

中華民國第 41 屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科學（一）科

組 別：國中組

作品名稱：跳躍科技—自製測力板並探索跳躍
高度的關鍵因素

關 鍵 詞：測力板、體重計、自由落體公式

編 號：112JA-I002

摘要

這個科展項目旨在利用自製的測力板計算出人們跳躍的高度、滯空能力等數據，以了解跳躍時身體姿勢和力量的影響，進而找到最佳的跳躍方式和技巧，並減少膝蓋的負擔。為了達成這個目標，我們運用簡單的材料和自由落體的公式、牛頓第二、三運動定律的原理來改良體重計，並探討體重計內部的荷重元、應變片和惠斯通電橋等元件的作用原理。透過這項研究，人們可以更加了解身體在跳躍時的表現和姿勢，提升跳躍成績，同時也有助於減少跳躍過程中對身體的傷害。

壹、研究動機

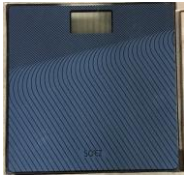

我們很喜歡跳躍，好勝心會讓我想要和對方一較高下，看誰跳的比較高，不過"比跳躍"這種事情常常因為身高的關係而讓比賽不公平。在尋找科展題目時就突然想到這件事，是否能利用機器較精準的數據了解自己的跳躍高度、速度、滯空能力.....等，並且能利用少許的錢就能做到精準和便宜。

貳、研究目的

考慮市價上的測力板大約在 75000~80000 元新台幣，所以我們決定用簡單的材料做出能計算出跳躍高度的測力板。我們希望改良體重計後利用自由落體公式計算跳躍高度、落地緩衝的時間。有了這些數據後我們就能探討人在跳躍時的重量變化、膝蓋彎曲角度對於跳躍高度的影響，以致於我們能知道跳躍時如何用最好的姿勢與力量跳出最高、最能減緩膝蓋的負擔。

參、研究設備與器材

一、本研究所使用的各項器材整理如下表。

| 圖片 | 名稱 | 功能 | 數量 |
|---|-------------------------|----------------|-----|
|  | 體重計 | 測量體重變化的機器 | 1 個 |
| 上面  | 木板 (50cmx50cmx1.8cm) | 固定體重計和加大安全跳躍空間 | 2 片 |

| | | | |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|------------|
| <p>下面最大的那塊</p>  | <p>木板 (30cmx30cmx1.2cm)</p> | <p>固定體重計和加大安全跳躍空間</p> | <p>1 片</p> |
|  | <p>Wio Terminal</p> | <p>用於整理、計算及顯示資料以及代替 Arduino 之功能</p> | <p>1 個</p> |
|  | <p>電線 (1m)</p> | <p>短距離傳送訊息、資料</p> | <p>1 條</p> |
|  | <p>麵包板</p> | <p>啟動 HX711</p> | <p>1 個</p> |
|  | <p>三用電錶</p> | <p>一種多功能電測量儀器，可用於測量電壓、電流和電阻</p> | <p>1 個</p> |
|  <p>圖片來源： https://shopee.tw/%E9%9B%BB%E8%A9%B1%E7%B7%9A-%E5%82%B3%E7%9C%9F%E6%A9%9F%E7%B7%9A-6P4C-5%E7%B1%B3-10%E7%B1%B3-15%E7%B1%B3-i.5421723.7140553968</p> | <p>電話線 (3m)</p> | <p>長距離傳送訊息、資料</p> | <p>1 條</p> |

| | | | |
|---|-------------|-------------------|-----|
|  <p>圖片來源： https://sg.rs-online.com/web/p/ethernet-connectors/3316342</p> | RJ11 (6P4C) | 連接電話線和 RJ11 插座的工具 | 2 個 |
| <p>圖 片 來 源：</p>  <p>chinese.alibaba.com/product-detail/RJ11-4P4C-Telephone-Socket-4pin-Female-60613248179.html</p> | RJ11 插座 | 連接電話線和電線的工具 | 2 個 |

二、本研究所使用的軟體程式分別為 Arduino 與網路量角。

肆、研究背景

在體重計的內部構造中，首先我們要先認識最重要的大零件——荷重元，沒了它就無法偵測體重，故下列將說明荷重元的內部貼合器及其相關原理。

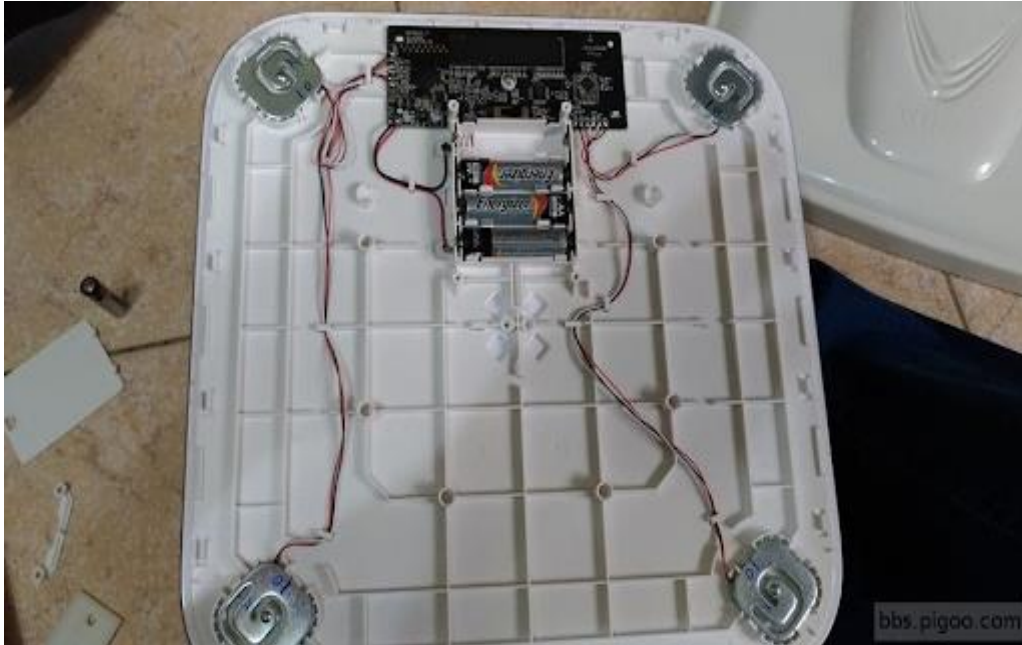


圖 1 體重計內部結構

(圖片來源：<https://bbs.pigoo.com/thread-69674-1-1.html>)

一、惠斯通電橋

荷重元是一種測試力量的感測器。應變片是荷重元裡的零件。應變片在正常測量時形變是非常小的，輸出端的電阻變化微乎其微，直接測量應變片的輸出端是無效的，所以通常都需要用惠斯通電橋的電路把應變片電阻的變化轉換成電壓後再進行放大。(資料來源 <https://www.youtube.com/watch?v=zAu-K6dYj4M>)



圖 2 荷重元

二、應變片

荷重元裡的應變片是一種用來測量物體應變的測試工具，主要是由絕緣基片與金屬敏感柵所組成。當被測部件受外力變形時，敏感柵也隨之變形，因此敏感柵的電阻值產生相應的變化。而通過惠斯通電橋可以測量到這個微小的阻值變化量。(資料來源

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%BA%94%E5%8F%98%E7%89%87>)

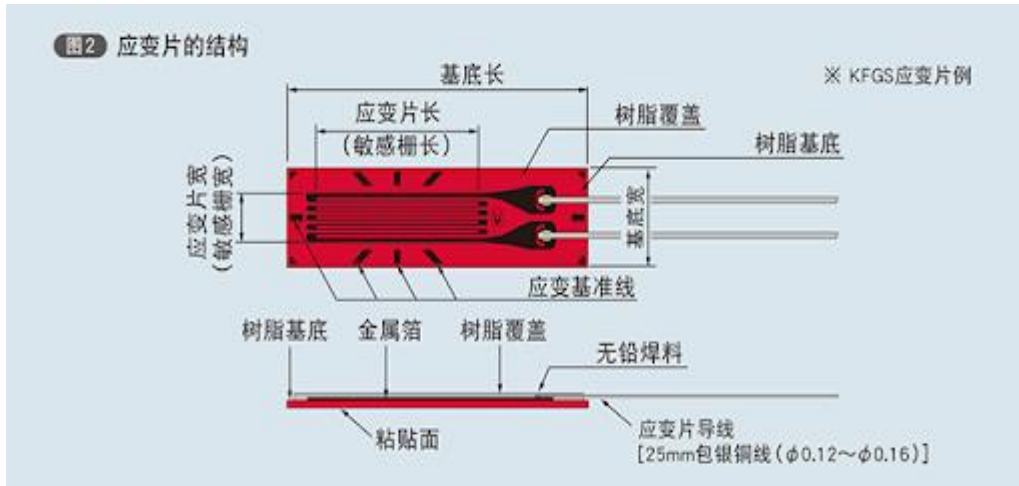


圖 3 應變片的結構

(圖片來源 https://www.kyowa-ei.cn/chi/technical/strain_gages/principles.html)

三、體重計之電路圖與應用理論

接下來介紹惠斯通電橋和公式，這是荷重元連接到體重計的電路圖。

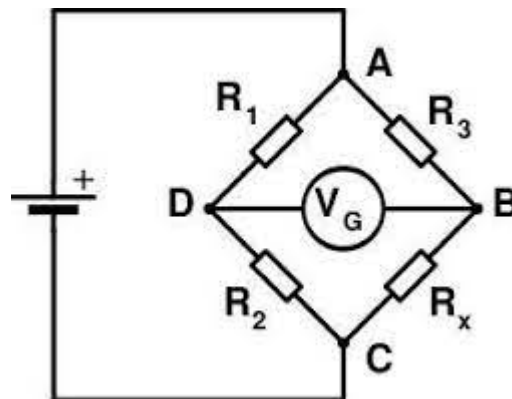


圖 4 惠斯通電橋電路圖

(圖片來源 <https://kknews.cc/tech/12jkg9.html>)

從圖 4 可知通常惠斯通電橋由四個電阻組成。如果知道了四個電阻的值和電源的電壓 (V_s)，則可以算出每一個分壓器的電壓，並透過計算公式： $V_g = (R_x / R_3 + R_x) -$

$(R2/R1+R2) * Vs$ ，來得出電橋兩端的電壓 (Vg)。體重計的荷重元就是靠惠斯通電橋計算出物體的重量。

我們把自由落體、牛頓第二、三運動定律的原理及公式套在 Arduino 程式裡。自由落體的公式可計算出人在飛行時的滯空距離。牛頓第二運動定律的原理可知為何荷重元能感受重量感變、而荷重元利用公式計算出施加在它上面的力的大小，把力轉換為重量壓力。牛頓第三運動定律的原理可得知對地板的施加力越大，跳的越高，而且重心所造成的反彈力也是如此。

自由落體公式是描述在重力作用下物體自由下落運動的數學公式，可以用於計算物體下落的速度和時間。

自由落體公式為： $d = 1/2 * g * t^2$ ，其中

d 表示物體自由下落的距離

g 表示地球的重力加速度，通常取 9.8 公尺/秒^2

t 表示物體下落的時間。

根據上述公式可以得到物體下落的速度公式： $v = g * t$ 其中， v 為物體下落速度。需要注意的是，上述公式只適用於物體在真空中下落的情況，如果物體有空氣阻力或其他阻力存在，實際下落速度和時間會有所不同。

牛頓第二運動定律，描述了物體的運動和施加在它們上面的力之間的關係。當施加在一個物體上的力增加時，物體的加速度也會增加。當物體的質量增加時，同樣大小的力會產生較小的加速度。公式為 $F = ma$ ， F 是施加在物體上的力， m 是物體的質量， a 是物體的加速度。一個物體的加速度與施加在它上面的力成正比，並與物體的質量成反比。一個物體的質量越大，施加同樣大小的力時它的加速度就越小；反之亦然。

測力器通常包含一個靜止的底座和一個連到底座上的可移動部件。當外部力施加到可移動部件上時，該部件會受到加速度，根據牛頓第二運動定律，這個加速度與施加的力成正比。測力器的靈敏元件（例如荷重元）會測量可移動部件的加速度，從而計算出施加在它上面的力的大小。因此，測力器通常可以用來測量施加在物體上的力的大小，並且可以將這個力的大小轉換為重量、壓力或其他相關的物理量。

牛頓第三運動定律，指對於任何一個物體，當它與另一個物體相互作用時，第一個物體施加在第二個物體上的力，與第二個物體施加在第一個物體上的力，具有相等的大小和相反的方向。簡單來說：作用力與反作用力大小相等，方向相反。

圖 5 是一張人類跳躍時的動作與測力板偵測力量之關係圖，A 部分是人站上測力板時的重量 > B 部分開始蹲下，這時重量會往下降。其原因為在蹲下期間，人的重心在上 > C 部分是腳往下發力期間，所以測力板偵測的重量會急速往上 > F 是人開始滯空的時間，所以力量會急速往下並到 0N 的位置。我們也將實際測量之結果整理如圖 6 所示。

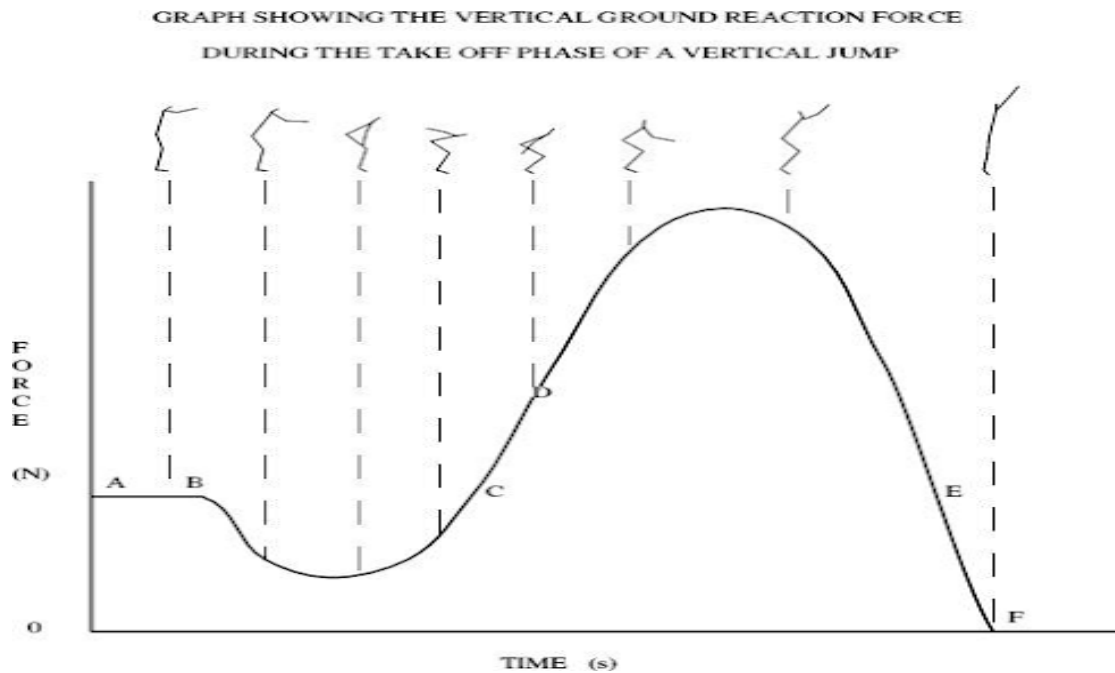


圖 5 跳躍動作與測力板偵測力量的關係圖

(圖片來源 <https://www.unclesam.cc/blog/ground-reaction-force-2/>)

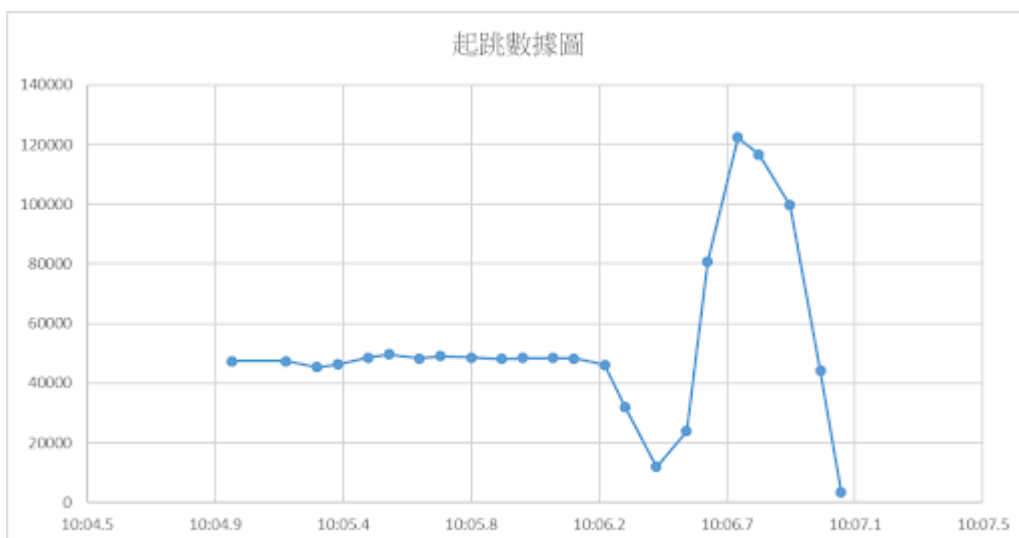


圖 6 跳躍動作與測力板偵測力量的實作關係圖

伍、研究過程及方法

首先，我們使用三用電錶量體重計電路板的電線尋找互相流通的電線，接下來將電線從體重計的電路板剪下（共四個荷重元，每一個荷重元有三條線），如圖 7 所示。

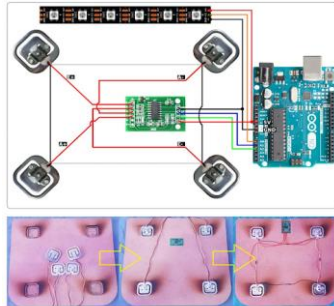


圖 7 體重計之荷重元與電線排列圖

每一個荷重元都有正和負極，將四個荷重元的正負極電線分別接在一起，另外每兩個對角的荷重元分別有訊號輸出線分別為 A+, A-, E+, E-，依序接到 HX711 的對應接收點。再將 HX711 中 GND VCC SCK DT 的電線分別焊接到 RJ11 插座上，用壓線鉗把電話線和 RJ11 壓在一起連接 RJ11 插座並接到 Wio Terminal (Arduino) 的 GND 5V A5 A6 上（圖 8 中分別為 A2、A3）。

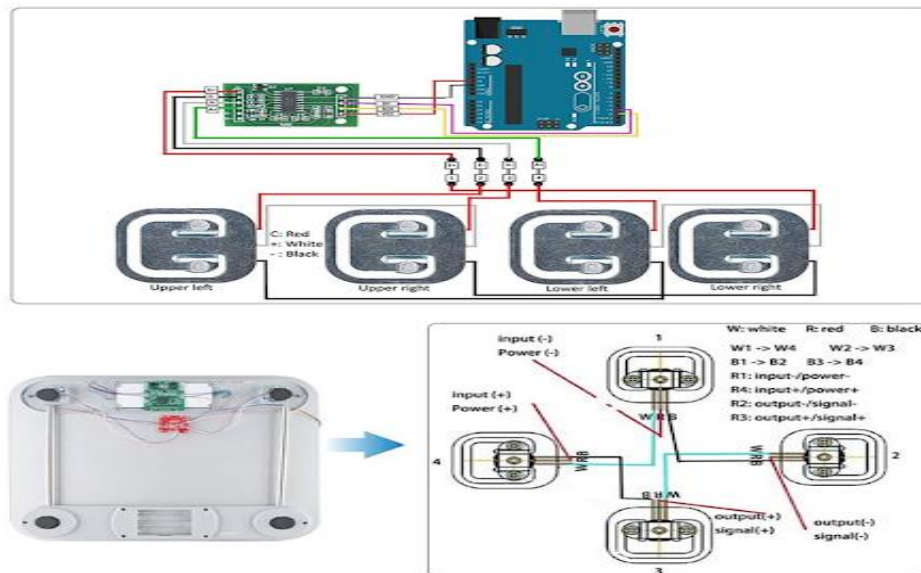
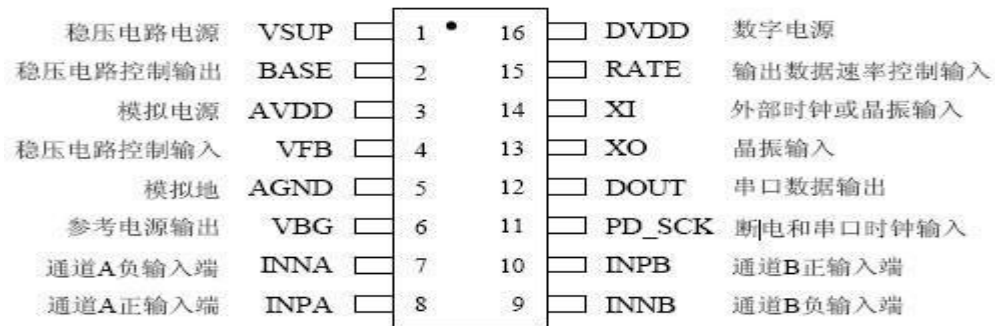


圖 8 荷重元和 HX711 連接關係圖

我們進行實驗時，不免也遇到一些問題。經過多次的討論與測試，也獲得了解決並將其整理如下。

問題一：HX711 讀取採樣頻率太慢，當重量變化快速時會導致數據誤差值變大。

解決方法：我們將 HX711 的兩個接腳（15 16）焊在一起，如圖 10。HX711 的 15、16 腳位連接可提高測量精度和轉換速度，抵消環境干擾信號，短接可減小輸端入口電容，提高反應速度和讀取頻率。



SOP-16L 封装



圖 9 SOP-16L 封装

(圖片來源 m.elecfans.com/article/566982.html)

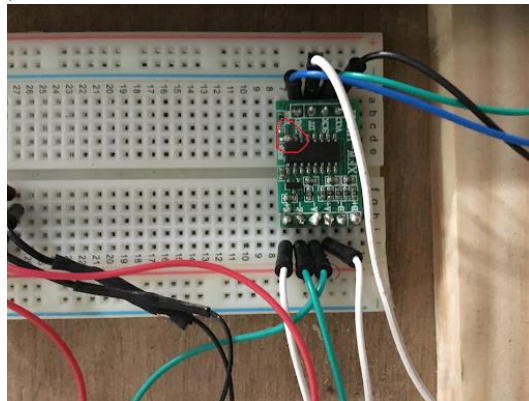


圖 10 焊接後的 HX711

問題二：體重計面寬太窄，導致實驗者會因為心裡因素，擔心跳出體重計外而影響實驗結果。

解決方法：請專業人員幫忙切割木板，我們將切割過後的木板組裝在體重計外圍，以增加體重計面寬，如圖 11。中間是體重計，外圍則是加寬後的木頭。增加面寬後因面積較大，跳躍時比較不會踩到邊緣而跌倒受傷。



圖 11 外圍則是加寬後的體重計

實驗一

1、研究目的：檢查 Arduino 程式是否能準確測量出人在跳躍時的高度，如果否，則校正程式。

2、研究方法：把平板電腦架在測力板前 3 公尺，用平板裡內建相機的錄影功能錄影跳躍時的畫面。把自製尺和手機分別架在測力板旁和平板電腦前 35cm，自製尺可以比對跳躍高度，手機碼錶的功能可計算人在跳躍時的滯空時間，讓平板電腦能清楚錄製到人在跳躍時的高度和時間。比對平板電腦錄製影片的數據和測力板所測出的高度和時間，看測力板測出的數據是否準確。如果不準確就要檢視程式或思考取得跳躍峰值哪裡出問題。



圖 12 實驗一的設備架設

註：

* 角度不會因照片大小而改變，所以在電腦上測量是可以的。

* 本實驗會要求實驗者在每次跳躍時用盡全身最大力氣去跳，確保每次跳躍時力度大約相同，且每次跳完一次時會讓實驗者休息 2~3 分鐘，確保每次跳躍時的體力大致相同（休息時間可因實驗者體力彈性調整，只要讓實驗者不覺得疲勞為主要目標）。

實驗二

1、研究目的：利用自製測力板觀察並測量膝蓋彎曲角度是否和跳躍高度有關。

2、研究方法：把手機架在測力板前 1.8 公尺，讓手機能清楚錄到人在跳躍時的高度。接下來用手機裡內建相機的錄影功能錄影，回放影片時把人在跳躍時的照片截圖傳到電腦上，並利用網路量角器（資料來源：ginifab.com/feeds/angle_measurement/online_protractor.zh-tw.php）量出膝蓋彎曲角度，如圖 13。從數據探討膝蓋彎曲角度是否和跳躍高度的關係並思考為何有關。



圖 13 網路量角器與膝蓋彎曲角度之測量

註：以膝蓋畫一個圓並把原心點設為膝蓋彎曲處，大腿的橘色線條取決於整條大腿的中心線，小腿橘色線條取決於膝蓋彎曲處到踝關節。由於測量出來的角度是量角器的角度，並不是膝蓋彎曲角度，所以要用（ 360° 測量角度）才會是正確的膝蓋彎曲角度。

陸、結果與討論

實驗一

圖 19 為一般跳躍的數據圖，起初我們認為兩個黃點（圖形上峰點到峰點）為起跳點以及落地點（錯誤的），也就是兩峰之間為跳躍滯空時間，但經過正式實驗及攝影對比後，發現實際上滯空時間更接近紅圈區域（正確的）。推測綠點到綠點應該是荷重元沒有負載（跳躍滯空）的表現區間。

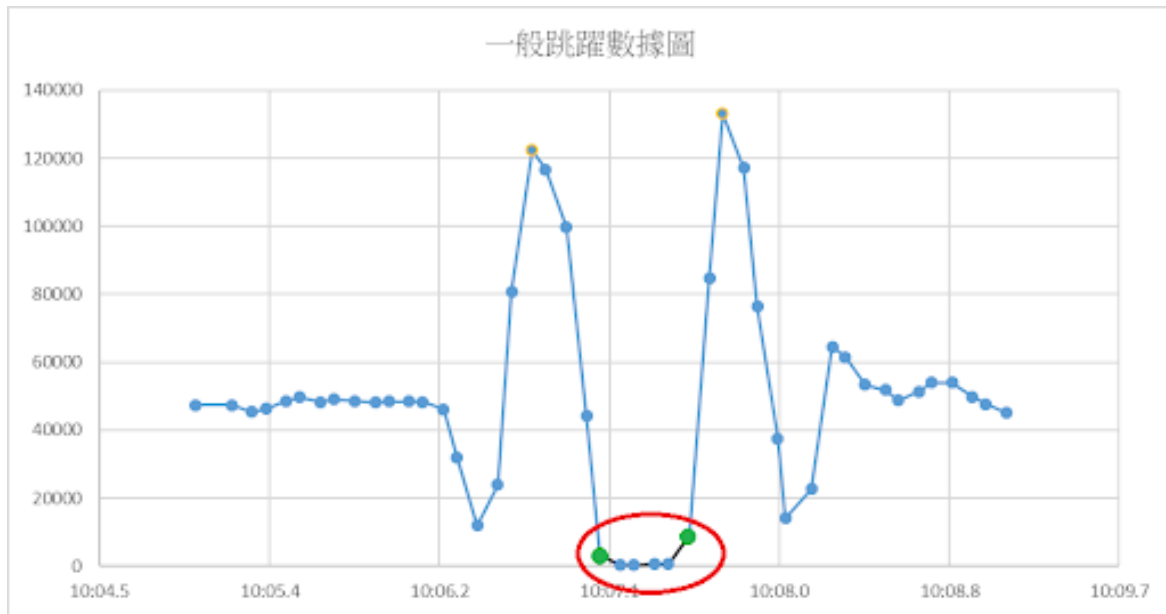


圖 19 一般跳躍的數據圖

表 2 圖 19 中黃點到黃點的實驗數據（錯誤）

| 攝影（實際值） | WioTerminal（程式計算值） | 誤差值 |
|---------|--------------------|---------|
| 59cm | 63.5cm | +4.5cm |
| 39cm | 35.7cm | -3.3cm |
| 61cm | 80.2cm | +19.2cm |
| 43cm | 45.5cm | +2.5cm |

平均誤差值： $(4.5+3.3+19.2+2.5) / 4=7.735\text{cm}$

表 3 圖 19 中綠點到綠點的實驗數據 (正確)

| 攝影 (實際值) | WioTerminal (程式計算值) | 誤差值 |
|----------|---------------------|--------|
| 36cm | 38cm | +2cm |
| 43cm | 40cm | -3cm |
| 56cm | 55cm | -1cm |
| 46cm | 45cm | -1cm |
| 14cm | 17cm | +3cm |
| 50cm | 50cm | +/-0cm |
| 20cm | 18cm | -2cm |
| 22cm | 20cm | -2cm |

平均誤差值： $(2+3+1+1+3+0+2+2) / 8 = 1.75\text{cm}$

註：因攝影的高度較為準確，所以以攝影的數據為基準算誤差。從上方的數據中會發現黃點到黃點的平均誤差比綠點到綠點的平均誤差多了 5.985cm，因此可得知綠點到綠點的數據較為精準。

實驗二

透過三位測試者所測量出的數據，進一步探討跳躍角度與高度的關係。

1、測試者 1 號 (14 歲 50kg 162cm)

表 4 膝蓋跳躍角度與高度記錄—測試者 1 號

| | | | | | | | | | |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 膝蓋 角度 | 110° | 106° | 100° | 87° | 60° | 59° | 50° | 46° | 43° |
| 高度 (cm) | 4.47 | 10.09 | 17.97 | 28.11 | 40.36 | 40.36 | 40.22 | 35 | 34.83 |

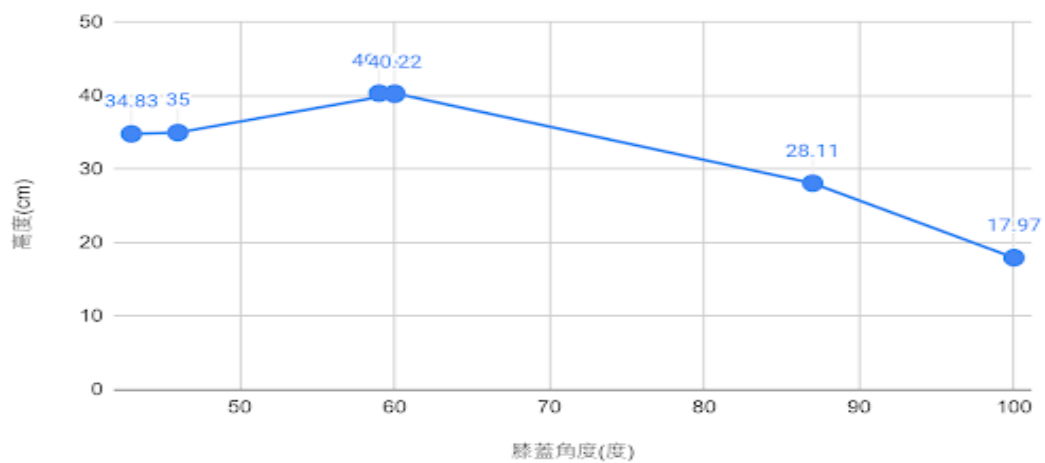


圖 20 膝蓋跳躍角度與高度之關係—測試者 1

2、測試者 2 號 (44 歲 72kg 170cm)

表 5 膝蓋跳躍角度與高度記錄—測試者 2 號

| | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 膝蓋 角度 | 102° | 73° | 69° | 68° | 60° | 54° | 46° |
| 高度 (cm) | 18.06 | 28.11 | 40.36 | 40.50 | 48.13 | 35.51 | 28.11 |

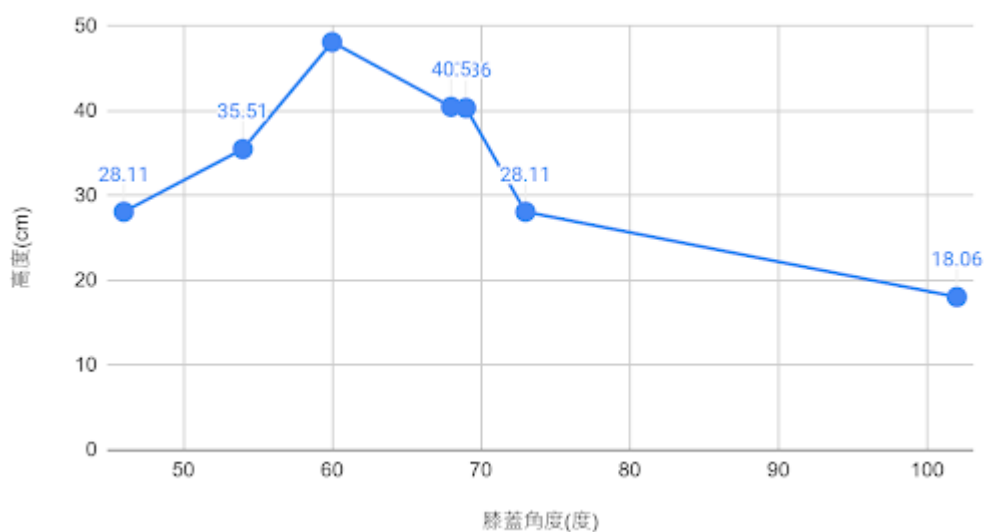


圖 21
膝蓋跳
躍角度
與高度

之關係—測試者 2

3、測試者 3 號 (42 歲 52kg 162.5cm)

表 6 膝蓋跳躍角度與高度記錄—測試者 3 號

| | | | | | | | |
|----------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 膝蓋 角度 | 134° | 97° | 80° | 78° | 69° | 57° | 43° |
| 高度 (cm) | 4.47 | 9.95 | 17.97 | 17.97 | 28.11 | 30.36 | 4.52 |

縱軸：高度(cm) · 橫軸：膝蓋角度(度)

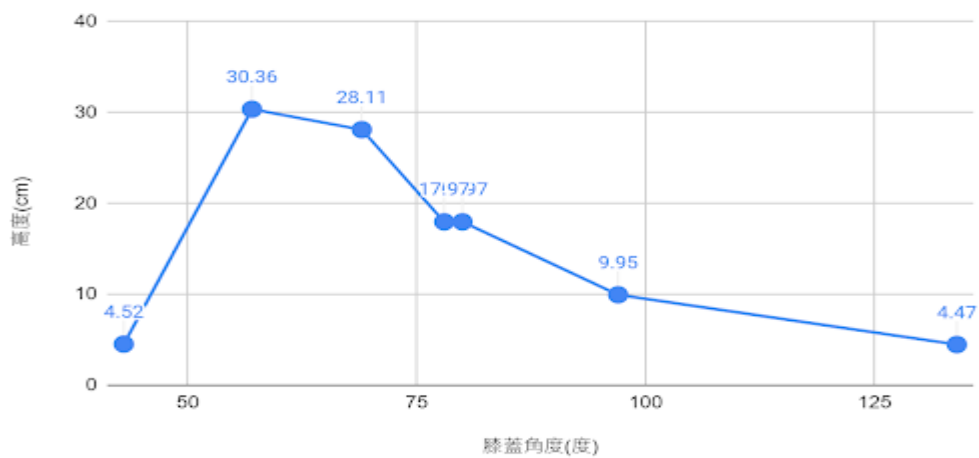


圖 22 膝蓋跳躍角度與高度之關係—測試者 3

經由三位不同性別與年齡的測試者所獲得的數據，我們會發現以圖表呈現時其變化大同小異。當彎曲過大和過小時跳躍的高度較低，彎曲角度在中間時較高，尤其是膝蓋彎曲 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之間是最高的，我們稱這個區間為「甜蜜區間」，而甜蜜區間中膝蓋彎曲 60° 為最高點，所以這個角度點我們稱為「甜蜜角度」。

從實驗中所獲得的結果，我們探究其原因並歸納出下列兩點。

一、人在跳躍時，因膝蓋彎曲角度增加，身體的重心會往下移動導致一種向上彈起的反彈力；當膝蓋彎曲的角度減少時，身體會在反彈力的作用下更快速地向上移動，進而跳得更高。

二、跳躍膝蓋彎曲角度過大或過小時，這會使得人體的肌肉處於過度伸展或收縮的狀態，使得肌肉無法產生足夠的力量，進而降低跳躍高度。

除此之外，雖然膝蓋角度過於彎曲時會使肌肉處於過度收縮的狀態，但因重心較低，反彈力比膝蓋彎曲角度過大時來的多，所以基本上膝蓋角度過小比膝蓋彎曲角度過大跳的還要高。

我們可由以上實驗得知，當人類在跳躍時膝蓋彎曲 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之間是較高的，而膝蓋彎曲大約接近 60° 時是最高的。因為跳躍時膝蓋彎曲角度增加時身體的重心會下移導致反彈力向上彈起，膝蓋彎曲角度越小反彈力越快向上移動而且膝蓋彎曲角度會使得人體肌肉的狀態改變，膝蓋彎曲角度適中是肌肉狀態最完美的時候。所以建議要讓跳躍前膝蓋彎曲角度落在 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之間是最有效率的。

柒、結論

雖然市面上的高精度測力板比起自製測力板，有更高的準確度和穩定性但是市面上的測力板價格也因其精度和功能而有所差異，可能會比自製測力板貴上許多。因此，如果在進行正式的比賽或測量時，建議使用市面上的高精度測力板，以確保測量結果的準確性和可靠性，而自製測力板在一般的娛樂和課堂實驗等場合中，具有低成本和趣味性等優點，是一個很有趣的 DIY 項目。我們利用自製機器發現跳躍時甜蜜區間在 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ，甜蜜角度在 60° ，所以跳躍前膝蓋彎曲角度落在 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之間是最有效率的。

表 7 市售測力板和自製測力板比較圖

| | 市售測力板 | 自製測力板 |
|--|-------|-------|
| | | |

| | | |
|-----|------------------------------|---------------------------|
| 功能 | 測量重量、壓力、體重、落地緩衝時間、跳躍時間、跳躍高度、 | 測量跳躍時間、高度、落地相對時間、跳躍時的重量變化 |
| 價格 | 大約 75000~80000 元新台幣 | 大約 300~600 元新台幣 |
| 方便性 | 易於搭建、收納，且需要空間較小 | 需要較大的空間使用與收納 |
| 實用性 | 功能多元，適合專業人士使用 | 功能較為單一，使用學習門檻低 |

捌、文獻參考

- 1、惠斯通電橋與傳感器 <https://youtu.be/zAu-K6dYj4M>
- 2、負重元原理，中文文件 <http://ir.hust.edu.tw/bitstream/310993100/2400/1/>
- 3、改裝體重計的方式 <https://youtu.be/14YmiEycup4>
- 4、改變 HX711 讀取頻率為 80 SPS <https://youtu.be/0cxS-a837bY>
- 5、如何改變 HX711 讀取頻率 https://youtu.be/Rp_M0NbDSpo
- 6、原理解說垂直跳的曲線意義 <https://youtu.be/ZL1Za3H6G0I>
- 7、垂直跳的生物力學 <https://youtu.be/huSCrUi0HfA>
- 8、垂直跳的力學解說 <https://youtu.be/u05pLtC-T1s>
- 9、測力板物理解釋 <https://youtu.be/p9KXwZyV01k>
- 10、垂直跳躍的原理 <https://www.unclesam.cc/blog/ground-reaction-force-2/>
- 11、衝擊力的計算 http://haophysics.blogspot.com/2015/04/blog-post_16.html
- 12、HX711 改裝文件 <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide/all>
- 13、如何連結負重元的三條線
<https://electronics.stackexchange.com/questions/102164/3-wire-load-cells-and-wheatstone-bridges-from-a-bathroom-scale>