先把整個標槍縱軸當 x 軸，寬度當 y 軸，在 x 軸上依照形狀特殊性切成許多小段，即曲線

變化越厲害的地方切的越細。以尾端當作原點，整支標槍分成 8 個區，66 點，測量每一點的寬度，再分別擬合出各區段的曲線（y 對 x 的函數）。接著以求力矩平衡公示：$\sum\int 2ydx \times COPx = \sum\int 2yxdx$ 可求出中心位置 COPx。其中縱向橫斷面積：9.0212 cm^2 （以握把處的截面積來計算）；側向橫斷面積：598.496　cm^2 ；重心位置（center of gravity）：距離槍頭 106.6 cm；壓力中心：距離槍頭 125.186 cm（在重心後方 18.58 cm 處）。

在流體阻力的計算上，只計算阻力（drag force）造成的影響，而忽略升力（lift force）及摩擦力（friction force）。公式及參數如下：

流體阻力公式

$F = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$－－方程式一

C_d 為阻力係數（coefficient of drag），可分為兩部分：一為槍頭的阻力係數（C_d of pile）為 0.4，二為槍身的阻力係數為（C_d of shaft）1.2。A 為截面積（速度方向的投影面積）。ρ是空氣密度，在攝氏 32 度一大氣壓海平面高度下約為 1.162 kg/m^3（Ghista, 1982., Fox, McDonald, & Pritchard, 2004）。v 是標槍相對於風的速度。

三維動力學逆過程的計算主要是利用槍體所受力平衡原理（包含流體阻力、槍體慣量乘以加速度及手部施力）先求出槍體受力。

$$\sum F（各項外力合）= m_{javelin} \times a_{javelin}$$

以力矩平衡原理（手部施力對質心產生的力矩、槍體慣量乘以角加速度、流體阻力對質心所產生之力矩、手部之施力矩），其中力矩平衡計算會使用到力矩平衡方程（方程式二）來計算槍體受手部施力情形。

$$\begin{bmatrix} \dot{H}x \\ \dot{H}y \\ \dot{H}z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ixx\,\dot{\omega}x + (Izz - Iyy)\omega y \omega z \\ Iyy\,\dot{\omega}y + (Ixx - Izz)\omega z \omega x \\ Izz\,\dot{\omega}z + (Iyy - Ixx)\omega x \omega y \end{bmatrix} \text{----------------方程式二}$$

Hx、Hy、Hz　為繞著 x、y、z 軸旋轉之角動量

Ixx、Iyy、Izz 為繞著 x、y、z 軸旋轉之轉動慣量

ωx、ωy、ωz 為繞著 x、y、z 軸旋轉之角速度

其中手部施力點的位置是假設在握把末端處（距槍頭 117.4 cm，在重心後方 10.8 cm）。程式的運算是以 Matlab 6.5 （The MathWorks, Inc.）版軟體來執行，對於需要微分的參數如速度及加速度等是採 Woltring (1986)之全面性交叉確認曲線法（Generalized Cross-Validatory Spline, GCVSPL）來計算。力及力矩的變化曲線圖是以 Origin 6.0 版軟體來繪圖。

四、支撐期下肢動力學逆過程計算

（一）人體肢段參數部分

由於 Kwon 3D 軟體有內建人體肢段參數（如下表 3-2 所示），故在計算動力學逆過程時即以該參數來計算。

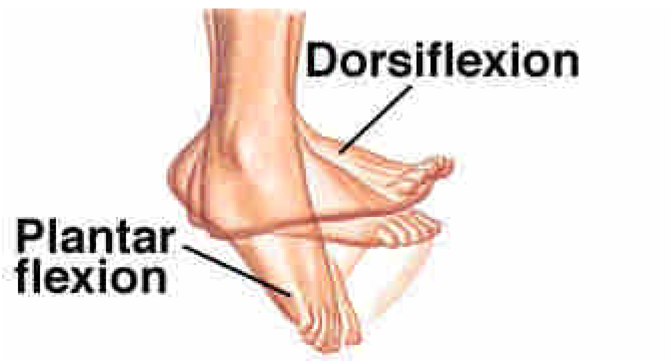
表 3-3 Kwon 3D 內建人體肢段參數

	質量百分比 (%)	質心位置 (%)	額狀軸轉動慣量 Ixx	矢狀軸轉動慣量 Iyy	縱軸轉動慣量 Izz
頭	8.26	50.00	25.82	26.47	28.36
軀幹	46.84	47.66	25.55	31.82	15.17
上臂	3.25	43.60	29.98	30.69	12.08
前臂	1.87	43.00	28.80	29.23	10.35
手掌	0.65	46.80	46.28	50.84	25.59
大腿	10.50	43.30	32.04	31.51	13.58
小腿	4.75	43.40	29.18	29.18	7.67
腳掌	1.43	50.00	25.69	26.94	12.45

（二）人體各關節局部座標（Local frame 或 Local reference）設定

為了方便逆過程計算及結果解釋，我們必須在各肢段上設立局部座標，這部分座標的設定主要是參考 Kwon 3D manual（使用手冊），其手冊中基本上皆把右側方向設成 x 軸，如此和 global X 接近，解釋上較為方便。在定義左髖關節座標時，是先定義大腿長軸為 z 軸，皆下來假定小腿相對於大腿不會外展（abduction）、內收（adduction）及內旋（internal rotation）、外旋（external rotation），僅有屈伸動作，定義左踝到左髖向量為暫訂 y 軸，接著 y X z 求出 x 軸（朝身體右側方），接著再 x X z 求出最後 y 軸。在定

義膝關節座標時，是先定義小腿長軸為 z 軸，接著假定足相對於小腿不會有外展、內收、外翻（everter）、內翻（inverter），僅有屈足背（dorsi flexion）、屈蹠（plantar flexion，見圖 3-3 左）動作，在此假定下定義左足跟到左膝為暫訂 y 軸，接著以 y X z 求出 x 軸（朝身體右側方），接著再 x X z 求出最後 y 軸。最後是定義踝關節，比較特別的是由於 Kwon 3D manual 是把腳的長軸設成 z 軸，但此與 global Z 軸相差甚遠，故為了方便觀察及解釋研究者在此把足之長軸設為 y 軸，這樣在觀察可能較為方便（會與 global Y 軸接近），接著把腳尖到腳踝方向暫訂成 z 軸，以 y X z 先求出 x 軸，最後在用 x X y 求出最後 z 軸。最後制動腳各關節局部座標顯示如下圖 3-3 右。



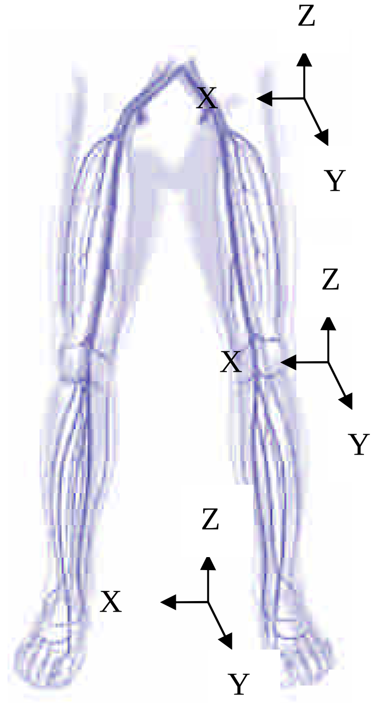


圖 3-3 踝關節屈伸動作示意圖（左）及各關節局部座標圖（右）

（三）動力學逆過程之計算

動力學逆過程是利用外力（如測力板的地面反作用力）去推估內在各關節受力，其使用之物裡公式主要為力平衡、力矩平衡原理。Winter (2004) 曾在其著作中有詳盡的介紹，且根據研究者 Kwon 3D 上網站觀察後發現其計算模式與 Winter (2004) 相似，故茲以 Winter（2004）法介紹。下圖 3-4 所示為某一肢段受力及力矩情形，計算方式參考如下。

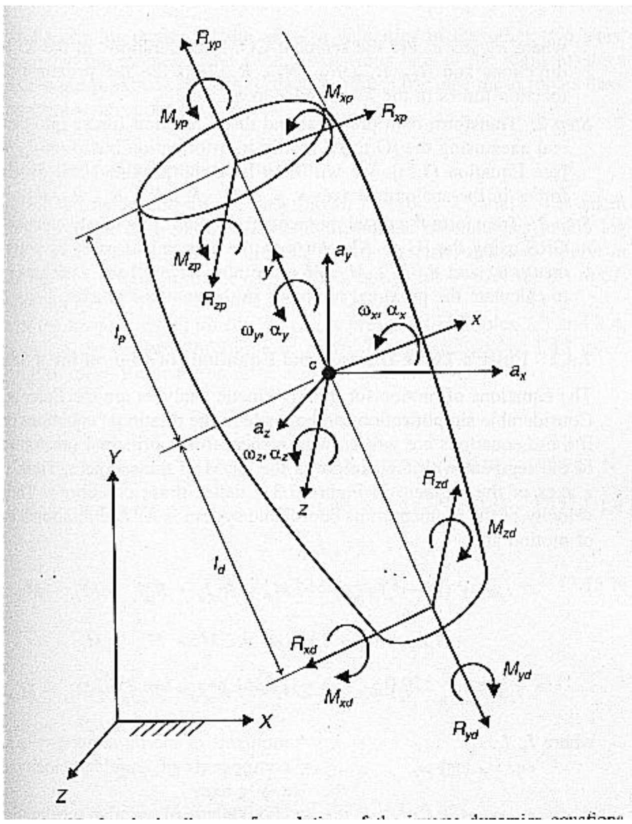


圖 3-4 肢段受力及力矩分佈圖

在圖 3-4 中，先由遠端關節的受力、肢段的加速度乘以肢段慣性及肢段重量可導出 X、Y、Z 各方向之力平衡公式，分別為公式三、四及五。而受近端關節力求出後再用力矩平衡原理把遠端關節處之力矩、遠端關節出受力對質心所產生的力矩、肢段本身的角加速度乘以肢段轉動慣量及近端關節處受力對肢段質心所產生的力可導出 X、Y、Z 各方向力矩平衡方程式，分別為公式六、七及八。

$R_{XP} – R_{XD} = ma_x$ -----------------公式三

$R_{YP} – R_{YD} – mg = ma_x$ -----------------公式四

$R_{ZP} – R_{ZD} = ma_z$ -----------------公式五

$I_x\alpha_x + (I_z – I_y)\omega_y\omega_z = R_{zd}\, l_d + R_{zp}\, l_p + M_{xp} - M_{xd}$ -----公式六

$I_y\alpha_y + (I_x – I_z)\omega_x\omega_z = M_{yp} – M_{yd}$ ------------------------公式七

$I_z\alpha_z + (I_y – I_x)\omega_x\omega_y = -R_{xd}\, l_d – R_{xp}\, l_p + M_{zp} – M_{zd}$ -----公式八

其中：I_x、I_y、I_z -------------- 肢段之三維轉動慣量

ω_x、ω_y、ω_z --------------- 繞肢段之三維角速度

α_x、α_y、α_z ---------------- 繞肢段之三維角加速度

M_{xd}、M_{yd}、M_{zd} ----------- 肢段遠端之三維力矩

R_{xp}、R_{yp}、R_{zp} ------------ 肢段近端處之三維受力

R_{xd}、R_{yd}、R_{zd} -------------肢段遠端處之三維受力

l_p、l_d -------------近端及遠端距離質心的長度

利用公式三、四、五可求出近端關節之受淨力，求出近端關節之受力後，接著利用公式六、公式七及公式八可計算出近端關節所受之淨力矩。

（四）力量、力矩及功率之符號意義

由於 Hunt and Smith (2001) 表示肢段座標系（segmental coordinate system）比局部座標系更能提供有意義的解釋加上 Kwon 3D 內建的逆過程計算是以局部座標系統來呈現，故在力量（Force）、力矩（Moment）及功率（Power）的呈現上皆以各關節之局部座標系統來呈現。在力量方面， Fx、Fy 及 Fz 的方向，要看個人的局部座標，但每個人著地時腳的方位又不一樣，故這部分統一以合力 Fr 來觀察。力矩方面由於設定 Kwon 3D 時的假設條件，故力矩部分只看繞 x 軸旋轉的部分，而力矩的解釋如下表 3-4 及圖 3-5。功率的部分解釋如表 3-5。由於關節功率為該關節力矩 x 相對角速度，故可反映出該關節的活動強烈程度，其數值為正表做正功（輸出能量）即力矩作用方向與角速度同向，負號表做負功即儲存能量。

表 3-4 下肢各關節受力矩符號說明（資料來自 Kwon 3D 網站）

關節	力矩	符號意義---主要作用肌群	
Hip　髖關節	Mhx	+：flexor M	-：extensor M
Knee 膝關節	Mkx	+：extensor M	-：flexor M
Ankle 踝關節	Max	+：dorsiflexor M	-：plantar flexor M

註：各符號意義為遠端肢段相對於近端肢段之動作

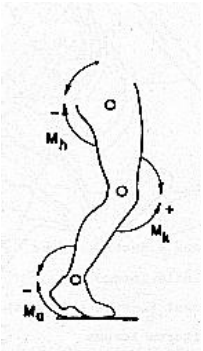


圖 3-5 下肢各關節力矩示意圖

五、統計分析

而統計部份，每位受試者各取其最佳成績來作比較；在測力板及下肢逆過程計算部分則取其踩到測力板之最佳成績來計算。由於本研究中優秀選手與一般選手的人數並不多，故在兩組間的比較是以無母數法--佛里曼考驗（Friedman test）計算之；而各出槍時運動學參數和投擲成績之間的相關係數則採用皮爾遜積差相關（Pearson product-moment correlation）來計算，而這部分皆以 SPSS 14.0 版軟體來計算，顯著水準皆定為 $\alpha = .05$。