第三部分：動作分析

【學習目標】

本部分涵蓋身體活動的基本原理，旨在引導學生明白身體活動的科學基礎，並將所學知識提升在體育、運動及康樂方面的表現或參與相關活動的興趣。學習本部分對加強理解運動創傷的成因亦有裨益。

【預期學習成果：學生將能夠】

1. 舉例說明牛頓運動定律的內容和意義；
2. 運用槓桿原理改善動作表現；
3. 在分析動作表現時，指出肌骨系統中不同類別的動作，認識身體動作的三種活動平面；及
4. 運用簡單的測量方法，探究生物力學的一些基本原理。

甲、 基本力學概念

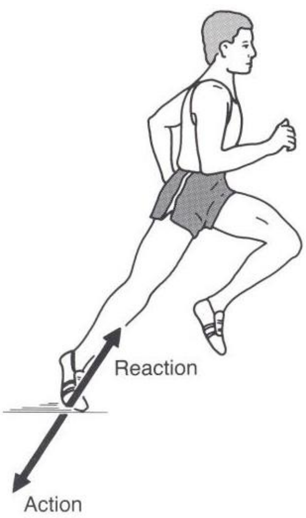
壹、 認識力學

一、運動機動學（Kinesiology）

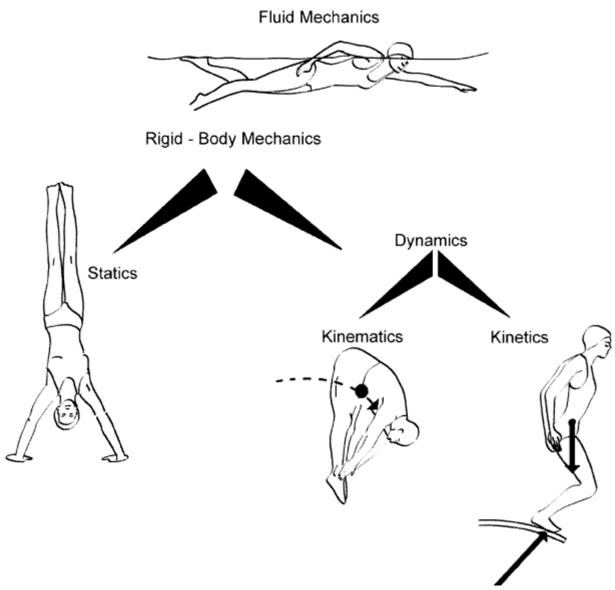
- 研究**人體運動/活動**的一個廣闊學術範圍。

二、 生物力學（Biomechanics）

- 屬**運動機動學**的一個**分科**（subdiscipline）。
- 以**力學**（mechanics）的科學原理去研究**人體運動**。
- 研究各種作用於人體的**力**（force，包括**內部**與**外部**）及其產生的**效果**。
- **目的**：**提升運動表現**及**預防運動創傷**。



三、 力學的相關內容



- 除了**流體力學**（fluid mechanics）外，力學還包括了屬於**剛體力學**（rigid-body mechanics）的**靜態力學**（statics）和**動態力學**（dynamics）；動態力學又可再分為**運動學**（kinematics）和**動理學**（kinetics）。本課程只會涉及**剛體力學**。

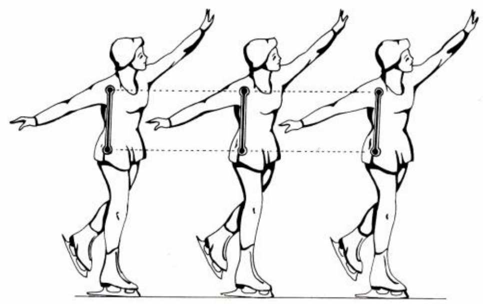
1. **運動學**（Kinematics）
   - 只著重**「描述」運動**。
     - 如運動員跑步時的**速度**、**步長**、伸展髖關節時的**角速度**等。
2. **動理學**（Kinetics）
   - 亦作**動力學**，關注**構成運動**的**「原因」**。
     - 如跑步時運動員足部與地面之間、身體與空氣阻力之間，各種**力**的**作用**和**影響**。

四、何謂運動？

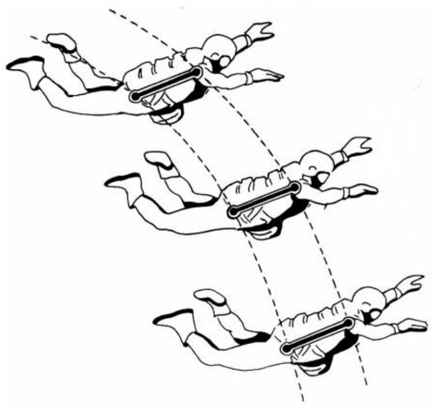
- **運動**（motion）指物體在**空間**的**相對位置**出現變化，可以利用**位移**、**時間**、**速度**、**加速度**等來描述。

五、運動的種類

1. **平移**（Translation）
   - 亦作**線性運動**或**直線運動**（linear motion）。
   - 又可分為**直線平移**（rectilinear translation，見圖一）及**曲線平移**（curvilinear translation，見圖二）。

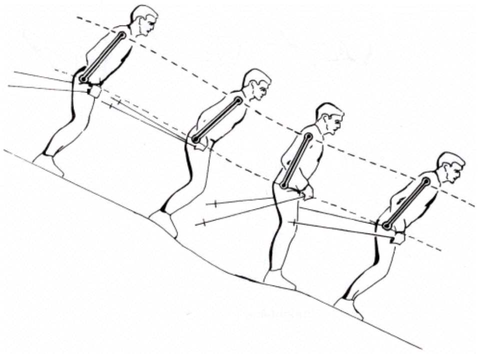


圖一、直線平移



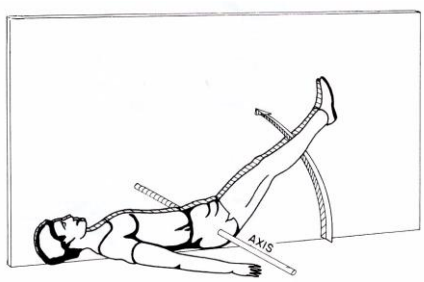
圖二、曲線平移

備註：以下例子（見圖三）屬**非線性運動**（nonlinear motion），**並不**算作**平移**。

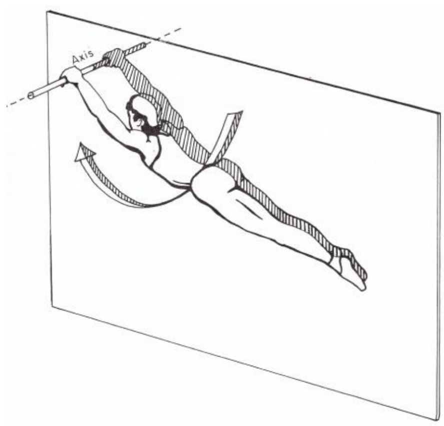


圖三、非線性運動

2. **旋轉**（Rotation）
   - 亦作**轉動**或**角動**（angular motion，見圖四及圖五）。

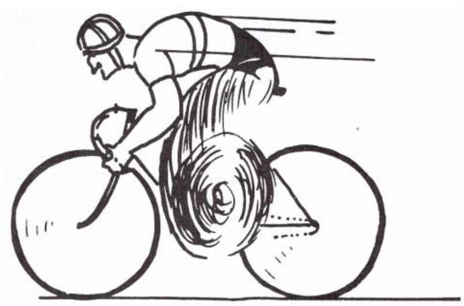


圖四、沿內部軸心旋轉



圖五、沿外部軸心旋轉

3. **綜合運動**（General Motion）
   - 綜合了**平移**和**旋轉**而成的運動，是**更為普遍**的運動模式（見圖六及圖七）。



圖六、單車運動就是由腿部的旋轉動作和整體的平移構成。

圖七、單是腿部的旋轉動作其實也是由多個肢體的旋轉動作複雜地綜合而成

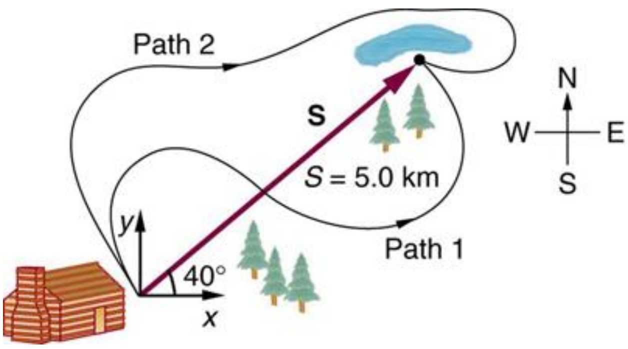
六、標量和矢量

1. **標量**（Scalar）
   - 亦稱作**無向量**。
   - 只有**大小**（或**量值**，magnitude）而**不涉及方向**（direction）的物理量。
     - 如**時間**（time）、**質量**（mass）、**長度**（length）、**面積**（area）、**體積**（volume）等。
2. **矢量**（Vector）
   - 亦稱作**向量**。
   - **同時**具有**大小**（或**量值**）**和方向**的物理量。
     - 如**力**（force）、**位移**（displacement）、**速度**（velocity）等。

貳、線性運動學（Linear Kinematics）

一、距離和位移

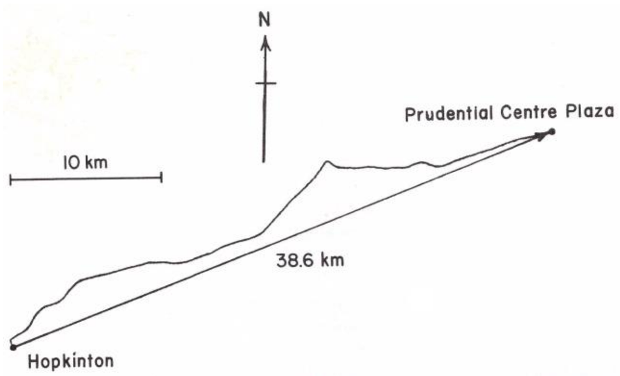
1. **距離**（Distance）
   - 指物體**移動路線**的**總長度**（如下圖的 **Path 1**、**Path 2**）。
   - 屬**標量**，**不具方向性**。



2. **位移**（Displacement）
   - 指物體在**位置**上**改變**的**淨距離**（如上圖中的 **s**）。
   - 屬**矢量**，**具有方向性**。

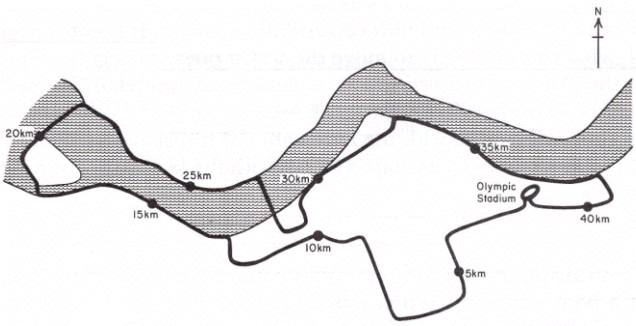
距離和位移的例子

i) **波士頓馬拉松路線**



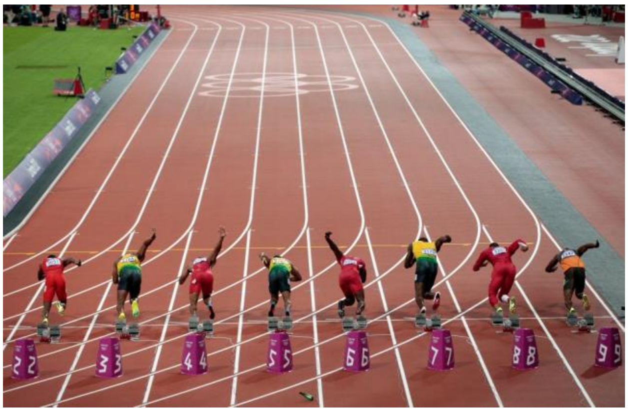
- 參賽者完成的**距離**為標準的 **42.195 千米**，但由於沿途要上、下坡的緣故，**位移**約為**東北東**方向 **38.6 千米**。

ii)　**1988 年首爾奧運馬拉松路線**



- 由於**起點**和**終點**位於奧運場館內的**同一位置和方向**，所以參賽者完成的**距離**雖為 **42.195 千米**，但**位移**卻是 **0 千米**。

iii)　**100 米跑**



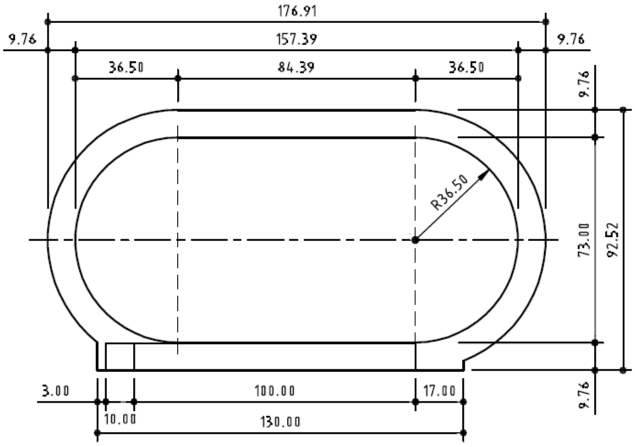
- **距離** = **100 米**
  位移 = **100 米**（方向與起點相同）

iv)　**10000 米跑**

- **距離** = **100 米**
  位移 = **0 米**

v)　**其他距離跑**

- **距離** = **賽程**
  位移 = **非常複雜**
  （**直道**部分**並非** 100 米長）



圖八、標準 400 米田徑場尺寸大少

二、 速率和速度

1.　**速率**（Speed）

- 物體移動的**距離除以**物體走完這段距離所需的**時間**。

$$速率 = \frac{距離}{時間}$$

- 是**標量**，**不反映方向**。
- 一般所指的**速率**是**平均速率**（average speed）。

2.　**速度**（Velocity）

- 物體**位移隨時間**的**變化率**。

$$速度 = \frac{位移}{時間}$$

- 是**矢量**，具有**量值**和**方向**。
- 一般所指的**速度**是**平均速度**（average velocity）。

備註：

- **速率**和**速度**的單位均是**米/秒**或**米・秒$^{-1}$**。
- 正如**距離**和**位移**的性質一樣，
  - **速率**是**標量**，**沒有方向性**；
  - **速度**是**矢量**，**同時**具有**量值**和**方向性**。
  - 所以**速率不等同於速度**。
- 只有運動在**直線**和**同一方向**下進行時，**速率**和**速度**的**「量值」**才會**相等**。
  - 如 100 米跑、50 米游泳（50 米標準泳池）

速率和速度的計算例子

i) 完成 **100 米跑**的時間為 **10 秒正**。

速率

$$= \frac{距離}{時間}$$

$$= \frac{100\text{ 米}}{10\text{ 秒}}$$

= **10 米/秒**

速度的**量值**

$$= \frac{位移}{時間}$$

$$= \frac{100\text{ 米}}{10\text{ 秒}}$$

= **10 米/秒**

ii) 完成 **400 米跑**（假設為第 1 線道）的時間為 **50 秒正**。

速率

$$= \frac{距離}{時間}$$

$$= \frac{400\text{ 米}}{50\text{ 秒}}$$

= **8 米/秒**

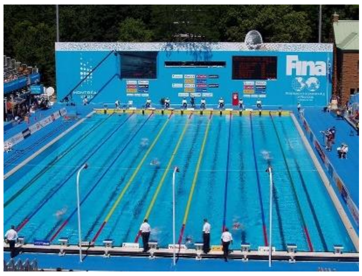
速度的**量值**

$$= \frac{位移}{時間}$$

$$= \frac{0\text{ 米}}{50\text{ 秒}}$$

= **0 米/秒**

iii) 完成 **100 米自由泳**的時間為 **55 秒正**。



速率

$$= \frac{距離}{時間}$$

$$= \frac{100\text{ 米}}{55\text{ 秒}}$$

= **1.82 米/秒**

速度的**量值**

$$= \frac{位移}{時間}$$

$$= \frac{0\text{ 米}}{55\text{ 秒}}$$

= **0 米/秒**

3. **瞬時速率**（Instantaneous Speed）

● 物體在**一瞬間**的**速率**。

$$\text{瞬時速率} = \frac{\text{能完成的極短距離}}{\text{極短瞬的時間下}}$$

● 以下是 Usain Bolt 於 2009 世界田徑錦標賽 100 米決賽的分段計時：

距離（米）	時間（秒）
30	3.78
60	6.29
70	7.10
80	7.92
90	8.74
100	9.58

● Bolt **100 米跑**的**平均速率**

$= \frac{\text{距離}}{\text{時間}}$

$= \frac{100\text{ 米}}{9.58\text{ 秒}}$

= **10.44 米/秒**

● Bolt **60 至 70 米間**的**瞬時速率**

$= \frac{\text{能完成的極短距離}}{\text{極短瞬的時間下}}$

$= \frac{(70-60)\text{米}}{(7.10-6.29)\text{秒}}$

= **12.35 米/秒**

備註：這例子只是用以帶出**瞬時速率**的「**概念**」，改寫為 60 至 70 米間的**平均速率**會更為正確。

4. **瞬時速度**（Instantaneous Velocity）

● 物體在**一瞬間**的**速度**。

$$\text{瞬時速度} = \frac{\text{能完成的極小位移}}{\text{極短瞬的時間下}}$$

● 當物體在**直線**上運動時，
瞬時速率 = **瞬時速度**的「**量值**」。

● 瞬時速度在**跳類項目**及**投擲項目**尤為重要。
- ➢ 跳的距離和高度取決於**起跳一瞬間**的速度。
- ➢ 投擲的距離亦取決於器械**出手一瞬間**的速度。

三、**加速度**（Acceleration）

● 物體**速度**隨**時間**的變化率。

● 是**矢量**，具有**量值**和**方向性**。

$$\text{加速度} = \frac{\text{速度的變化}}{\text{時間}}$$

$$= \frac{\text{最終速度} - \text{初始速度}}{\text{時間}}$$

● 以上所指的**加速度**也是**平均加速度**（average acceleration）。

● 加速度的單位是**米/秒^2** 或 **米・秒$^{-2}$**。

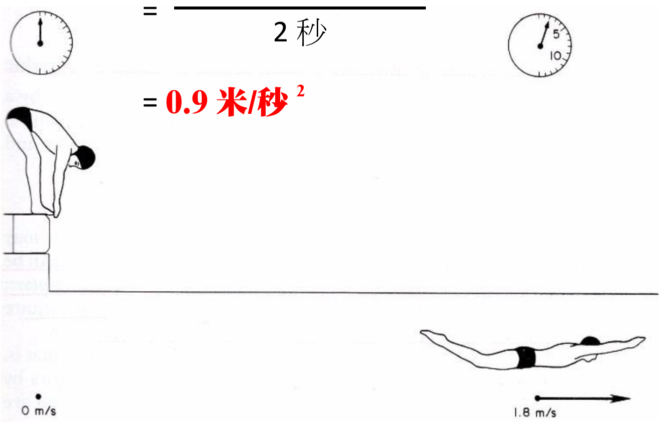
加速度的計算例子：

計算一名游泳運動員用 2 秒時間從 0 米/秒加速至 1.8 米/秒的加速度。

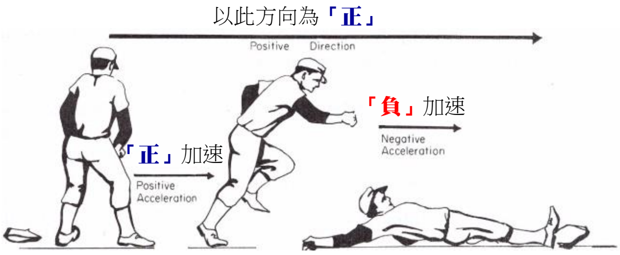
$$\text{加速度} = \frac{\text{最終速度} - \text{初始速度}}{\text{時間}}$$

$$= \frac{1.8\text{ 米/秒} - 0\text{ 米/秒}}{2\text{ 秒}}$$

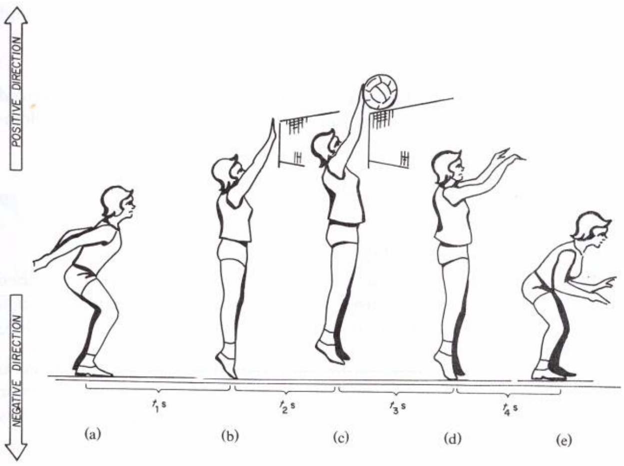
= **0.9 米/秒^2**



- 加速度可以是
  - 「正」（acceleration 或 positive acceleration）
  - 「負」（negative acceleration、deceleration 或 retardation）
  - 「零」（zero acceleration）



- 若設定向上的方向為「正」，則



  - a 至 b 為「正」加速
  - b 至 c 為「負」加速
  - 於 c 點為「零」加速
  - c 至 d 為「負」加速（方向性為「負」）
  - d 至 e 為「正」加速（方向性為「負」）

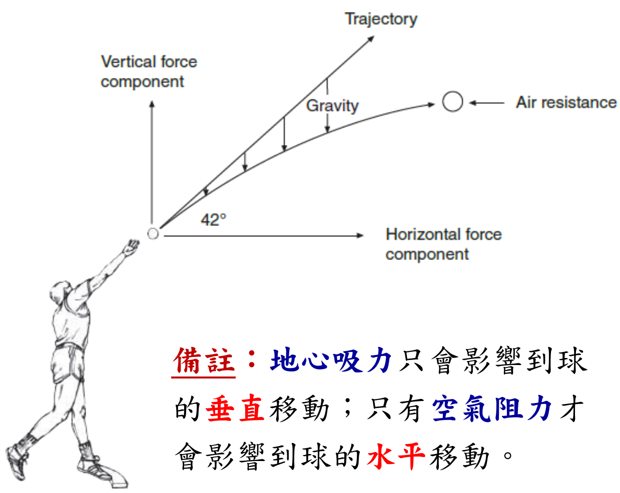
四、勻加速度運動（Uniformly Accelerated Motion）

- 指物體按均勻的比率加速（或減速）。
  - 如每秒速度增加 2 米/秒，即相當於按 2 米/秒 ^{2} 加速。
    - 第 1 秒完結時，速度為 2 米/秒，
    - 第 2 秒完結時，速度為 4 米/秒，
    - 第 3 秒完結時，速度為 6 米/秒，
    - 第 4 秒完結時，速度為 8 米/秒，如此類推。
- 在運動進行期間，任何一刻的瞬時加速度與平均加速度相等。
- 在勻加速度運動下的三條重要公式：

1. $v = u + at$
2. $s = ut + \frac{1}{2}at^2$
3. $v^2 - u^2 = 2as$

備註：v = 最終速度，u = 初始速度，a = 加速度，t =所需時間，s = 位移。

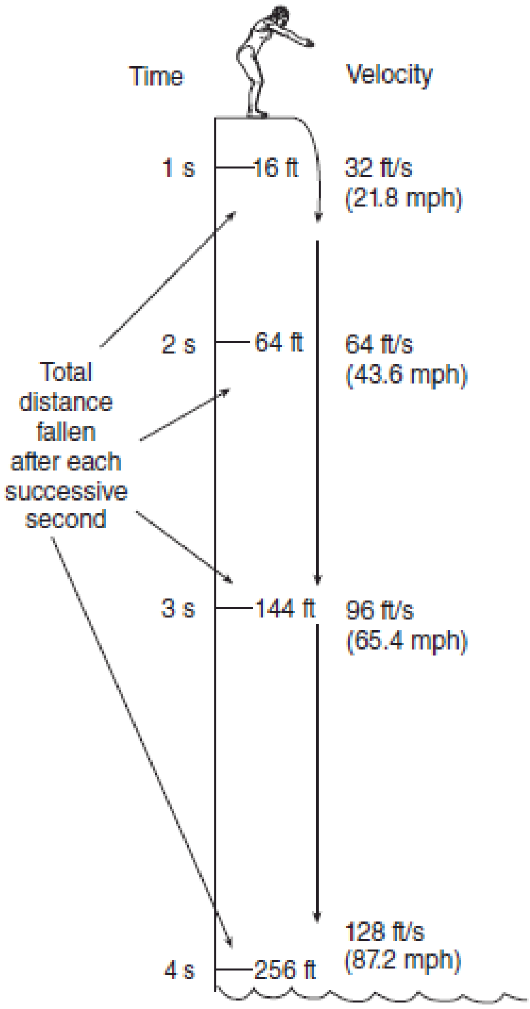
- 在大部分的運動情況下，由於經常會受到對手、空氣阻力等影響，擾亂了均勻的加速或減速，所以真正的勻加速度運動並不普遍。



備註：地心吸力只會影響到球的垂直移動；只有空氣阻力才會影響到球的水平移動。

- 不過，對於一些如**跳高**、**跳遠**、**跳水**、**彈網**、**體操**等運動，運動員於空中**短暫**「飛行」時，**空氣阻力**的影響**微乎其微**，在受到**「重力加速度」**的影響下，就會**均勻**地**加速**或**減速**。

  - **重力加速度**（Acceleration due to Gravity）指物體在空氣中經歷由**重力**（gravity）所導致的**向下加速度**（downward acceleration）。
  - **重力加速度**雖然在地球不同地點的表面有**少許**差異，但其**量值**大致上約為 **9.8 米/秒 ^{2}**，並常以 **g** 來表示。



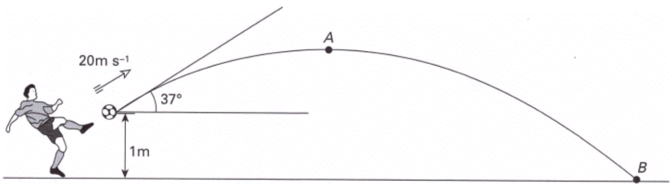
備註：重力是宇宙間所有物體的**相互引力**。很多時，它是指**地心**對**地球表面**物體的**引力**。

備註：標準的**高台跳水比賽**是 **10 米**（33 呎），運動員約經 **1.50 至 1.75 秒**，並以接近 **61 千米/小時**（38 哩/小時）的**速度**進入水面。

勻加速度運動例子：跳水

時間	速度				位移	
1s	9.8 m/s	32 ft/s	35 km/h	21.8 mph	4.8 m	16 ft
2s	19.6 m/s	64 ft/s	70 km/h	43.6 mph	19.6 m	64 ft
3s	29.4 m/s	96 ft/s	105 km/h	65.4 mph	43.9 m	96 ft
4s	39.2 m/s	128 ft/s	140 km/h	87.2 mph	78.0 m	256 ft

勻加速度運動的計算例子



在可忽略空氣阻力的情況下，計算

a) 球需時多久才到達 A 點（即最高點）。

b) A 點離地的高度。

c) 球的總飛行時間。

d) 球移動的水平距離。

題解：

a) 假設 u_y 為踢到球時初速度的垂直分量。

$u_y = u \sin 37^\circ = 20 \sin 37^\circ = 12$ 米/秒

到達 A 點的時候，球最終速度的垂直分量 $v_y = 0$ 米/秒。

$v_y = u_y - gt$　，　$(g = 10\ m/s^2)$

$0 = 12 - (10)t$

$t = \frac{12}{10}$

$= 1.2$ 秒

所以，球需時 1.2 秒到達最高點 A。

b) 從觸球點起計，設 s 為球上升至 A 點的位移。

$s = u_y t - \frac{1}{2}gt^2$

$= (12)(1.2) - \frac{1}{2}(10)(1.2)^2$

$= 7.2$ 米

所以 A 點離地的高度

$= 7.2 + 1$

$= 8.2$ 米

c) 球到達 B 點時，垂直位移為 -1 m。

假設球需時 t 到達 B 點。

$-1 = u_y t - \frac{1}{2}gt^2$

$-1 = (12)t - \frac{1}{2}(10)t^2$

$-1 = 12t - 5t^2$

$$t = \frac{-(-12) \pm \sqrt{(-12)^2 - 4(5)(-1)}}{2(5)}$$

$\therefore$ t = 2.48 或 -0.08（捨棄）

所以球需時 2.48 秒才到達 B 點。

d) 假設 u_x 為踢到球時初速度的水平分量。

$u_x = u \cos 37^\circ = 20 \cos 37^\circ = 16\ ms^{-1}$

所以球移動的水平距離

$= u_x t$

$= (16)(2.48)$

$= 39.6$ 米

備註：地心吸力只會影響到球的**垂直**移動，**不會**影響到它的**水平**移動。

參、線性動理學（Linear Kinetics）

一、慣性（Inertia）

- 是物體**抗拒改變**的能力。
- 除非受到**外力**作用，迫使物體改變狀態，否則物體會**趨於**保持**靜止**或向**同一方向**作**勻速直線**運動。

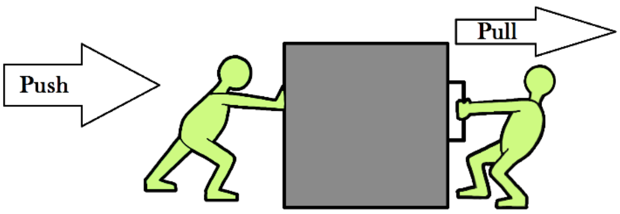
二、質量（Mass，m）

- 指物體包含著多少**物質**，可用作**量度**物體的**慣性**。
- 物體的**質量越大**，其**慣性越大**。
  - ➢ **靜止時**越難使其運動；
  - ➢ **運動中**也越難使其加速、減速或停下。
- 質量的單位是**千克**。

三、重量（Weight，W）

- 是**地球**施加於物體的**吸引力**（gravitational force）。
- **重量不同於質量**。
- 重量和質量的關係是 **W = mg**，單位是**牛頓**（Newton，N）。
- 物體的**質量**在任何地方都不會改變，但**重量**則**會**隨著不同地點的 **g** 而改變。
  - 地球上 **g** 約為 **10 米/秒 ^{2}**；月球上 **g** 約為 **1.6 米/秒 ^{2}**。
  - 一個質量為 50 千克的人，地球上的體重為 500 牛頓，若身處月球時，其體重則只有 80 牛頓。

四、力（Force，F）

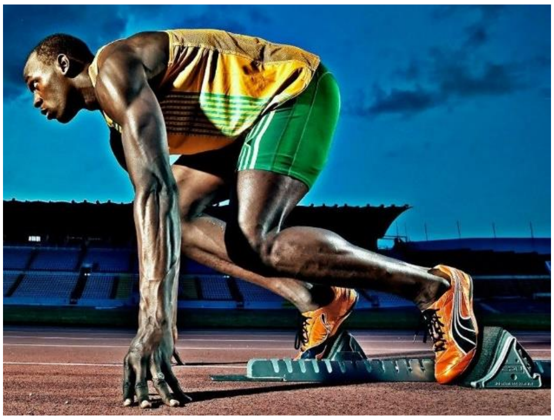


- 是**物體**與**物體**之間的「**推**」、「**拉**」作用，可引致
  - **靜止中**的物體**產生運動**；
  - **運動中**的物體**加速**、**減速**或**改變方向**。
- 是**矢量**，有**量值**和**方向**。
- 單位是**牛頓**（Newton，N）。
- **1 牛頓**的**力**可以使一個**質量**為 **1 千克**的物體，產生 **1 米/秒 ^{2}** 的**加速度**。

五、牛頓定律

1. **牛頓第一定律**（慣性定律）
   - 除非受**外力**作用迫使物體**改變**其狀態，物體**趨於**保持**靜止**或向**同一方向**作**勻速直線**運動。

例子一：短跑的起跑



- **起跑前**，運動員的身體處於「**靜止**」的狀態；**起跑時**，運動員需要**用力蹬地**（或起跑器），以**克服慣性**，推動身體向前。

例子二：室內短跑賽終點設置緩衝軟墊

- 運動員完成短跑賽事後，**慣性**會使他們有**繼續衝前**的傾向；除非有**外力**施加在他們身上，否則**不能停止**他們**繼續向前**的狀態。在終點設置**軟墊**，就是用以**緩衝**運動員**衝前**的**力量**，使他們能夠在**短時間**內**安全地減速**及**停下**來。

2. **牛頓第二定律**（加速度定律）

- 物體的**加速度**與它所受的**力**的大小成**正比**，並和它的**質量**成**反比**；物體**加速度**的**方向**與所受的**力**的**方向相同**。
- **力** = 物體的**質量** × **加速度**

$$F = ma \quad 或 \quad a = \frac{F}{m}$$

例子一：排球的扣球

- 排球比賽中，扣球的**力量越大**，球的**加速度越高**，達至的**速度**也**越高**，防守就越困難。

例子二：傳球

- 傳球的**力量越大**時，球的**加速度越高**。
- 此外，以**同樣大小**的**力量**傳球時，
  - 球的**質量越大**，**加速度越低**；
  - 球的**質量越小**，**加速度越高**。

3. **牛頓第三定律**（作用力與反作用力定律）

- 當一個物體的力**作用**於另外一個物體時，第二個物體必然會對第一個物體產生一個**大小相等**但**方向相反**的**反作用力**。

例子一：跳高的起跳

- 跳高運動員用力蹬地起跳時，力**作用**於地面，地面亦產生一鼓**力量相同**，但**方向相反**的**反作用力**，使運動員能躍離地面。

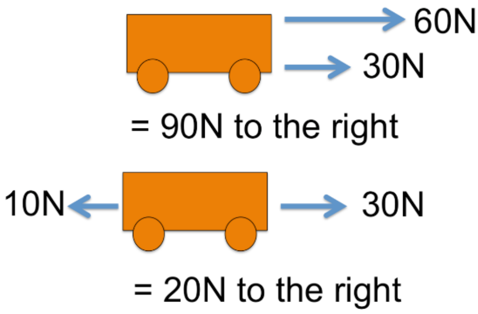
例子二：籃球從空中落在地面時的情況

- 籃球接觸地面時，籃球的**作用力**向下**作用**於地面，地面亦給予籃球一個**大小相同**但**方向相反**的**反作用力**，使籃球向上彈起。

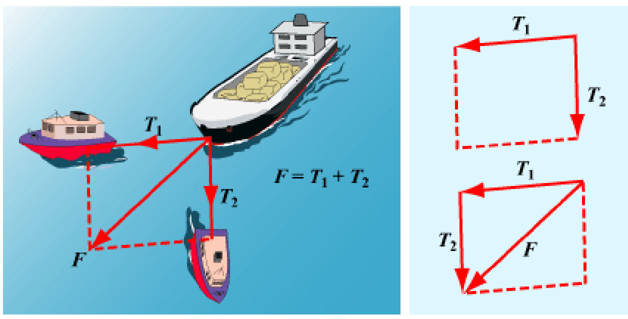
例子三：泳手撐池轉身的動作

- 泳手轉池時，雙腿的**作用力**向後**作用**於池邊，池邊亦給予泳手一個**大小相同**但**方向相反**的**反作用力**，幫助泳手轉身向前推進。

六、合力（Resultant Force）



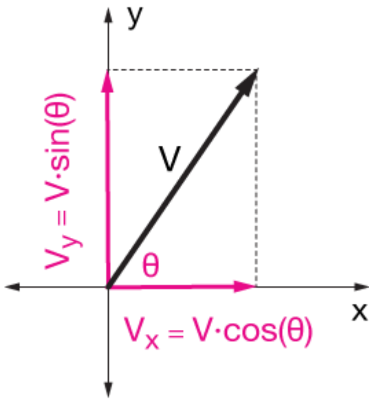
- **兩個**或**更多力**同時作用於一個物體時產生的**綜合矢量**，稱為**合力**。
- 合力可以利用一個「**力平行四邊形**」來計算其**量值**和**方向性**。



F = T₁ + T₂

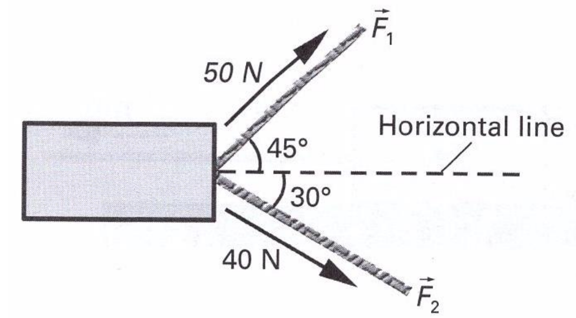
七、力的分解（Resolution of Forces）

- **力**可被**分解**成它的**垂直分量**（vertical component，V_y）及**水平分量**（horizontal component，V_x）。



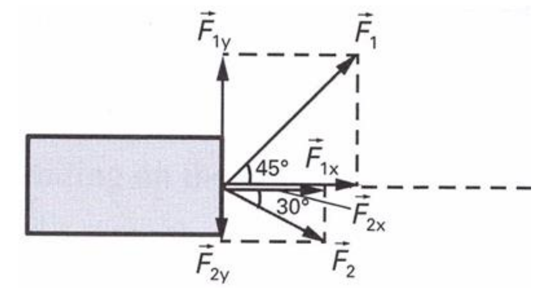
力的計算例子

計算 F_1 與 F_2 的合力。



題解：

先分解 F_1 與 F_2 如下：

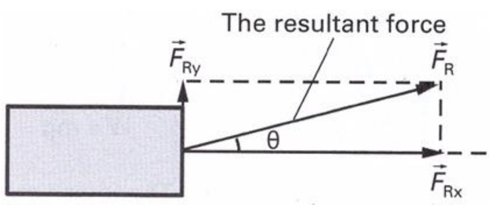


$F_{1x} = F_1 \cos 45^\circ = (50\text{ N}) \cos 45^\circ = 35.3\text{ N}$

$F_{1y} = F_1 \sin 45^\circ = (50\text{ N}) \sin 45^\circ = 35.3\text{ N}$

$F_{2x} = F_2 \cos 30^\circ = (40\text{ N}) \cos 30^\circ = 34.6\text{ N}$

$F_{2y} = -F_2 \sin 30^\circ = (-40\text{ N}) \sin 30^\circ = -20\text{ N}$



$F_{Rx} = F_{1x} + F_{2x} = 35.3\text{ N} + 34.6\text{ N} = 69.9\text{ N}$

$F_{Ry} = F_{1y} + F_{2y} = 35.3\text{ N} - 20\text{ N} = 15.3\text{ N}$

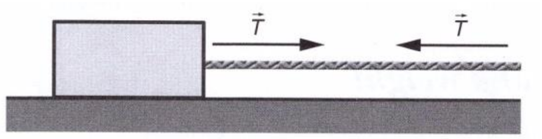
$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} = \sqrt{(69.9)^2 + (15.3)^2} = 71.6\text{ N}$

$\tan\theta = \dfrac{F_{Ry}}{F_{Rx}} = \dfrac{15.3\text{ N}}{69.9\text{N}} = 0.22$

$\theta = 12.3^{\circ}$

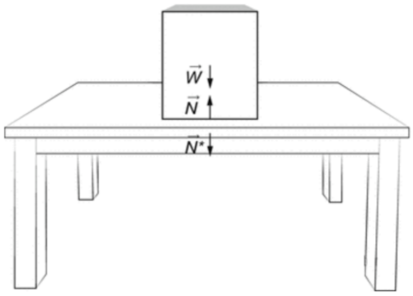
八、力的其他種類

1. **張力**（Tension）



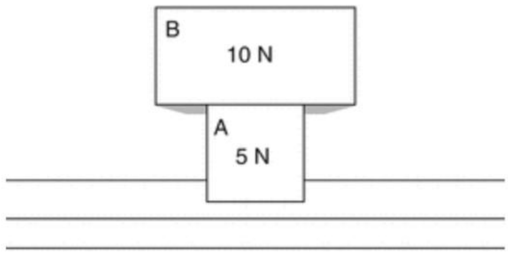
- 當一條繫在物體上的繩索被**拉緊**時，就會產生**張力**。

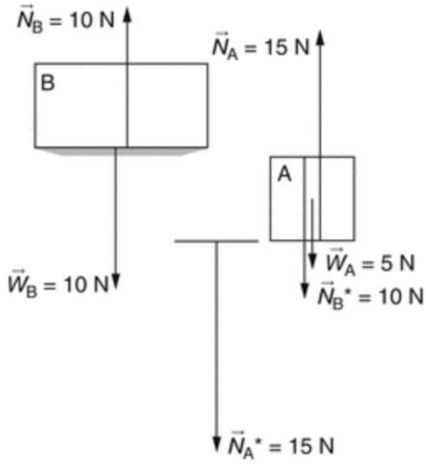
2. **法向力**（Normal Reaction Force）



- 方塊與地球之間
  - **作用力：**地球施加的**吸引力**作用於方塊（W）。
  - **反作用力：**方塊亦對地球施加了**力量相同**但**方向相反**的 W*（沒有在圖中顯示）。

- 由於受到枱的**支持**，方塊才**沒有**加速落在地面。
- 方塊與枱面之間
  - **作用力：**枱面**垂直向上**對方塊施加了**法向力** N，而且 N = W，所以方塊在枱面上靜著不動。
  - **反作用力：**方塊亦**向下**對枱面施加**同樣大小**的力 N*。
- 假設把**方塊 A** 及**方塊 B** 放在枱上。





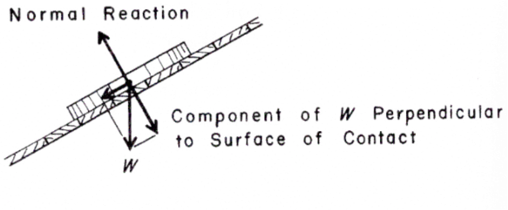
  - 就**方塊 B** 而言，因應其重量 W_B，**方塊 A** 亦對其施加同樣大小的**法向力** N_B，

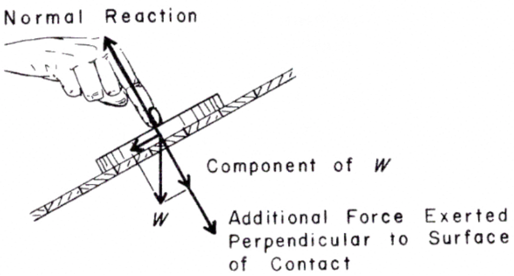
    $N_B = W_B = 10\text{ N}$。

  - 就**方塊 A** 而言，因應其重量 W_A，及**方塊 B** 對其施加的 N_B^*，枱面亦會對其施加相當於 $W_A+N_B^*$ 的**法向力** N_A，

    $N_A = W_A+N_B^* = 15\text{ N}$。

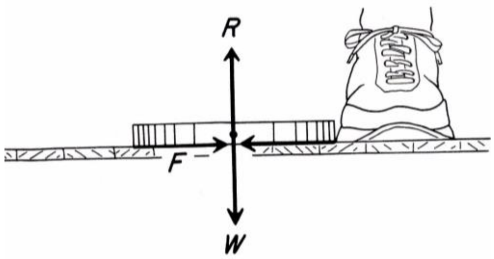
- 當物體是放在斜面的時候，法向力等於物體重量垂直於平面的分力。



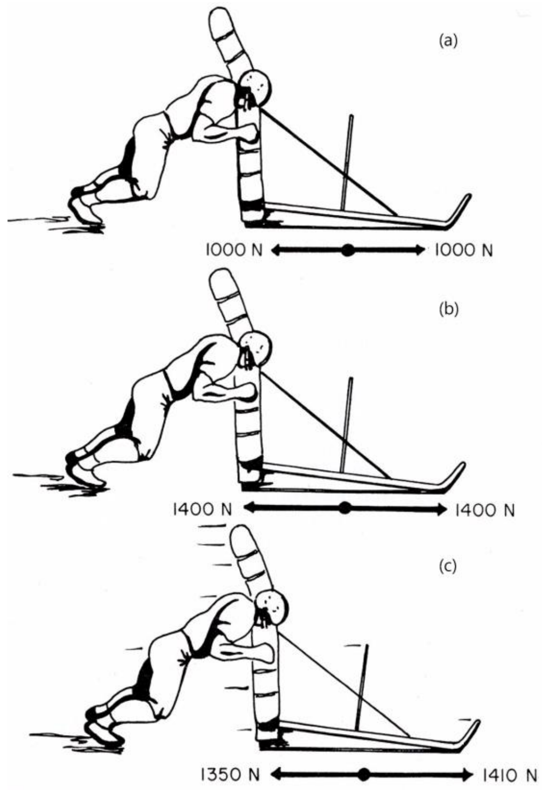


3. **摩擦力**（Friction）

- 當一個物體在另一個物體的表面上移動或伺候移動時，就會產生摩擦力。
  - ➢ 摩擦力的方向永遠與運動或即將開始運動的方向相反。

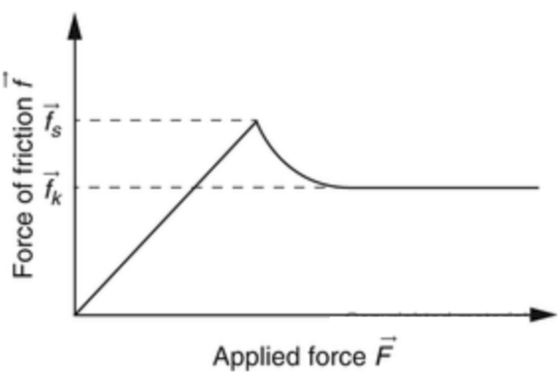


- 除非運動已經產生，否則摩擦力等於施加在物體上用以進行運動的力（見圖九(a)）。
- 當施加的力達至靜摩擦力（static friction）的極限時，也就到達即將產生運動的臨界點（見圖九(b)）。
- 當施加的力再稍高於靜摩擦力的極限時，運動隨即產生，而隨後要應對的動摩擦力（kinetic friction）將小於靜摩擦力（見圖九(c)）。



圖九、假設靜摩擦力的極限為 1400 N。最初施加的力只有 1000 N，所以未能產生運動，摩擦力亦等於施加的力（1000 N）。當施加的力增大至 1400 N 時，也就到達了靜摩擦力極限，運動即將產生。當繼續施加的力稍高於 1400 N 時（如 1410 N），運動隨即產生，而隨後要應對的動摩擦力（假設為 1350 N）將小於靜摩擦力（1400 N）。

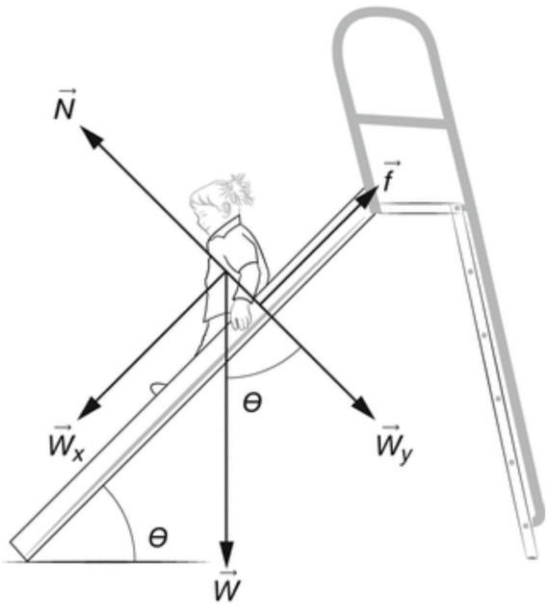
- 從下圖可見，運動開始後的動摩擦力（f_k）要少於運動開始前的靜摩擦力（f_s）。



- $f_s = \mu_s N$
  $f_k = \mu_k N$
  - μ_s 為**靜摩擦系數**（coefficient of static friction），
    μ_k 為**動摩擦系數**（coefficient of kinetic friction），
    N 為法向力
- μ_s 與 μ_k 的數值視乎**接觸面**的**質料**而定，與**接觸面**的**大小無關**。

摩擦力的計算例子

假設 m = 20 kg，θ = 45°，g = 10 m/s²，μ_s = 0.8，μ_k = 0.6。



a) 計算 W_x 及 W_y。

b) 計算 N。

c) 討論孩子放開手時會否下滑。

d) 計算動摩擦力。

e) 計算孩子向下滑的加速度。

f) 討論如果θ大過 45° 會怎樣。

題解：

a) $W_x = (20)(10) \sin 45^\circ = 141.4$ N

$W_y = (20)(10) \cos 45^\circ = 141.4$ N

b) $N = W_y = 141.4$ N

c) 靜摩擦力（f_s）

$= \mu_s N$

$= (0.8)(141.4)$

$= 113.1$ N

由於 W_x 高於靜摩擦力，所以孩子會向下滑。

d) 動摩擦力（f_k）

$= \mu_k N$

$= (0.6)(141.4)$

$= 84.8$N

e) 向下滑的加速度

$= \dfrac{W_x - f_k}{m}$

$= \dfrac{141.4 - 84.8}{20}$

$= 2.83$ m/s²

f) 當θ增加時，

sin θ增加，使 W_x 也增加。

另一方面，cos θ減少，於是 W_y 也減少，N 亦因而減少，使到 f_s 和 f_k 也減少。

因此，孩子更容易滑下，而且以更高的加速度滑下。

九、動量與衝量

1. **動量**（Momentum）

- **動量** = **質量** × **速度**
  - **移動中**物體的**質量**越大，其**動量**越大；
  - **移動中**物體的**速度**越高，其**動量**也越大；
  - **靜止中**的物體**沒有動量**。
- 動量是**矢量**，有**量值**及**方向性**。
- 動量的單位是**千克・米・秒$^{-1}$**（kg m s^{-1}）。
- 物體的**動量越大**，**越難**使其**停下**（即**越難**改變其**加速度**）。

2. **衝量**（Impulse）

- 從**牛頓第二定律**，F = ma，可得出

$$F = m \cdot \frac{(v - u)}{t}$$

$$F = m \cdot \frac{\Delta v}{t}$$　（Δv 是速度上的改變）

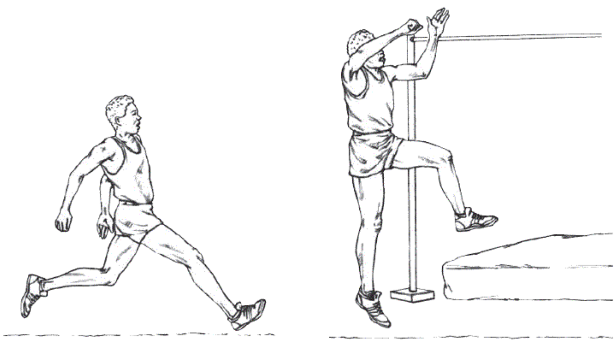
- 在公式的左、右兩邊同時乘以 t 後，

$$Ft = m \cdot \Delta v$$

- Ft，亦即 **力** × **時間**，就是**衝量**。
- 從 Ft = m・Δv 的公式可見，

  衝量 = **動量**的**改變**
- 衝量也是**矢量**，單位與動量相同。
- 從 Ft = m・Δv 的公式亦可見，
  - **衝量**越大，**動量**的**改變**越大。
  - F 越大，衝量越大，動量的改變越大。
  - t 越大，衝量越大，動量的改變越大。
  - 另一方面，在**相同**的衝量或動量改變下，若要降低 F，就要增加 t。這也就是所謂**「緩衝」**的意思。

例子一：跳高的起跳



- 優秀的跳高運動員，在轉身**起跳前**會先把身體**後仰**，使自己有**更充分**的**時間**轉身**發力**起跳，以**增加衝量**，從而使**動量**有**更大**的**改變**，令起跳時的**初速度增加**，可以跳得更高。

備註：跳遠及其他**球類**的**起跳**動作均有**類似**的動作和效果。

例子二：背向滑步推鉛球技術

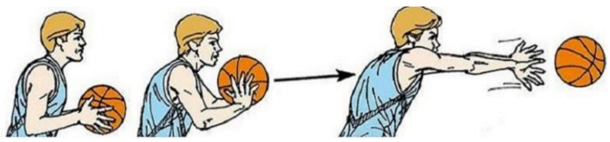
- 運動員以**「背向滑步推鉛球」**時，鉛球**受力**的**時間**比「立定推鉛球」**長**，所以鉛球獲得的**衝量較大**，其**動量**的**改變**也**較大**，亦即鉛球出手時的**初速度**都**較大**，在空中飛行的**時間較長**，**距離**亦會**較遠**。

備註：擲鐵餅的**旋轉**動作、**擲標槍**的**助跑**及**「拉弓」**動作均有類似的作用。

例子三：踢球或擊球的「後續」動作

- 踢球或擊球後的「**後續動作**」（follow-through），是為了**延長力作用**於球上的**時間**，以**增加衝量**和**動量**的**改變**，使球可以去得**更快**和**更遠**。

例子四：改善「雙手胸前傳球」時的力量不足



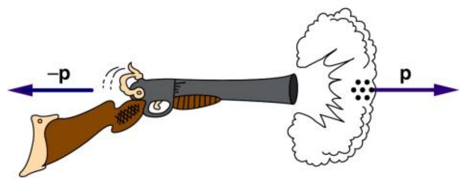
- 把籃球傳出時，可以**同時向前**踏出一步，將身體傾前，並伸展手臂，連手指亦要有隨球動作。這技術可以**延長**籃球**受力**的**時間**，**增加衝量**和**動量**的**改變**，使球出手時的**初速度增加**，可以去得**更快**和**更遠**。

例子五：空中落地時的屈膝動作

- 球員從空中落地時，下肢要承受很大的**衝量**，落下的**高度越高**，**動量**的**改變**便**越大**，**衝量**也**越大**。屈膝的動作就是要**延長**（即**增加**）下肢**受力**的**時間**（t），以**減低**下肢的**受力**（F）**程度**。
  - 由於著地時的**衝量**（Ft）已按**動量**的**改變**而**固定**，所以 t **越大**，F 便會**越小**。
  - 其他運動項目的**屈膝著地技術**和**保護裝備**，如軟墊、頭盔、手套、拳套等，目的同樣都是為了**延長**人體**受力**的**時間**，以**緩衝**（或**減少**）**受力**的**程度**。

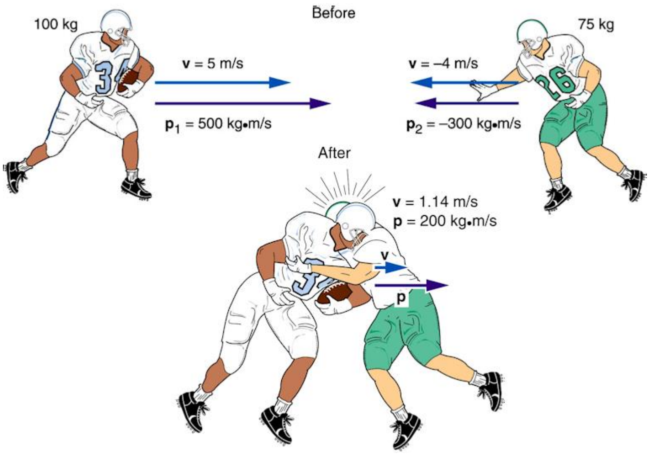
十、**動量守恆定律**（Law of Conservation of Momentum）

- 主要是用作分析**碰撞**（collisions）及**某些爆炸**（explosions）種類。



- 在**沒有外力**作用之下，物體（可以多過一個）**碰撞前**及**碰撞後**的**總動量**（total momentum）**相等**。

例子一：球員碰撞前後的總動量



碰撞前的總動量

= (100)(5) + (75)(–4)

= 500 – 300

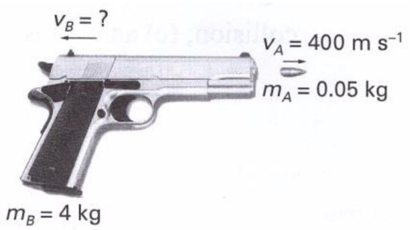
= 200 kg・ms^{-1}

碰撞後的總動量

= (100 + 75)(1.14)

= 200 kg・ms^{-1}

例子二：計算手槍發射後的反衝速度



假設 u_A 及 u_B 分別為發射時子彈與手槍的初速度，則 $u_A = u_B = 0$ ms^{-1}。

根據動量守衡定律，

$$m_Au_A + m_Bu_B = m_Av_A + m_Bv_B$$

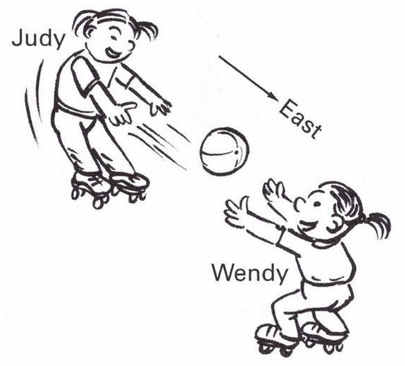
$$0 + 0 = (0.05)(400) + (4)v_B$$

$$v_B = -5 \text{ ms}^{-1}$$

備註： "–" 表示發射後**手槍移動方向**與**子彈相反**。

動量守恆的計算例子

假設 Judy（m_J = 50 kg）及 Wendy（m_W = 40 kg）原先為靜止狀態。Judy 把球（m_B = 0.7 kg）以 v_B = 22 ms^{-1} 的速度傳給 Wendy。



請計算

a) Judy 傳球後的速度（v_J）。

b) Wendy 接球後的速度（v_W）。

題解：

a) 根據動量守衡定律，

$$m_Ju_J + m_Bu_B = m_Jv_J + m_Bv_B$$

$$(50)(0) + (0.7)(0) = (50)v_J + (0.7)(22)$$

$$v_J = -0.31 \text{ ms}^{-1}$$

∴ Judy 的速度為–0.31 ms^{-1}（西方）

b) 根據動量守衡定律，

$$m_Wu_W + m_Bu_B = m_Wv_W + m_Bv_B$$

$$(40)(0) + (0.7)(22) = (40 + 0.7)v$$

$$v = 0.38 \text{ ms}^{-1}$$

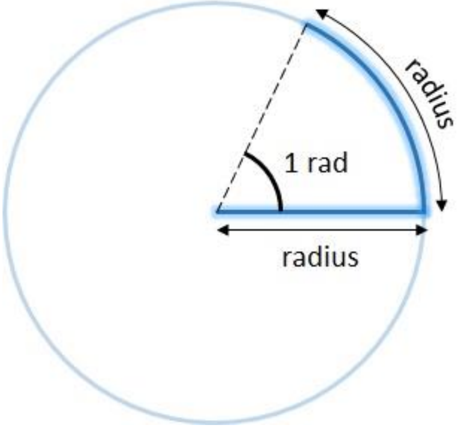
∴ Wendy 的速度為 0.38 ms^{-1}（東方）

備註： 接球後，$v_W = v_B = v$。

肆、角運動學（Angular Kinematics）

一、弧度（Radian，Rad）

- 描述**角運動**（angular motion）時，除了可用**度數**（degree）及**轉數**（revolution）外，還可以用**弧度**（radian）。



- ∵ 360˚內弧度的總數

$$= \frac{\text{圓周}}{\text{半徑}} = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$$

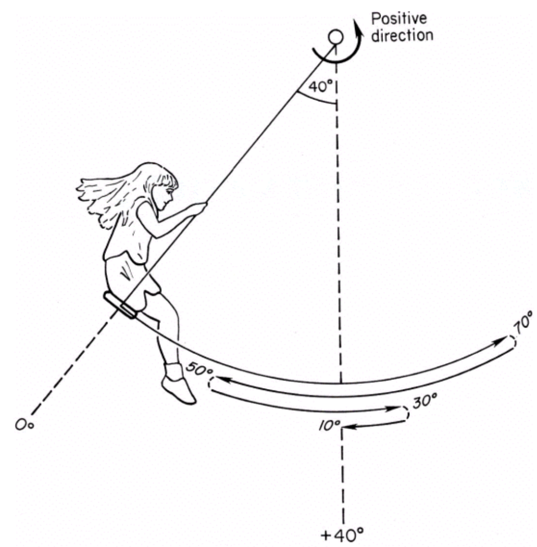
$$\therefore\ 1\ \text{Rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = \frac{180^\circ}{\pi} = 57.3^\circ$$

二、角距離與角位移

1. **角距離**（Angular Distance，ϕ）
   - 是物體進行**角運動**時，繞**軸線**轉動的**角度總和**。
2. **角位移**（Angular Displacement，θ）
   - 是物體繞**軸線**轉動時，**初始位置**與**最終位置**之間的**角度**。
     - ➢ **完整**旋轉**1圈**為**360˚**或**2π rad**。
     - ➢ 一般以**逆時針**（counterclockwise）方向為**正**，**順時針**（clockwise）方向為**負**。

角距離與角位移的計算例子

計算女孩經歷的角距離和角位移。



角距離

= 70˚+ 50˚+ 30˚+ 10˚

= 160˚

角位移

= +40˚– 0˚

= +40˚

三、角速率與角速度

1. **角速率**（Angular Speed，σ）
   - 是**角距離**對於**時間**的變化率。

$$\text{平均角速率} = \frac{\text{角距離}}{\text{時間}}，(\sigma = \frac{\phi}{t})$$

2. **角速度**（Angular Velocity，ω）
   - 是**角位移**對於**時間**的變化率。

$$\text{平均角速度} = \frac{\text{角位移}}{\text{時間}}，(\omega = \frac{\theta}{t})$$

   - **角速度**的單位是**弧度/秒**（rad/sec）。

四、角加速度（Angular Acceleration，α）

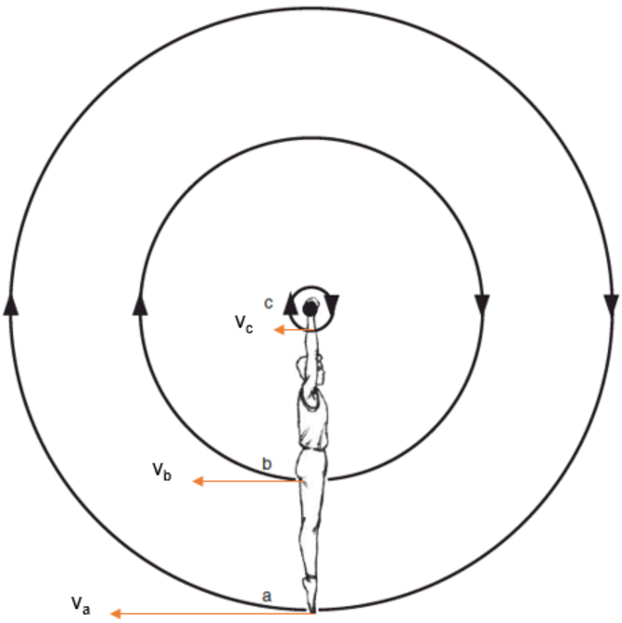
- 是**角速度**對於**時間**的變化率。
- 假設**初始角速度** = ω_i

  最終角速度 = ω_f

  $$\text{平均角加速度} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

- **角加速度**的單位是**弧度/平方秒**（rad/sec²）。

五、線性（切向）速度與角速度的關係



- 圖中體操運動員做「**向後大回環一周**」動作時，身體的**任何部分**都以**同樣**的**角速度**轉了一周。
  - ➢ $\omega_a = \omega_b = \omega_c$
- 但很明顯地，距離**轉軸越遠**（**回轉半徑越長**）的身體部分，其**線性（切向）速度**（tangential velocity）**越高**。
  - ➢ $v_a > v_b > v_c$

- 假設圖中的哥爾夫球手用了時間 t 把棒頭從 P 點移至 Q 點。

棒頭移動的**平均速率**

$$s = \frac{\text{弧線 PQ}}{t} \quad \cdots\cdots (1)$$

棒頭移動的**平均角速率**

$$\sigma = \frac{\text{弧線 PQ} \div r}{t} \quad \text{（單位為弧度，rad）}$$

$$= \frac{\text{弧線 PQ}}{rt} \quad \cdots\cdots (2)$$

把(1)代入(2)中，可得

$$\sigma = \frac{st}{rt} = \frac{s}{r} \quad \text{或} \quad s = \sigma r$$

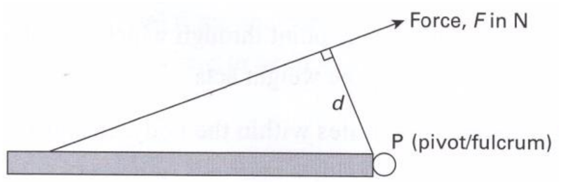
當 t 的數值是很小的時候，**瞬時線性速度**和**瞬時角速度**的關係就是

$$v = \omega r$$

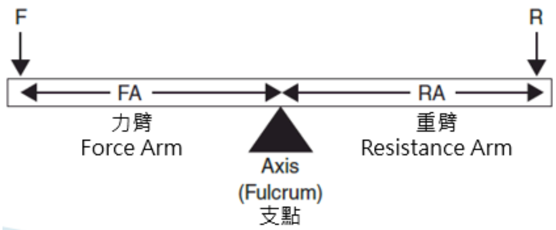
伍、角動理學（Angular Kinetics）

一、力矩（Moment of a Force，亦作 Torque）

- 就是**力**繞一**軸心**所產生的**轉動**效果。

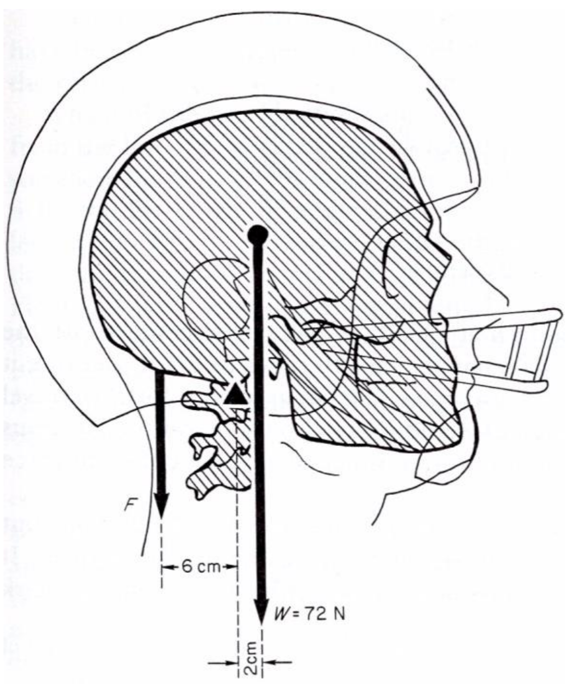


- **力矩** = **作用力**（**F**） × **支點**（pivot 或 fulcrum）到**力作用線**的**垂直距離**（**d**）。
- 單位是**牛頓．米**（Nm）。



力矩的計算例子

假設頭部加上頭盔的重量為 72 N，請計算頸部肌肉要維持頭部平衡的力量 F。



題解：

F × 0.06　= 72 × 0.02

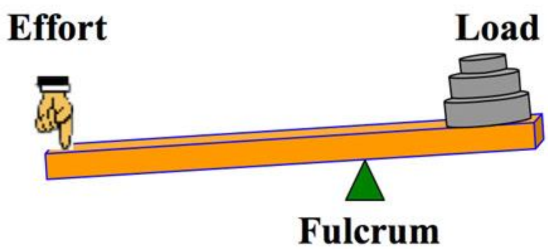
F　= 24 N

備註：

- 從這例子可見，如果**力矩不變**，**力臂越長**，**用力越小**。
- 如果**用力不變**，**力臂越長**，可以產生的**力矩越大**。
- 所以擊球時用**較長**的**桿**或**棒**可以擊出**較長**的**距離**；投擲運動員的**手臂越長**，亦可**投得越遠**。

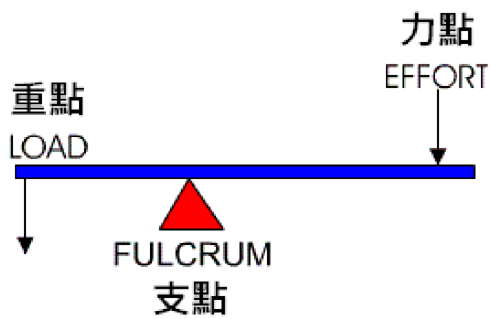
二、槓桿（Levers）

- 利用**槓桿**原理可以**提升**工作效率和效能。

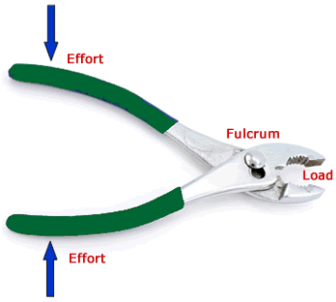


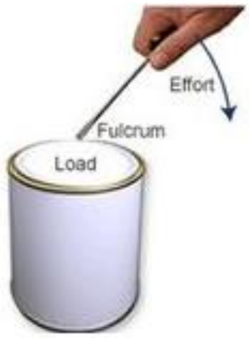
- 槓桿可以分為**三種**類型。

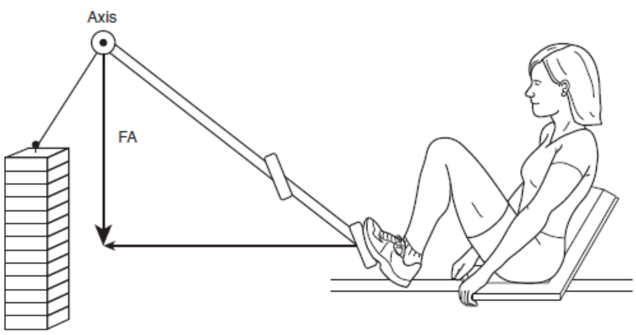
1. **第一類槓桿：支點**（fulcrum）位於**力點**（effort）和**重點**（load）**之間**。



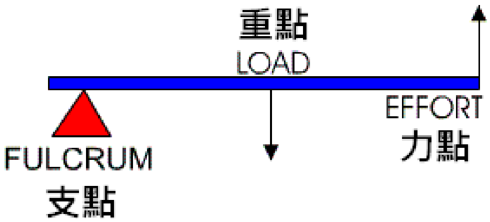
第一類槓桿例子



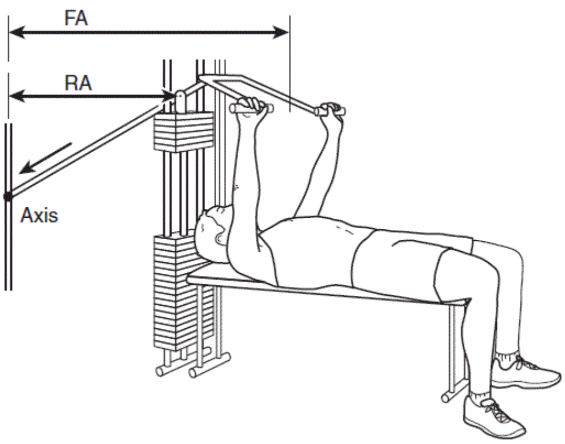




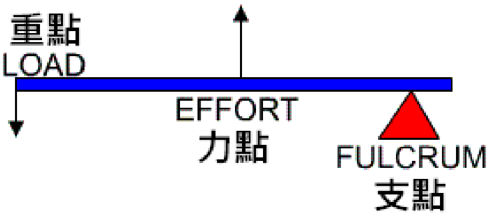
2. **第二類槓桿：重點**（load）位於**支點**（fulcrum）和**力點**（effort）**之間**。



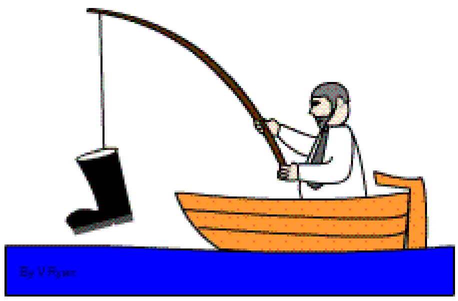
第二類槓桿例子

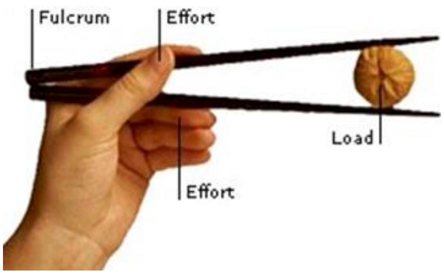


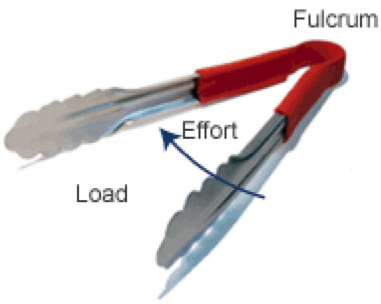
3. **第三類槓桿：力點**（effort）位於**支點**（fulcrum）和**重點**（load）**之間**。

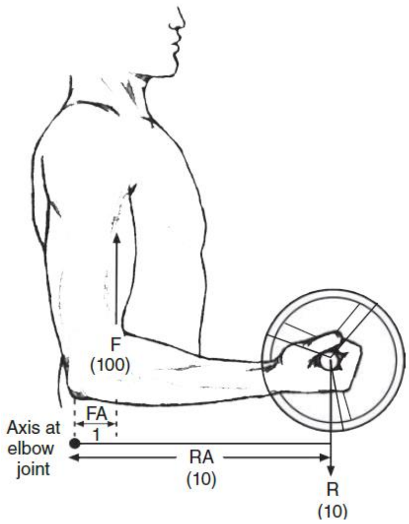


第三類槓桿例子



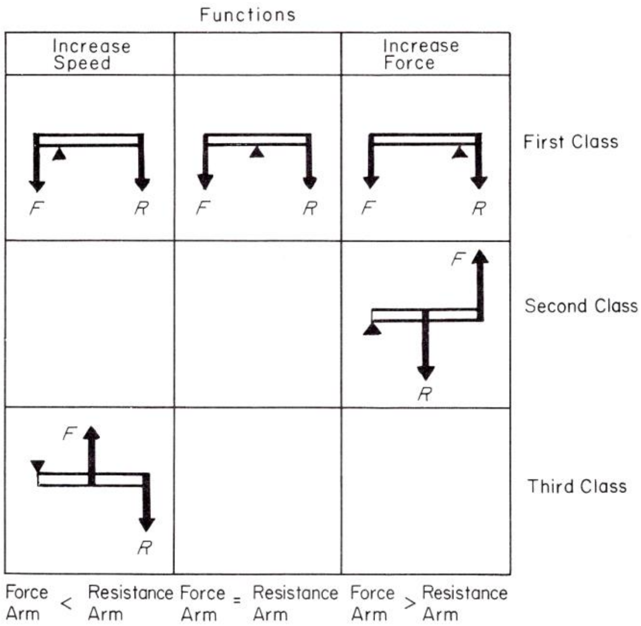






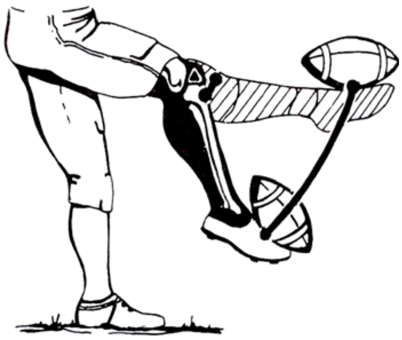
備註：

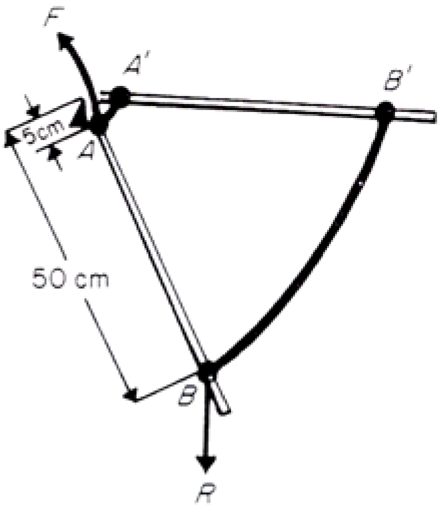
- 若**力量不變**，運用槓桿可以**移動更重**的物體，或**提升**物體的**移動速度**，其效能主要取決於**力臂**（force arm）和**重臂**（resistance arm）的**長度**。
  - **力臂** > **重臂**，有利**發力**
  - **重臂** > **力臂**，有利**速度**



例子：踢球

假設圖中踢球時**小腿**（槓桿）以**膝關節**為**軸**轉動了 30°。





弧線 AA' $= 2\pi(5)(\frac{30}{360})$

$= 2.6$ cm

弧線 BB' $= 2\pi(50)(\frac{30}{360})$

$= 26$ cm

備註：

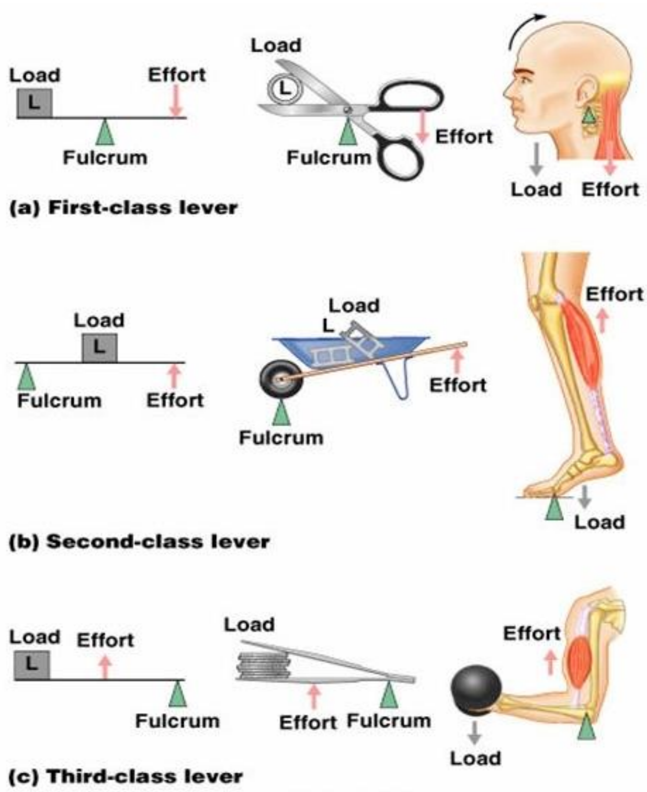
- 由於 **A 點**及 **B 點**以**同樣**時間分別到達 **A' 點**及 **B' 點**，所以球從 **B 點**至 **B' 點**的**平均線性速率**是從 **A 點**至 **A' 點**的 **10 倍**。

槓桿的應用例子

請解釋為何使用較長的球棒可以擊出較遠的球。

題解：

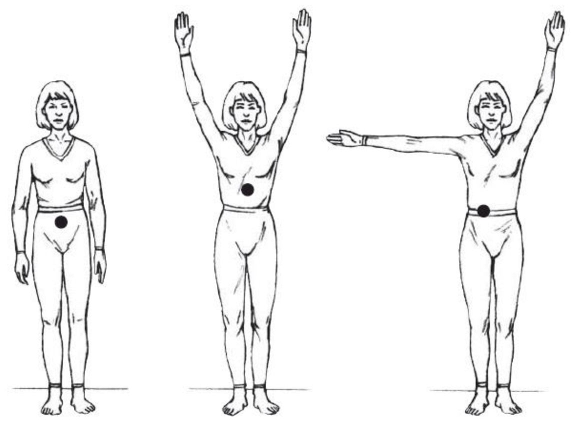
使用**較長**的**球棒**時，在**相同**的**用力**之下，**力臂較長**，所產生的**力矩較大**，而且擊球點所達至的**平均線性速率**亦**較高**，所以有利於擊出較遠的球。



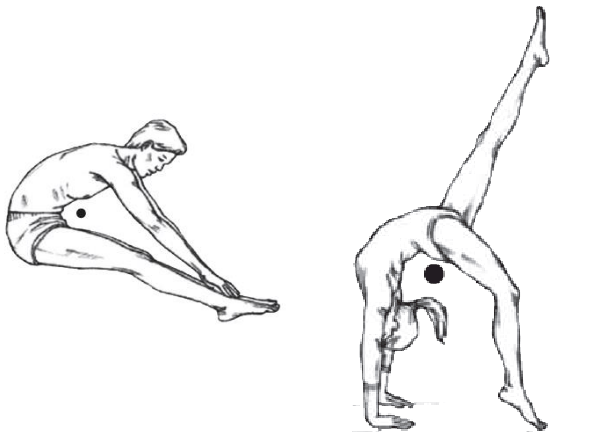
- **人體內的槓桿系統**只可以完成**旋轉**動作。
  - 這種圍繞**轉軸**而產生**轉動**效果的物理量就是**力矩**。
- 人體內的槓桿，大部分都屬於**有利速度**發揮的**第三類槓桿**。

三、 重心（Centre of Gravity）

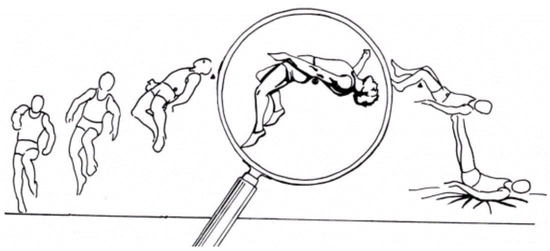
- 是物體**質量**的**中心點**。
- 位置取決於物體內部**質量**的**分佈**。
- 人體**重心**的**位置**會隨著**運動**或**姿勢改變**而發生變化。



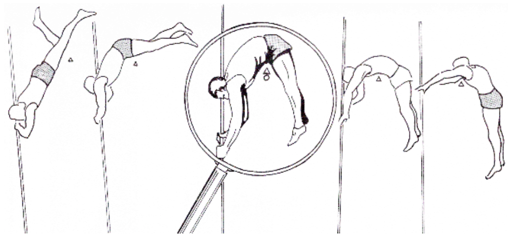
- 人體**重心**的**位置**亦可以在**身體之外**。



例子：背越式跳高

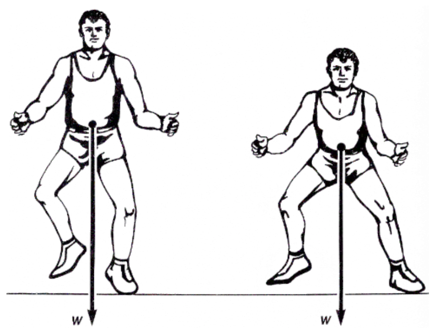


- 採用**背越式跳高**技術的運動員，過桿時將背部向後**彎屈**，令**重心位置**移到**體外**，使其更**貼近橫桿**或處於**橫桿以下**，比其他跳高方法更有利於越過橫桿。
- 其實**撐桿跳高**也有類似的情況。

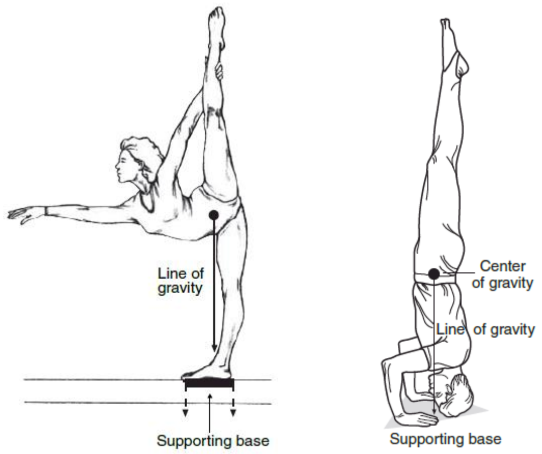


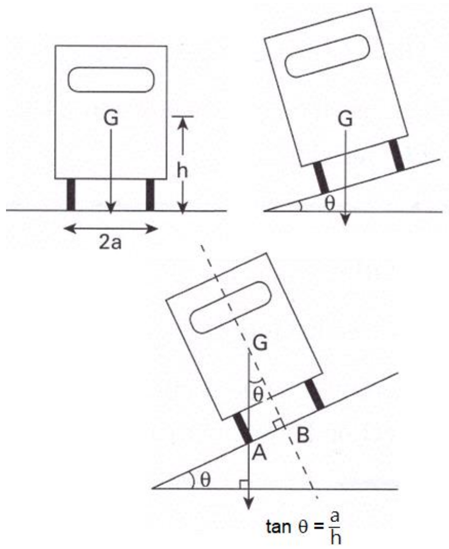
備註：

- **重心越低**，物體越**穩定**。



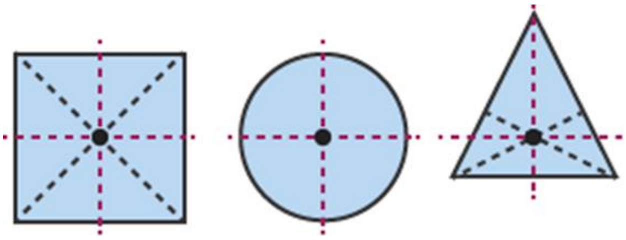
- **底面積越大**，物體也越**穩定**。



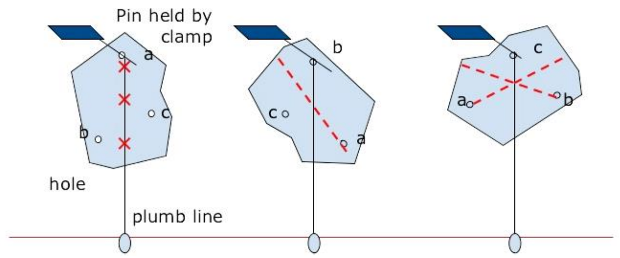


找出物體重心的方法

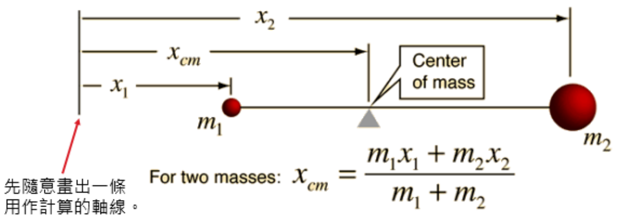
1. 找出**規則物體**重心的方法
   - 利用**一般數學方法**計算。



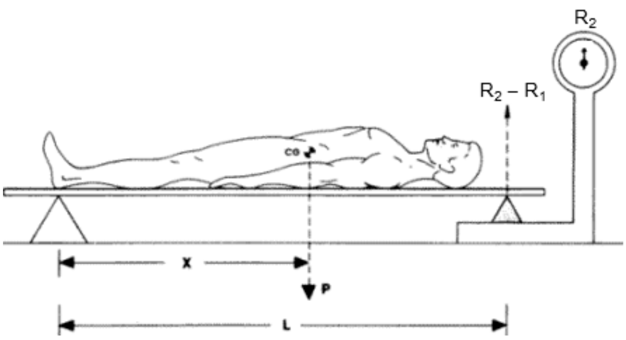
2. 找出**不規則物體**重心的方法
   - 利用**鉛垂線**（plumb line）。



   - 利用**力矩**計算。



3. 找出**人體**重心的方法
   - 利用**力矩**計算。



R1：平板讀數

R2：人體 ＋ 平板讀數

W：人體重量

$Wx = (R_2 - R_1)L$

x 就是**人體重心**離**腳底**之距離。

4. 以「**分割法**」找出**不同姿勢**下的**人體**重心
   - 先利用**解剖屍體**或**排水法**等找出人體**各部分**佔**身體重量**的**百分比**。

TABLE 6-1 Weights of Body Segments Relative to Total Body Weight

Segment	*Relative Weight*
Head	0.073
Trunk	0.507
Upper arm	0.026
Forearm	0.016
Hand	0.007
Thigh	0.103
Calf	0.043
Foot	0.015

Source: Adapted from data presented in Clauser, C. E. McConville, J. T., and Young, J. W. (1969). *Weight, Volume and Center of Mass of Segments of the Human Body* (p. 59). AMRL Technical Report 69–70. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: AMRL]

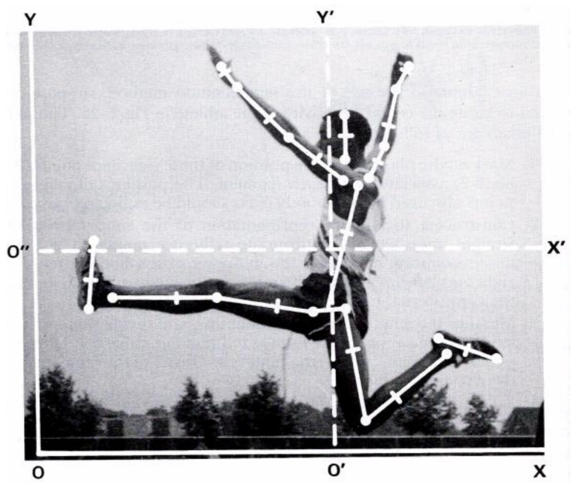
   - 再根據身體**各部分重心位置**的已有數據。

TABLE 6-2 Locations of Centers of Gravity of Body Segments

Segment	*Center-of-Gravity Location Expressed as Percentage of Total Distance Between Reference Points*
Head	46.4% to vertex; 53.6% to chin-neck intersect
Trunk	43.8% to suprasternal notch; 56.2% to hip axis
Upper arm	49.1% to shoulder axis; 50.9% to elbow axis
Forearm	41.8% to elbow axis; 58.2% to wrist axis
Hand	82.0% to wrist axis; 18.0% to knuckle III
Thigh	40.0% to hip axis; 60.0% to knee axis
Calf	41.8% to knee axis; 58.2% to ankle axis
Foot	44.9% to heel; 55.1% to tip of longest toe

Source: Adapted from data presented in Clauser, C. E., McConville, J. T., and Young, J. W. (1969). *Weight, Volume and Center of Mass of Segments of the Human Body* (pp. 46–55) AMRL Technical Report 69–70. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: AMRL. and in Hinrichs, R.N. (1990). Adjustments to the segment center of mass proportions of Clauser et al. (1969). *Journal of Biomechanics*, 23:949–951.

   - 在照片上畫上身體**各部分**的**重心位置**所在，並設定 **x 軸**及 **y 軸**。



- 然後計算身體**各部分**沿 **x 軸**及 **y 軸**的**力矩**。

TABLE 6-3 Form for Computation of Center-of-Gravity Coordinates

Segment	Column 1 Segment Weight	Column 2 Distance to OY (cm)	Column 3 Moments about OY	Column 4 Distance to OX (cm)	Column 5 Moments about OX
Head	0.073	6.8	0.496	6.9	0.504
Trunk	0.507	6.8	3.448	4.7	2.383
Right upper arm	0.026	7.5	0.195	6.3	0.164
Right forearm	0.016	7.8	0.125	7.1	0.114
Right hand	0.007	8.2	0.057	8.2	0.057
Left upper arm	0.026	6.2	0.161	6.4	0.166
Left forearm	0.016	5.2	0.083	7.3	0.117
Left hand	0.007	4.2	0.029	8.3	0.058
Right thigh	0.103	5.3	0.546	3.2	0.330
Right calf	0.043	3.1	0.133	3.4	0.146
Right foot	0.015	1.2	0.018	3.8	0.057
Left thigh	0.103	6.9	0.711	2.2	0.227
Left calf	0.043	7.8	0.335	1.2	0.052
Left foot	0.015	9.4	0.141	2.2	0.033
	1.000		Sum of moments = 6.478		Sum of moments = 4.408

- **整個人體重量合計**應為 **1 個單位**。
- **整個人體**沿 **x 軸**及 **y 軸**的**力矩**應分別**等於**身體**各部分**沿 **x 軸**及 **y 軸力矩**的**總和**。

設 **x** 為人體重心離 **y 軸**距離，
y 為人體重心離 **x 軸**距離。

1x = 6.478

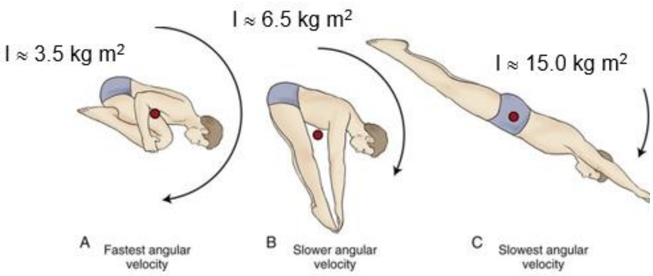
x = 6.478 cm

1y = 4.408

y = 4.408 cm

四、 轉動慣量（Moment of Inertia，I）

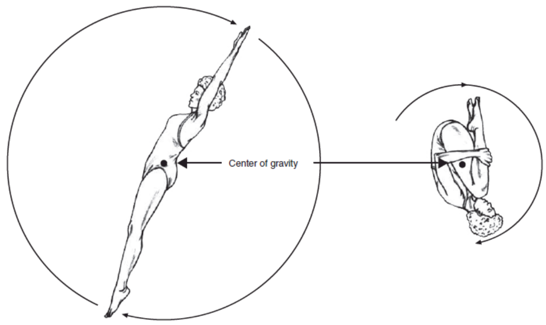
- 是物體對於**改變**其**旋轉運動**所產生的**阻力**。
- 取決於物體的**質量**及其圍繞**旋轉軸**的**分佈**情況。



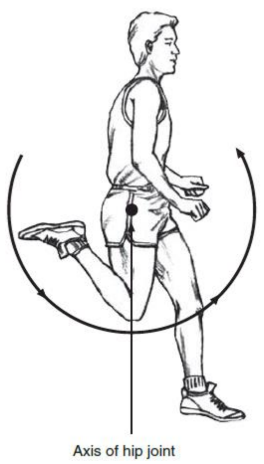
轉動慣量 = $\sum mr^2$

- **m** 及 **r** 分別為物體內**個別微粒**的**質量**及距離**轉軸**的**半徑**。
- 物體的**質量越大**，**轉動慣量越大**。
- 質量**離軸心越遠**，產生的**轉動慣量越大**。
- 物體內所有質量分佈**越靠近軸心**，**轉動慣量越小**，**旋轉速度越快**。
  - ➢ r **增加**至**原來**的 **2 倍**時，**轉動慣量**變為**原來**的 **4 倍**；
  - ➢ r **減少**至**原來**的$\frac{1}{2}$時，**轉動慣量**只是**原來**的$\frac{1}{4}$。
- 在運動中**減低轉動慣量**以**加快轉速**的例子：

1. **跳水運動員**抱膝摺疊上身以**減小轉動慣量**及**加快轉速**。



2. **跑步運動員**後摺小腿以**減小轉動慣量**及**加快轉速**。



計算腿部以髖關節為軸心的轉動慣量

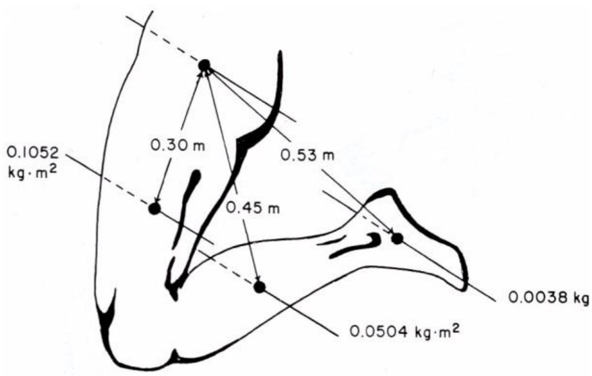
- 先根據**已知**的**數據**找出腿部**各部分**（大腿、小腿、足部）的**轉動慣量**。

TABLE 6-4 Moments of Inertia of Selected Body Segments about Transverse Axes through Their Centers of Gravity

Segment	*Moment of Inertia (kg·m²)*
Head	0.0248
Trunk	1.2606
Upper arm	0.0213
Forearm	0.0076
Hand	0.0005
Thigh	0.1052
Calf	0.0504
Foot	0.0038

Source: Adapted from Whitsett, C. E. (1963). *Some Dynamic Response Characteristics of Weightless Man*, (p. 11). AMRL Technical Documentary Report 63–70. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: AMRL.

- 假設人的體重為 **70 千克**，再配合**表 6-1** 的數據，以**髖關節**為**軸心**轉動時，下肢**各部分**的**轉動慣量**：



I_{thigh}
$= I_{CG} + md^2$
$= 0.1052 + (7.21)(0.3)^2$
$= 0.7541\ kg\bullet m^2$

I_{calf}
$= I_{CG} + md^2$
$= 0.0504 + (3.01)(0.45)^2$
$= 0.6599\ kg\bullet m^2$

I_{foot}
$= I_{CG} + md^2$
$= 0.0038 + (1.05)(0.53)^2$
$= 0.2987\ kg\bullet m^2$

I
$= I_{thigh} + I_{calf} + I_{foot}$
$= 0.7541 + 0.6599 + 0.2987$
$= 1.7127\ kg\bullet m^2$

備註：

- 從計算可見，跑步時小腿越能夠**摺近臀部**，就越能夠**減少 d** 的**數值**（0.45 及 0.53），也就能夠**減少**了小腿及足部的**轉動慣量**，使腿部的**轉速加快**。

五、角動量（Angular Momentum，H）

- 一個旋轉中物體的**角動量** = **轉動慣量** × **角速度**。

$$H = I\omega$$

- 要**增加角動量**，可以
  1. **增加**物體的**質量**（$I = \sum mr^2$）。
     - ➢ 如採用較重的球拍或球棒。
  2. **盡量**把物體的**質量遠離轉軸**（$I = \sum mr^2$）。
     - ➢ 如展開身體、採用較長的球拍或球棒，或採用重量集中在頂端的球拍或球棒。
  3. **增加**物體轉動的**角速度**。
     - ➢ 如加快轉體或以更快的速度揮拍或揮棒。

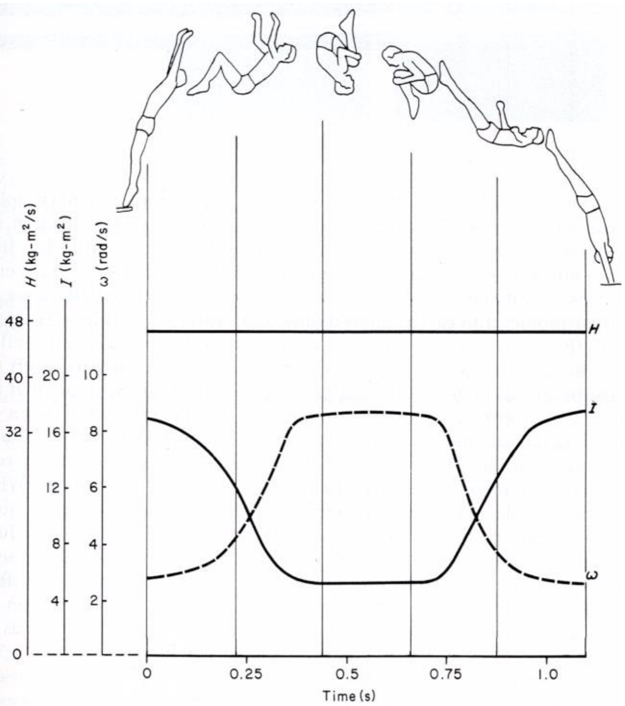
六、角運動的牛頓定律

1. **牛頓第一角運動定律**
   - 旋轉的物體會圍繞**軸心**旋轉，並以**恆角動量**保持運動狀態，除非有**外力**作用於物體才可**迫使**其**改變**這種狀態。

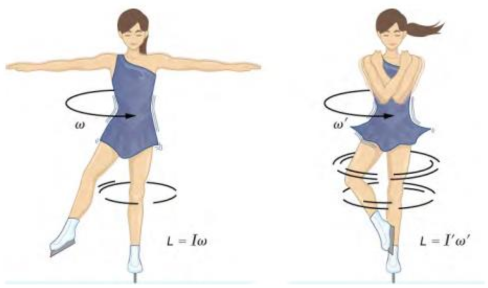
- **角動量守恆**（Conservation of Angular Momentum）
  - 在**跳高**、**跳遠**、**跳水**、**彈網**、**體操**等項目，運動員起跳離地後，便**沒法子**再**改變**其**角動量**。
  - 運動員在**起跳時**獲得的**角動量**，在空中**短暫**「飛行」時**保持不變**。
    - **空氣阻力**的影響只是**微乎其微**，可以忽略。
  - 運動員要改變飛行時的**角速度**，就只有透過**改變**身體**質量**的**分佈**（也就是**改變姿勢**，如展開身體或摺疊身體以**增加**或**減少轉動慣量**）。
    - 運動員**無法改變**自己的**質量**，只可透過**改變身體姿勢**來**改變**身體**質量**的**分佈**。

例子一：**跳水運動員**可以透過**改變**空中的**身體姿勢**來

- **增加轉動慣量**以**降低角速度**。
- **減少轉動慣量**以**增加角速度**。



例子二：**花樣滑冰運動員**也是透過**打開雙臂**或**雙臂抱緊上身**來**改變轉速**。



2. **牛頓第二角運動定律**

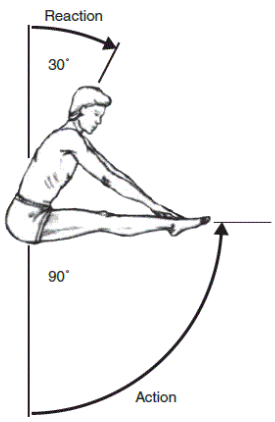
- 物體的**角加速度**與物體所受的**轉矩**成**正比**，其**方向**跟**轉矩**的**方向相同**。

$$T = I\alpha$$

3. **牛頓第三角運動定律**

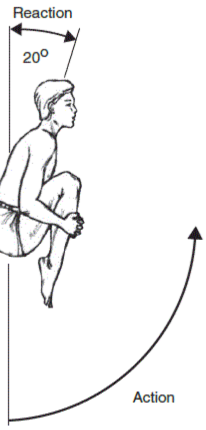
- 每一個物體的**轉矩**必然會對另一個物體產生一個**大小相等**，但**方向相反**的**轉矩**。

例子一



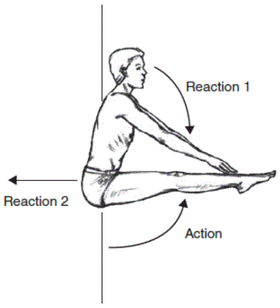
備註：由於上身的轉動慣量約為雙腿的 3 倍，所以運動員向上抬腿 90° 時，上身只會向下移動 30°。

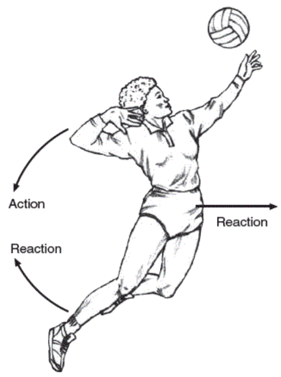
例子二

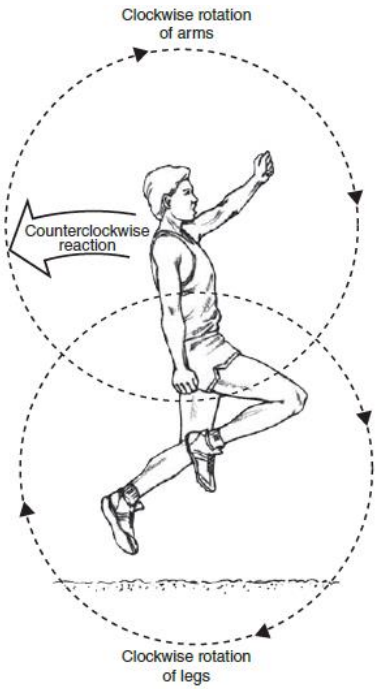


備註：由於運動員抱膝抬腿時的轉動慣量較小，所以上身向下移動的角度也變小。

其他例子





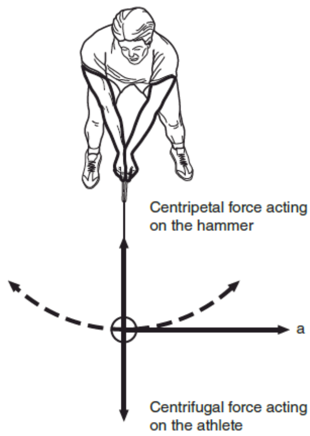


七、向心力和離心力

- 但凡有**角運動**，**慣性**、**向心力**和**離心力**都會**無時無刻**在角力。
- **慣性**促使**移動中**的物體繼續進行**直線運動**。
- 要把**直線運動**中的物體轉為**圓周運動**（circular motion），就要**不斷有**把物體**拉**或**推**向**旋轉軸心**的**向心力**（centripetal force）。

例子：擲鏈球

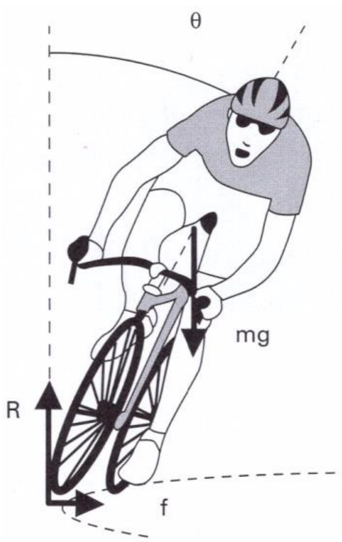
- 擲鏈球運動員用力旋轉鏈球的時候，鏈球的**慣性**驅使其繼續進行**直線運動**，運動員要鏈球進行**圓周運動**，就得**施力**把鏈球**拉向轉軸**，讓這鼓**向心力**把鏈球的直線運動改變為圓周運動。與此同時，運動員亦會感受到被鏈球**拉離轉軸**的**離心力**（centrifugal force）。



- 向心力 $F = \frac{mv^2}{r}$ 或 $F = m\omega^2 r$，（$v = \omega r$）
  - **轉速加倍**的時候，**向心力**是原來的 **4 倍**。
  - 鏈球出手時，會循 **a** 方向以**直線**飛行（因為已經再**沒有向心力**的作用）。
  - 除了**拉力**的形式外，在賽車、短跑、速度滑冰等項目，**摩擦力**亦可提供所需的**向心力**。

向心力和離心力的計算例子

假設 h 為重心離地面的垂直高度，a 為法向力 R 與重心的垂直距離，r 為彎道的半徑，v 為單車的線性速度。



$f \times h = R \times a$

由於 $R = mg$，而進行圓周運動時，$f = \dfrac{mv^2}{r}$。

$\therefore \dfrac{mv^2}{r} \times h = mg \times a$

$\dfrac{v^2h}{r} = ga$

$\dfrac{v^2}{gr} = \dfrac{a}{h}$

$\because \tan\theta = \dfrac{a}{h}$

$\therefore \tan\theta = \dfrac{v^2}{gr}$

備註：當 $f < \dfrac{mv^2}{r}$ 時，就會出現**滑胎**的情況。

乙、人體動作的類別

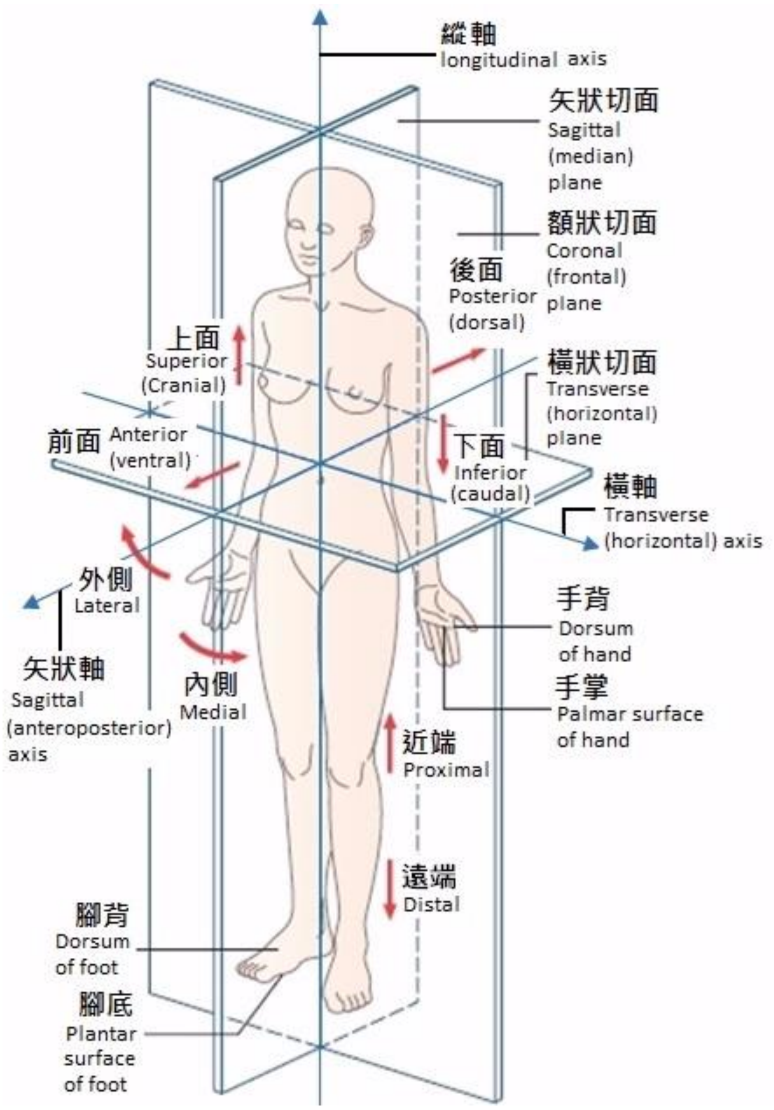
壹、人體解剖姿勢

- 「**人體解剖姿勢**」（anatomical position）是指
  - 人體**直立**、
  - 兩足相距**肩膊闊度**、
  - 腳趾**指前**、
  - 手放**兩側**、
  - 手心**向前**的**站立**形態。
- 有了這套「**準則**」後，在描述人體結構和他們的位置時，就可避免了許多不必要的混淆。

貳、描述人體活動的平面、軸線及辭彙

一、空間和方向的辭彙

- **前面**（anterior）：接近身體**前方**。
- **後面**（posterior）：接近身體**後方**。
- **上面**（superior）：接近**頭部**。
- **下面**（inferior）：接近**足部**。
- **內側**（medial）：**靠近**人體中線。
- **外側**（lateral）：**遠離**人體中線。
- **近端**（proximal）：**接近**人體軀幹。
- **遠端**（distal）：**遠離**人體軀幹。
- **表面**（superficial）：**接近**皮膚。
- **深層**（deep）：**遠離**皮膚。



二、活動平面

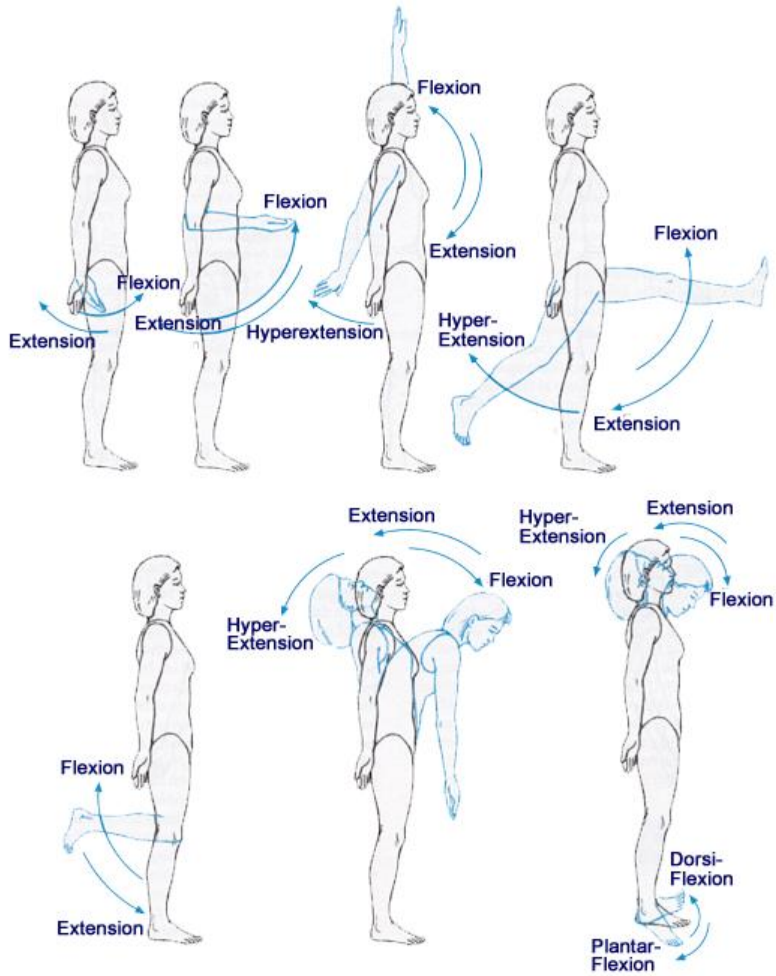
- **矢狀切面**（sagittal/median plane）：
  把人體分成**左**、**右**的平面。
- **額狀切面**（coronal/frontal plane）：
  把人體分成**前**、**後**的平面。
- **橫狀切面**（transverse/horizontal plane）：
  把人體分成**上**、**下**的平面。

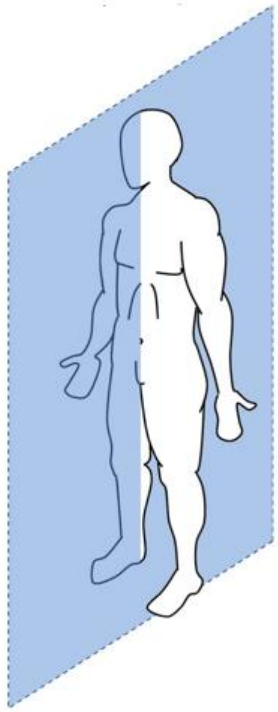
三、迴旋

- **矢狀軸**（sagittal/anteroposterior axis）：
  前後穿過人體、與**額狀切面垂直**的軸線。
  - ➢ **額狀切面**的**迴旋**動作圍繞**矢狀軸**進行，例如外展、內收、側手翻等。
- **橫軸**（transverse/horizontal axis）：
  左右穿過人體、與**矢狀切面垂直**的軸線。
  - ➢ **矢狀切面**的**迴旋**動作圍繞**橫軸**進行，例如屈曲、伸展、前滾翻等。
- **縱軸**（longitudinal axis）：
  上下穿過人體、與**橫狀切面垂直**的軸線。
  - ➢ **橫狀切面**的**迴旋**動作圍繞**縱軸**進行，例如旋前、旋後、轉體等。

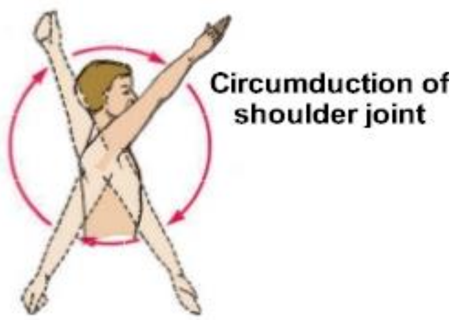
四、描述人體活動的辭彙

1.　矢狀切面的活動





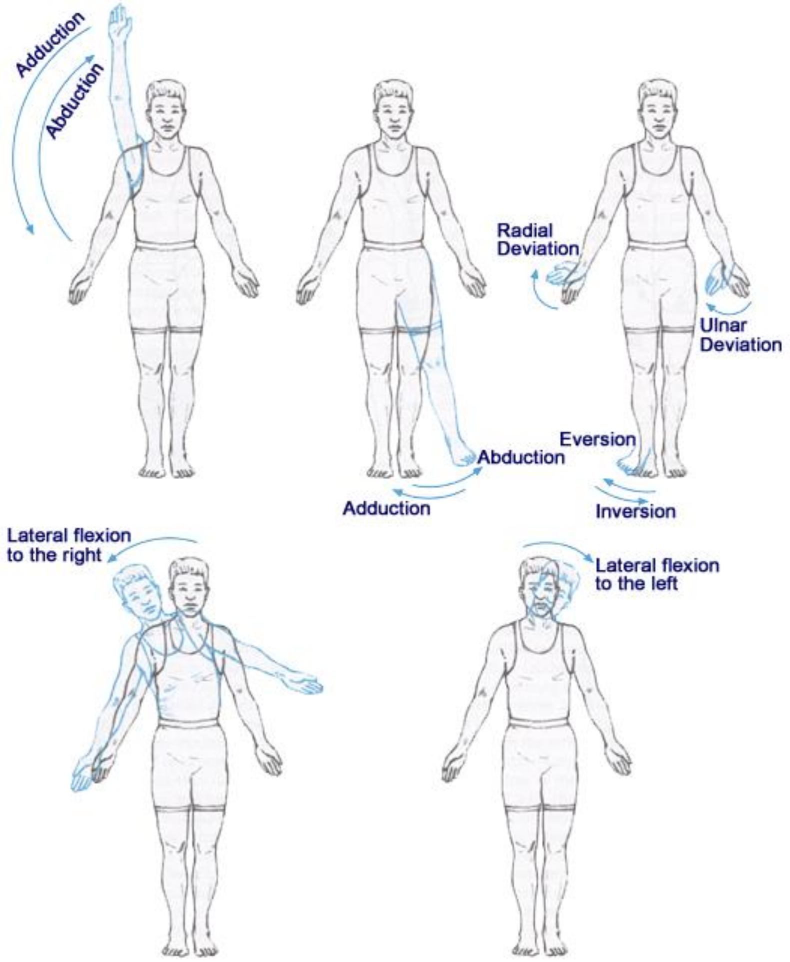
- **屈曲**（flexion）：使人體兩個身體部分的角度**減少**。
- **伸展**（extension）：使人體兩個身體部分的角度**增加**。
- **過度伸展**（hyperextension）：使人體兩個身體部分的角度**增加超過 180˚**。
- **足背屈**（dorsiflexion）：足**向著**腳背方向**屈曲**。
- **足蹠屈**（plantarflexion）：足**遠離**腳背方向**伸展**。
- **環動**（circumduction）：肢體的**環形**運動。

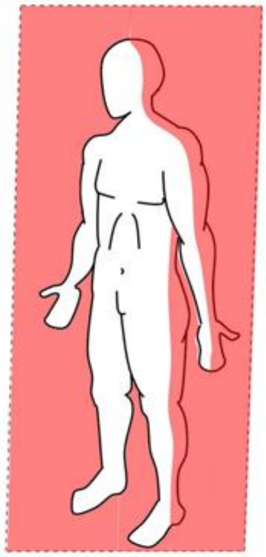


備註：

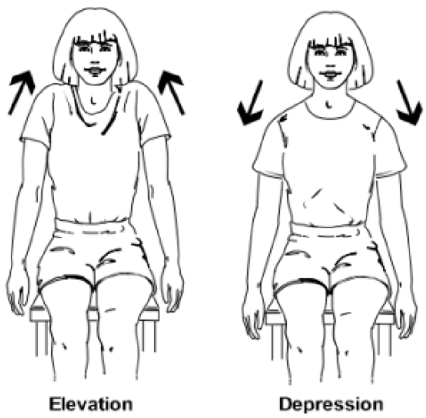
- **減少**連接關節的骨間角度就會構成**屈曲**動作，引致**屈曲**動作發生的肌肉稱為**「屈肌」**，如前肢上舉觸摸肩部時，**肱二頭肌**就是**「屈肌」**。
- **增加**連接關節的骨間角度就會構成**伸展**動作，構成**伸展**動作的肌肉稱為**「伸肌」**，如人體從「坐下」變成「站立」時，**股四頭肌群**就是**「伸肌」**。

2. 額狀切面的活動





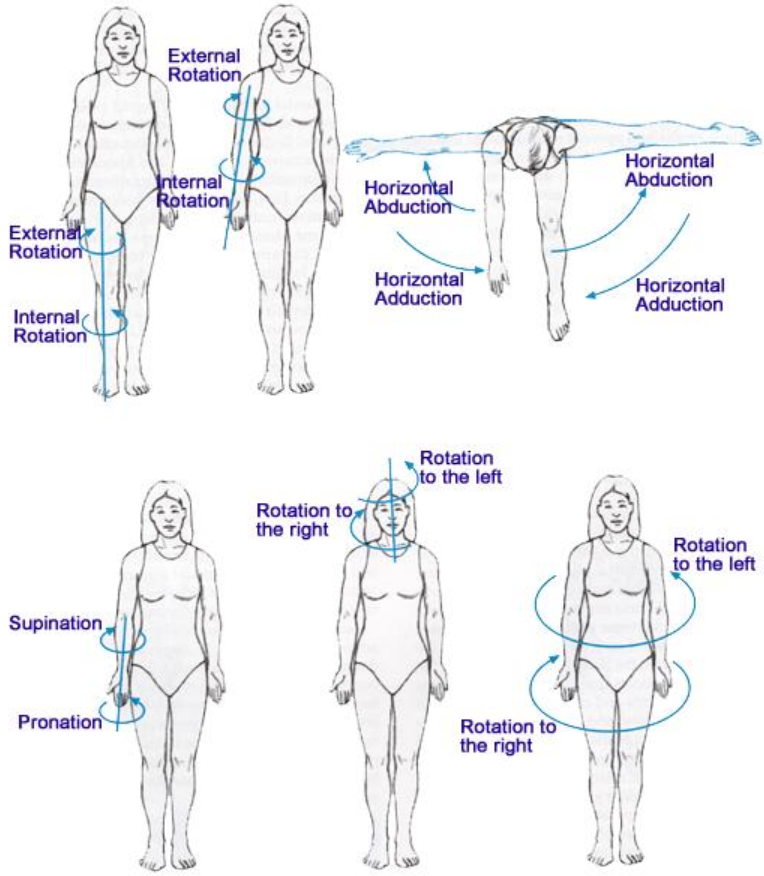
- **外展**（abduction）：**離開**身體中線。
- **內收**（adduction）：**靠近**身體中線。
- **偏向橈骨**（radial deviation）：手腕向**拇指**方向移動。
- **偏向尺骨**（ulnar deviation）：手腕向**小指**方向移動。
- **外翻**（eversion）：足向**外翻**。
- **內翻**（inversion）：足向**內翻**。
- **側屈**（lateral flexion）：向側邊**屈曲**。
- **上提**（elevation）：**向上**提起。
- **下壓**（depression）：**向下**放低。

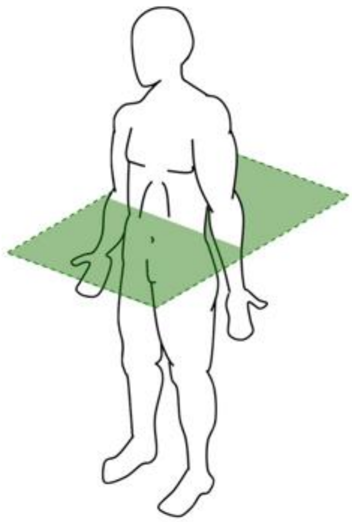


備註：

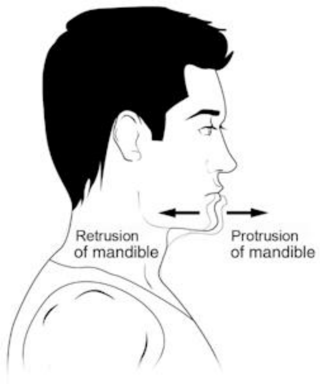
- **外展**是指將肢體**移離**身體**中線**的動作，例如將手臂置於身體兩側，並向上舉高。
- **內收**是指將肢體**移向**身體**中線**的動作，例如將已舉起的手臂，從側面向身體兩側收攏。

3. **橫狀切面的活動**





- **旋前**（pronation）：手掌向**下翻**。
- **旋後**（supination）：手掌向**上翻**。
- **外旋**（external rotation）：**向外**旋轉。
- **內旋**（internal rotation）：**向內**旋轉。
- **伸出**（protrusion）：**向前**伸出。
- **收回**（retrusion）：**向後**收回。



備註：

- 在**肘部**產生的**旋前**動作，涉及**橈骨**和**肱骨**之間的**內旋**，**掌心**從**向上翻轉**至**向下**，完成**旋前**動作。
- 在**肘部**產生的**旋後**動作，涉及**橈骨**和**肱骨**之間的**外旋**，**掌心**從**向下翻轉**至**向上**，完成**旋後**動作。

丙、 表現分析：步驟和指引

壹、動作分析的類別

一、 定性分析（Qualitative Analysis）

- **不**依賴**數據資料**描述動作的特徵和效果。
    - 如探究動作在各個階段的形態、過程中牽涉的關節和肌肉、肌肉收縮的類型等。

二、定量分析（Quantitative Analysis）

- 依賴**數據資料**描述動作的特徵和效果。
    - 如探究動作的關節活動範圍、角度、速度、張力等。

貳、 採用科學方法

一、科學態度

- 科學探究從**求真**的精神出發，建基於**證據**，並以**事實經驗**為準則；同時也**鼓勵創新**及**存疑**精神。

二、科學思維

- 科學知識建基於創意思維，科學家運用**演繹法**（deduction）及**歸納法**（induction），提出新的科學理論，再加以驗證。
- 科學知識縱然源遠流長，卻**不是**永恆不變的。

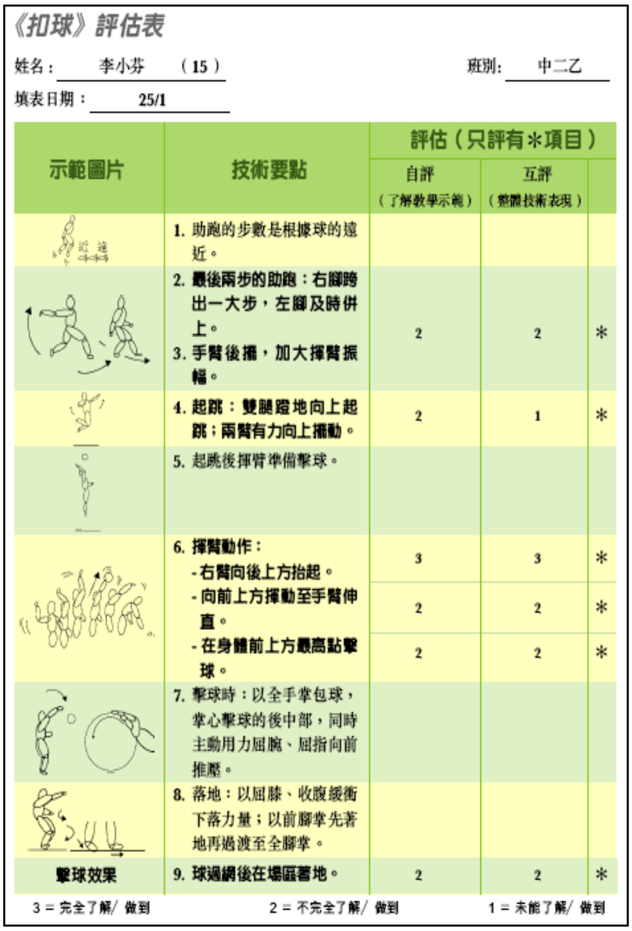
三、科學實踐

- 科學家以精確的**研究設計**和合適的**儀器**，探索現象或驗證理論；謹慎處理定量和定質的數據，**誠實**匯報結果。

參、動作分析要領

一、檢視動作

- 在**各個階段**的**形態**（以下表中的「技術要點」部分為例）。



《扣球》評估表

姓名：李小芬　（15）　　班別：中二乙

填表日期：25/1

示範圖片	技術要點	評估（只評有＊項目）		
		自評（了解教學示範）	互評（整體技術表現）	
	1. 助跑的步數是根據球的遠近。			
	2. 最後兩步的助跑：右腳跨出一大步，左腳及時併上。 3. 手臂後擺，加大揮臂振幅。	2	2	＊
	4. 起跳：雙腿蹬地向上起跳；兩臂有力向上擺動。	2	1	＊
	5. 起跳後揮臂準備擊球。			
	6. 揮臂動作： -右臂向後上方抬起。	3	3	＊
	-向前上方揮動至手臂伸直。	2	2	＊
	-在身體前上方最高點擊球。	2	2	＊
	7. 擊球時：以全手掌包球，掌心擊球的後中部，同時主動用力屈腕、屈指向前推壓。			
	8. 落地：以屈膝、收腹緩衝下落力量；以前腳掌先著地再過渡至全腳掌。			
擊球效果	9. 球過網後在場區著地。	2	2	＊

3 = 完全了解／做到　　2 = 不完全了解／做到　　1 = 未能了解／做到

- **肌肉收縮類型**（如**向心收縮**、**離心收縮**或**等長收縮**等）。

- **涉及**的**關節**和**肌肉**（見下圖）。

踢球是矢狀切面上的動作，涉及髖、膝和踝三個關節，可分為準備和踢球兩個階段：

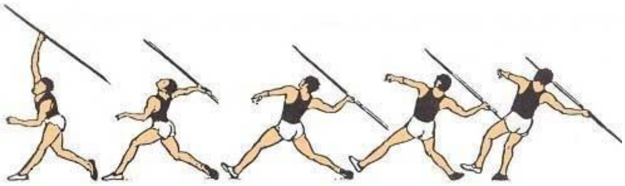
準備階段

關節	動作	主動肌
髖	伸展	臀肌（臀大肌與臀小肌）
膝	屈曲	膕繩肌（即股二頭肌、半膜肌和半腱肌）
踝	蹠屈	小腿三頭肌

踢球階段

關節	動作	主動肌
髖	屈曲	髂腰肌
膝	伸展	股四頭肌
踝	蹠屈	小腿三頭肌

- **關節活動範圍**和**速度**（見下表中 1995 年世界田徑錦標賽標槍賽事獲獎運動員標槍出手時各關節的角度）。



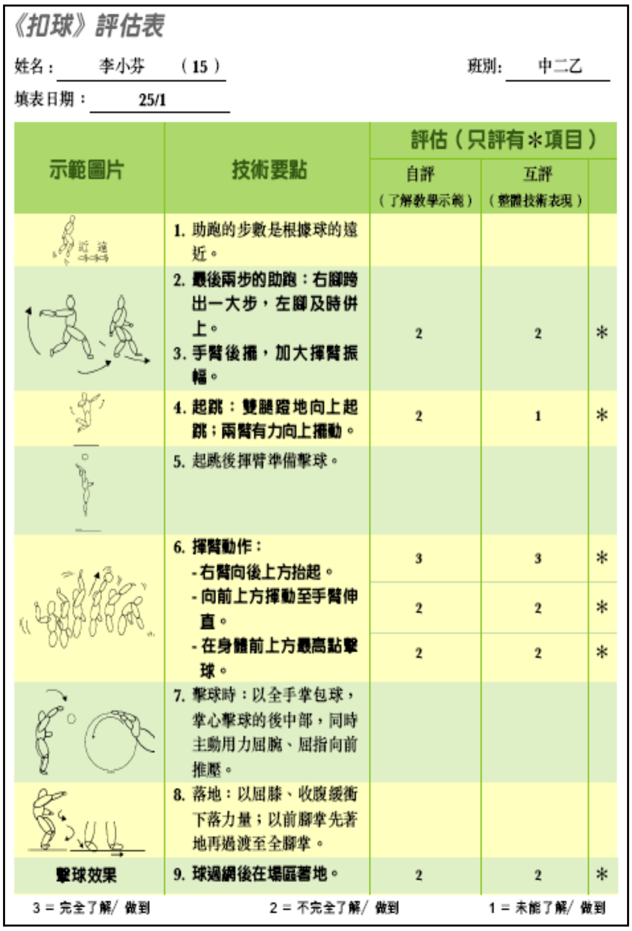
	標槍出手時各關節的角度		
	髖關節	肘關節	肩關節
金牌選手	59°	170°	55°
銀牌選手	59°	147°	45°
銅牌選手	70°	154°	59°

二、量化觀察

- 既量化過程，也量化效能（見下表）。

運動員	速度（公里/小時）	步頻（次/分鐘）	速度（公里/小時）	步頻（次/分鐘）	速度（公里/小時）	步頻（次/分鐘）
A	12	171	14	177	16	183
B	12	174	14	178	16	182
C	12	182	14	188	16	194
D	12	176	14	181	16	187
E	12	177	14	180	16	186

- 運用**動作量表**，系統地進行**觀察**（見下圖）。



《扣球》評估表

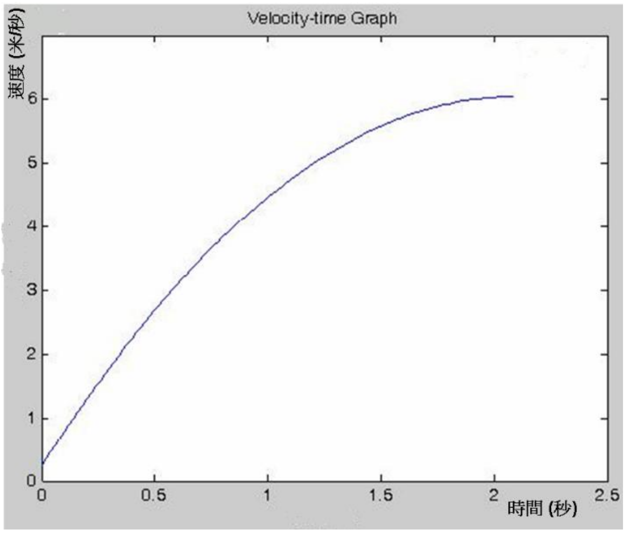
姓名：李小芬（15）　　班別：中二乙

填表日期：25/1

示範圖片	技術要點	評估（只評有＊項目）自評（了解教學示範）	互評（整體技術表現）	
	1. 助跑的步數是根據球的遠近。			
	2. 最後兩步的助跑：右腳跨出一大步，左腳及時併上。3. 手臂後擺，加大揮臂振幅。	2	2	＊
	4. 起跳：雙腿蹬地向上起跳；兩臂有力向上擺動。	2	1	＊
	5. 起跳後揮臂準備擊球。			
	6. 揮臂動作：-右臂向後上方抬起。	3	3	＊
	-向前上方揮動至手臂伸直。	2	2	＊
	-在身體前上方最高點擊球。	2	2	＊
	7. 擊球時：以全手掌包球，掌心擊球的後中部，同時主動用力屈腕、屈指向前推壓。			
	8. 落地：以屈膝、收腹緩衝下落力量；以前腳掌先著地再過渡至全腳掌。			
擊球效果	9. 球過網後在場區著地。	2	2	＊

3 = 完全了解/ 做到　　2 = 不完全了解/ 做到　　1 = 未能了解/ 做到

- 運用**科技**，**蒐集**精確的**觀察值**，如速度、角度、張力等（見下圖）。



三、動作比較

- **模擬：探究**不同動作的效能。
- **模仿：**參考**高水平**運動員的動作，進行**調整**（見下表）。

	標槍出手時各關節的角度		
	髖關節	肘關節	肩關節
金牌選手	59°	170°	55°
銀牌選手	59°	147°	45°
銅牌選手	70°	154°	59°

第三部分重要公式及數字一覽

1. **平均速率** = $\dfrac{\text{距離}}{\text{時間}}$

2. **平均速度** = $\dfrac{\text{位移}}{\text{時間}}$

3. **平均加速度** = $\dfrac{\text{最終速度} - \text{初始速度}}{\text{時間}}$

4. **重力加速度**

   $g = 9.8$ 米/秒 ^{2}

5. **重量** = **質量** × **g**　　[g = 9.8 米/秒 ^{2}]

   $W = mg$

6. **牛頓第二定律**

   力 = **物體質量** × **加速度**

   $F = ma$ 或 $a = \dfrac{F}{m}$

7. **動量** = **質量** × **速度**

   $= mv$

8. **衝量** = **力** × **時間**

   $= Ft$

9. **動量和衝量的關係**

   衝量 = **動量**的**改變**

   $Ft = m \cdot \Delta v$　　[Δv 是速度上的改變，所以 $m \cdot \Delta v$ 就是動量的改變]

10. **平均角速率** = $\frac{\text{角距離}}{\text{時間}}$

11. **平均角速度** = $\frac{\text{角位移}}{\text{時間}}$

12. **平均角加速度** = $\frac{\text{最終角速度} - \text{初始角速度}}{\text{時間}}$

13. **瞬時線性速度** = **瞬時角速度** × **半徑**

    $V = \omega r$

14. **力矩** = **作用力** × **支點到力作用線的垂直距離**

    $\tau = Fd$

15. **轉動慣量** = $\sum mr^2$　　[m 及 r 分別為物體內**個別**微粒的質量及距離轉軸的半徑]

    $I = \sum mr^2$

16. **角動量** = **轉動慣量** × **角速度**

    $H = I\omega$

17. **牛頓第二定律**

    轉矩 = **轉動慣量** × **角加速度**

    $T = I\alpha$

18. **向心力**

    $F = \frac{mv^2}{r}$ 或 $F = m\omega^2 r$　　[$v = \omega r$]