

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

佳作

080113

三線式張拉共構體穩定性研究

學校名稱：花蓮縣花蓮市中華國民小學

作者： 小五 林佑恩 小五 黃為嘉 小五 黃秀晏 小五 蔡聖穎	指導老師： 楊淳翔 林晉丞
---	-----------------------------

關鍵詞：張拉共構體、三線式張拉共構體、槓桿原理

作品名稱：三線式張拉共構體穩定性研究

摘要

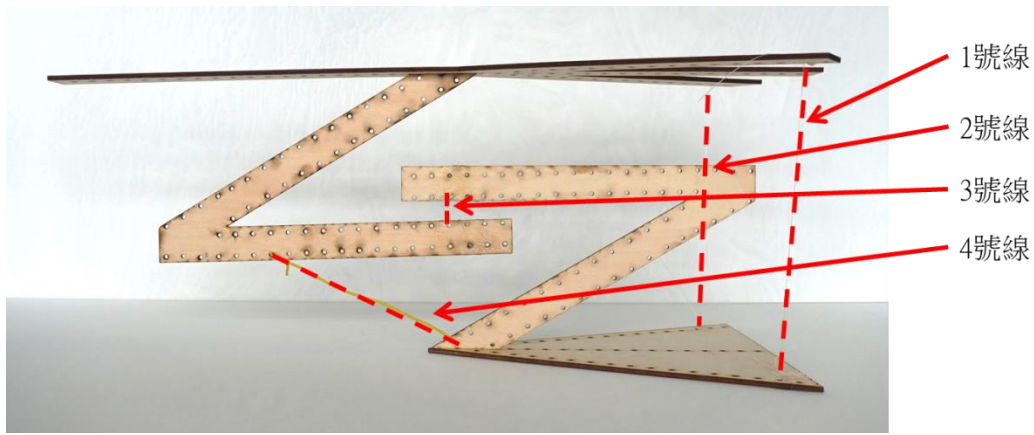
張拉共構體以常見的細繩使一個結構漂浮在半空中，想了解張拉共構體當中的原理。有一篇科展研究提到三條線的張拉共構體做不出來，經實驗發現製作穩固的三線式張拉共構體方法及注意事項。過程中，重新設計張拉共構體三次，發現上結構懸浮隱藏著槓桿原理，成功使用有彈性的繩索測量共構體繩索的張力。探討張拉共構體的懸浮特性獲得的結論：1.三線式的張拉共構體需要在上結構追加重物才能讓它穩定不翻倒。2.三線式張拉共構體的上結構有槓桿原理的特性。3.三線式張拉共構體的懸掛重物越重，越能夠承受一定程度的橫移晃動，但是第3號線將承受整個結構體的拉力及重量。4.第3號線的位置越接近第1、2號線將使上結構可以承受比較大幅度的晃動。

壹、前言

一、研究動機與目的

因為在網路上看到類似的作品，它用日常生活中常見的細繩上下連接兩個物體，上面的物體竟然能懸浮在半空中，讓我產生強烈的衝擊。平常看到的都是繩子由下往上拉著讓物體懸空，但是看到的它是由上往下，所以看起來十分有趣，因此定了張拉共構體這個題目。

要透過此裝置的張拉力去研究作品的平衡。看了一些關於此題目的文章，當中桃園縣快樂國民小學寫的破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力(高滕悅等人，2021)，這一篇寫得最好，其中裡面提到裝置有四條線最穩固(圖一)，三條線無法平衡的說法，最令我感興趣的點是這篇科展研究中沒有提到只有三條線的裝置為甚麼不能平衡。在課餘時間用泡棉板、釣魚線，實驗了非常多次，採用了很多比例，才在無意間做出了只有三條線的張拉共構體，並且達到平衡。



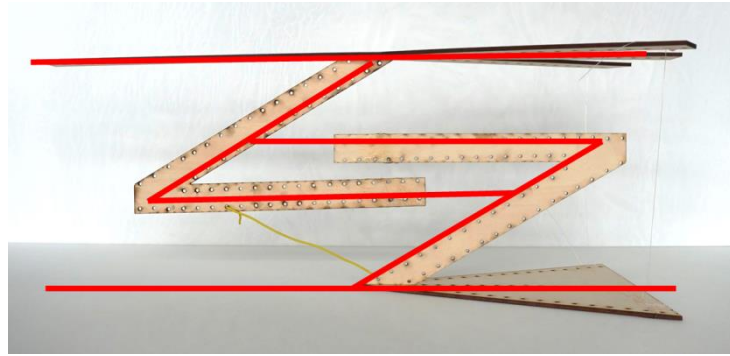
圖一、張拉共構體四條線之編號(作者自攝)。

因此在這次的科展研究中，要更進一步了解如何製作出穩定的三條線之張拉共構體，並且運用虎克定律來找出每一條線之間的張力變化。

二、文獻回顧

張拉共構體又稱張拉整體，在 20 世紀中期被美國理查·巴克敏斯特·富勒創造出來的一個特殊力學結構，是透過繩線之間的「張力」所形成的「拉力」。上下兩個獨立結構透過數條繩子連結構成一個看起來懸浮在半空中的共構體(戴明鳳，2022 年)。

以富勒的說法，「以自然的機構，能運用最少的元素，行成堅固的結構。」。像桃園市快樂國民小學的科展研究-破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力，這篇就有作出四條細線的張拉共構體，且使它平衡，也提到這樣的結構非常穩定。他們一開始先試作各種不同形狀的張拉共構體，發現所有的張拉共構體結構都一定會有「互」字形的結構在中間(圖二)，這樣才能平衡，第二實驗他們試了張拉共構體需要多少線才能達到平衡，最終發現要四條以上的線才能達到平衡，但這點已在本研究的研究動機與目的驗證過，發現 3 條線其實也能做出張拉共構體。接著實驗 3、4、5、6 測試裝置更平衡的方式。最終前人科展研究中在結論中說明了互字形的張拉共構體更穩固。



圖二、張拉共構體的互字(作者自攝)。

在康軒文教事業出的自然科學第六冊的第 1 單元就有教到與研究的三條線的張拉共構體有關的知識，像是把張拉共構體的第四條線改成使用額外重量就對應到地心引力的教學內容，用來取代第四條線的向下拉力。在力的平衡這一課中，也有提到「當在一條線中，兩端的拉力大小相同、方向相反時，物體就會不動，並達到平衡。」像在張拉共構體中上、下結構以數條繩子結合，透過繩子張力，使兩個結構出現懸空，但是結構穩定的張拉共構體，此時這些張力彼此達到平衡(圖一)。

彈力是指物體被受力要回復狀態時所產生的力，但如果超過彈力限數就沒有辦法產生彈力，彈力發生時，應被彈力改變形狀的物體稱為施力物體，則受力的物體為受力物體，在本實驗中會以彈簧取代繩子，將用虎克定律來量測繩子的張力(康軒文教事業，2022；維基百科)。「虎克定律」是指彈簧受力後，其伸長長度具有規律性的變化，拉力越大彈簧長度就越長。彈簧的形狀、受力會符合虎克定律，及形成正比。也會有受力越大，改變形狀越大，的規律，且無論怎麼受力，一定會有再現性，除非超過彈力限數。彈簧的形狀、重量會形成正比，這種關係也叫做虎克定律，這中關係能用彈力係數 $F=k \times D$ ， F 是力， k 式彈力係數， D 則是形狀改變的程度(維基百科)。

在研究中將會運用到槓桿原理，被物體給施力的點稱為施力點，抵抗整個槓桿的力是抗力點，抗力點到支點的距離是抗力臂，施力點到支點的距離則是施力臂，抗力矩是指抗力的大小乘以抗力臂，施力矩就是指施力的大小乘以施力臂，因此當施力矩=抗力矩時，就會平衡。

貳、 研究設備及器材

設備：電子秤、電腦、簽字筆、照相機、雷射切割機、直尺、剪刀、砝碼(20g)、砝碼(2g)、小刀、鉛塊

材料：、3D 列印材料 PETG 1.75mm、電線、熱熔膠條、彈簧(10X80mm)、釣魚線、快乾 CA-260、快乾加速劑、KT 板(5mm)、椴木板(3mm)、電線、吸管、彈力飛機專用橡皮筋繩

參、 研究過程

一、 實驗過程

一開始依據「破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力」，實驗一先試著做只有三條線的張拉共構體，就像這篇科展題目所說的三條線的張拉共構體是做不出來的(高滕悅等人，2021)。會一直倒掉。在失敗過程中發現張拉共構體的上結構會一直往後倒，為了避免他一直往後倒，試著拿重物放在前端增加重量，後來竟然成功做出來了，但是仍然不穩定。於是根據四條線的張拉共構體和三條線的張拉共構體，拿去比較，發現三條線的張拉共構體是把四條線的張拉共構體的第四條線去除，原本第四條線的往下拉的功能，改成前端使用重量去取代第四條線的拉力。

先在 Tinkercad 中做了一個模擬的張拉共構體，再用雷射切割作出設計的張拉共構體，設計是在上結構上在正中間加了一根有大量小洞的桿子並且盡量往前延伸，當作前端的重物。後來發現前端的木頭重量不夠，仍然需要加重物在前端，讓張拉共構體不至於倒下。實驗二中，想用彈簧代替所有的釣魚線來測出線的拉力，但發現張拉共構體中的彈簧一直會晃，沒辦法立起來；爾後，發現可能是繩索之間隨著拉伸的距離越大，繩索拉力增加的幅度太低，所以晃動，後來改用彈力飛機專用的橡皮筋(不容易彈性疲乏)進行此觀察。在實驗三，根據第 1 個實驗的張拉共構體重新設計了它的結構。為了方便重物的懸掛，把原本上結構中的小圓孔改成了長方形孔。為了方便釣魚線能固定在上下結構之間，設計了可以固定釣魚線的插梢，以及 L 形的孔。試著找出平衡下的張拉共構體之施力點(重物)與支點的距離、重物的重量

之間的關係是否符合槓桿原理。

在進行這些實驗的過程中，我們問了以下的問題：

實驗一、三條線的張拉共體真的做不出來嗎？

實驗二、張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

實驗三、拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

實驗四、前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響。

實驗五、晃動極限測試。

實驗六、使用彈性材質去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力。

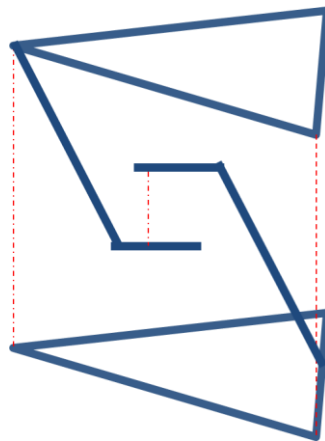
二、實驗一：三條線的張拉共體真的做不出來嗎？

(一) 目的：

依據前人的研究中(高滕悅等人，2021)，三條線的張拉共構體無法做不出來，於是在本實驗中試著做出三條線的張拉共構體。

(二) 實驗操作方式：

1. 依據前人的科展內容，做出內容中四條線的張拉共構體(圖三)。

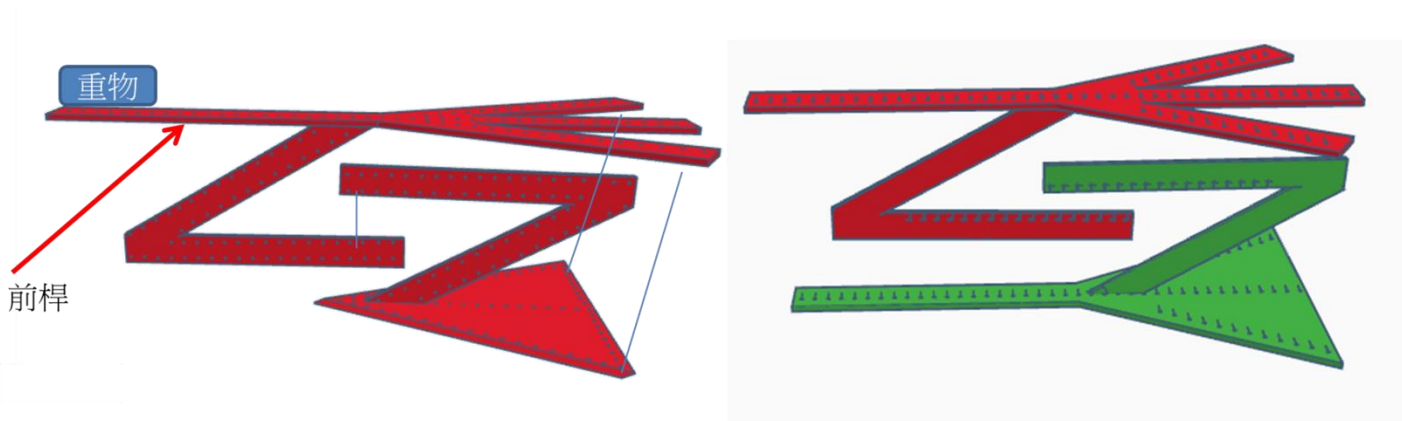


圖三、前人科展內容中的四條線張拉共構體(作者自繪)。

2. 先做出平衡的四條線張拉共構體，拿出剪刀把第四條線剪斷。
3. 觀察剪斷的瞬間張拉共構體的變化。
4. 在此，假設是三條線張拉共構體會往後倒下的原因是因為前端失去一個往

下的拉力，以至於往後倒。在張拉共構體前端加重物品，來替代第四條線的拉力，直到它的上結構不再往後倒為止。

5. 依據實驗設計的需求，在 Tinkercad 網站上設計出新的張拉共構體，在張拉共構體上設計大量的小圓孔，以方便釣魚線固定在結構上(圖四左)。
6. 用快乾將上、下結構組合。先用釣魚線將上下結構中的第 3 號線以上、下結構懸浮時不互相接觸到的狀態下進行黏合。
7. 第 1 號線用快乾與釣魚線黏合。第 1 號線的長度要確保上結構在懸浮時會保持水平的狀態。再黏第 2 號，第 2 號線的長度要和第 1 號線一樣長，並確保上結構懸浮時會保持水平狀態。
8. 此時的張拉共構體仍然會往後倒，觀察張拉共構體往後倒的反應，適當的追加重物，觀察隨著重物的增加是否可以讓上結構達到穩定。



圖四、左為第 1 代張拉共構體，右為第 2 代張拉共構體含方孔(作者自繪)。

三、實驗二、張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

(一) 目的：

為了瞭解張拉共構體上結構懸浮所需的力大小，在這個實驗將在前桿的每個地方，是否重量都一樣。

(二) 觀察方法：

1. 假設：在初步觀察的前提下，若重物懸掛在前桿的最前方時。會比懸掛在靠

近第 3 號線位置所需的重量還要輕。若將該重物往第 3 號線位置靠近，上結構會倒下來。

四、實驗三、張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

(一) 目的：

在製作過程中，發現前端加重量，只要很輕的物品例如：橡皮擦，就能保持平衡，但是當橡皮擦越靠近張拉共構體上結構的第 3 號位置時，就需要改用更重的物品，才能讓上結構保持懸浮。於是得出了一個結論，越靠近第 3 號線位置就需要越多的重量，離第 3 號線位置越遠只需要較輕的重量就能平衡，這現象很像槓桿原理。

因此本實驗要確認，物體與距離和重量平衡的關係，是否與槓桿原理有關。

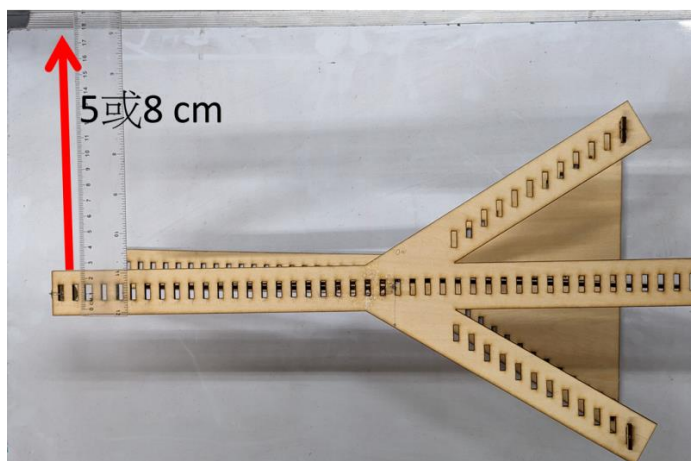
(二) 觀察方法：

1. 假設：若重物與距離關係與槓桿原理有關，則重物的重量乘以重物到第 3 號線的距離，會有一個最小定值。
2. 操縱變因：重物到第 3 號線的距離。
3. 應變變因：保持上結構懸浮的穩定重量。
4. 為了要在前端任意的放置釣魚線，於是在 Tinkercad 網站上設計出有小方孔和為了方便增加重量的前桿，接著用厚 3 釐米的木板，再用雷射切割機做出上、下結構。
5. 用快乾將上、下結構組合。(圖四右)
6. 先用釣魚線將上下結構中的第 3 號線以上、下結構懸浮時不互相接觸到的狀態下進行黏合。
7. 第 1 號線用快乾與釣魚線黏合。第 1 號線的長度要確保上結構在懸浮時會保持水平的狀態。再黏第 2 號線，第 2 號線的長度要和第 1 號線一樣長，並確保上結構懸浮時會保持水平狀態。
8. 此時的張拉共構體仍然會往後倒，於是繼續在前桿上逐漸增加重量，直到上

結構懸浮不會倒為止。紀錄該距離所需的最小重量。

五、實驗四、前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響

(一) 目的：無意間發現張拉共構體前桿加重物，重量與距離有一定的關係，若加的重物越輕只要一點的力，張拉共構體就會倒下，於是這個實驗將要做一個對張拉共構體前桿加重物的晃動測驗，以確定張拉共構體耐晃程度與物體的重量及位置。



圖五、晃動實驗的移動方式(作者自攝)。

(二) 觀察方法：

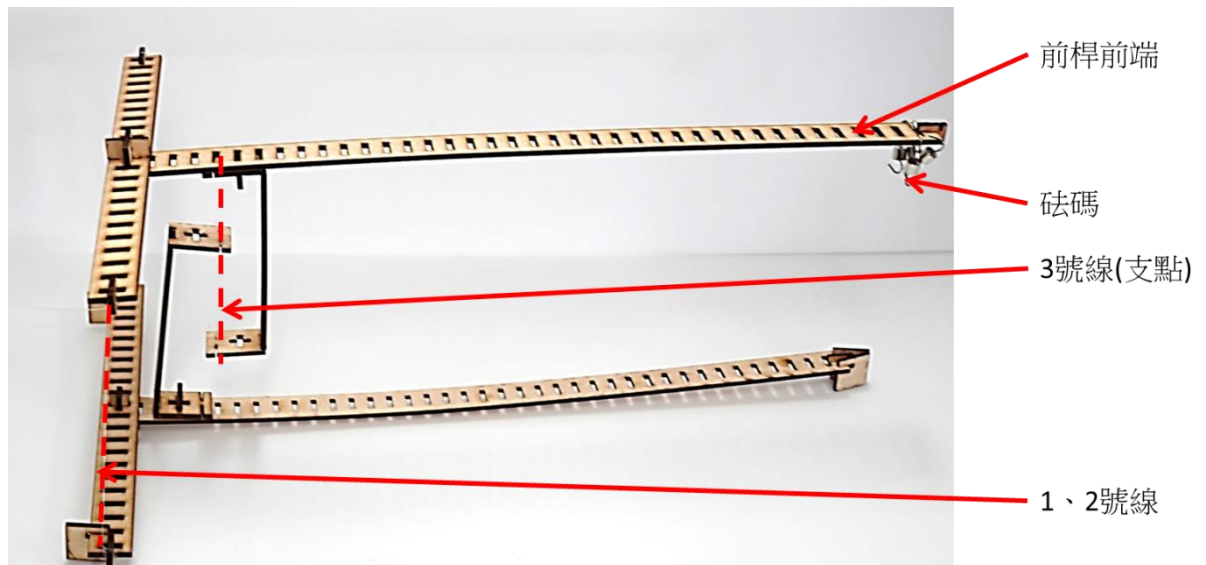
1. 假設：上結構晃動的幅度越大、重物到的第3號線位置的距離越短，張拉共構體上結構所需的前桿重物越重，。
2. 操縱變因：重物到第3號線的距離和上結構的晃動幅度。
3. 應變變因：張拉共構體前桿上的重物重量。
4. 先在張拉共構體前桿上加重物，在前方放一把尺，並以橫向推動到5或8公分，要是倒下就持續追加重物，找出每個位置加重物的重量(圖五)。

六、實驗五：晃動極限測試

(一) 目的：

從古至今張拉共構體的實驗之第3號線位置都是固定的，為了研究三線式張拉共構體第3號線位置對上結構晃動幅度與重物重量、距離的影響。為了實證張

拉共構體中只使用 3 條線也能成功穩定懸浮，所以製作了第 3 代張拉共構體(圖六)，並在上下結構中做出長方孔，並把後面的部位去除，做成橫向的 T 形，讓上下結構長的一樣。本實驗要做晃動測驗，為了找出張拉共構體最大晃動幅度且晃動所需的重量最小的第 3 號線位置，以找出三線式最穩定的張拉共構體之設計。



圖六、第 3 代張拉共構體(作者自攝)。

(二) 觀察及提問：

考慮到張拉共構體的前桿和下結構的三角形邊緣圓孔行成直線，於是把上下結構都做成 T 形，這樣上下結構就不會行成直線，以方便它晃動測驗較不會倒，也使張拉共構體更穩定。對於這次的實驗提出了以下問題:

1. 張拉共構體晃動測驗是第 3 號線位置越靠近前桿前端，晃動幅度的承受極限就越小?
2. 張拉共構體晃動測驗第 3 號線的位置對張拉共構體上結構最大晃動幅度，重物位置、重量的影響?
3. 第 3 代張拉共構體能否可以不加重物的情況下懸浮?

(三) 假設:

晃動測試第 3 號線位置越靠近前桿前端，晃動幅度的耐受極限就越小。

(四) 實驗設計：

- (1) 操縱變因：第 3 號線位置。
- (2) 應變變因：全掛重物以避免倒下之最小重物重量、晃動幅度最大忍受值。
- (3) 在 Tinkercad 上設計出張拉共構體上下的長方孔，並把前桿做成橫向，讓上下結構形成 T 形，再做出固定釣魚線的卡榫。
- (4) 用雷射切割機把各零件切出來，再用卡榫把中間第 3 號線固定，另外第 1、2 號線用快乾黏合。
- (5) 確保張拉共構體上結構前後左右水平，若張拉共構體前後沒有水平，可以用砝碼加重，若左右沒有水平，則要調整繩子長度。
- (6) 以橫向推動前桿前端，觀察並記錄前桿前端位置移動的極限
- (7) 逐漸移動第 3 號線往前桿前端，測試每個位置點的幅度晃動實驗。

七、實驗六、使用彈性材質去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力。

(一) 目的：運用虎克定律，用彈簧及橡皮筋替代釣魚線來測出拉力。

(二) 假設：

1. 隨重物離第 3 號線的距離越短，重物就會越重，以至於第 3 號線會被拉長。
2. 第 1、2 號線的拉力不會有明顯改變。

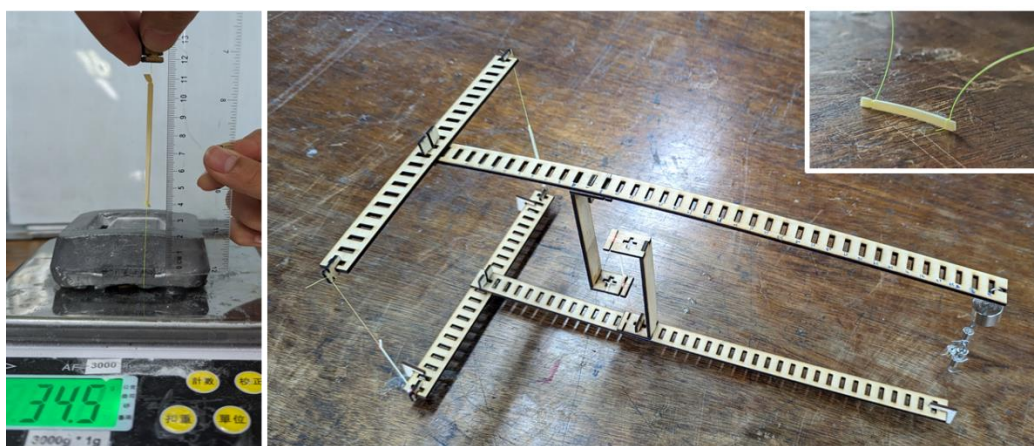
(三) 設計原理：

把釣魚線改成彈性材質，在張拉共構體穩定的情況下，彈性材質隨著重物移動及增重而改變長度，拉伸的越長拉力就越大。透過虎克定律來回推當時每一條線的拉力。藉此觀察每一條線拉力的關係。

(四) 步驟：

1. 把釣魚線全部改成彈簧，調整至張拉共構體平衡為止。
2. 量測每個彈簧的長度及拉力，藉由彈簧伸長長度，推算釣魚線的拉力。
3. 因為發現彈簧隨著伸長長度的增加，增加的拉力不足以支撐整個上結構，於是將彈簧改成伸長一樣長度時可以產生更大張力的橡皮筋。

4. 將釣魚線綁在橡皮筋的兩端，先把橡皮筋其中一端放上重物然後扣重，然後紀錄每次橡皮筋多伸長 0.1 公分時所增加的拉力(圖七的左圖)，先繪製出三個彈簧的重量-彈簧拉升長度折線圖。
5. 將第 3 代張拉共構體的釣魚線改成橡皮筋(圖七)，紀錄砝碼在每個位置讓上下結構保持水平所需的重量，和第 1、2、3 號線伸長的長度。
6. 將重物固定在穩定的位置，並持續加重，記錄每加 2 克時，橡皮筋所增加的長度。



圖七、使用橡皮筋替代釣魚線來測量繩子張力。右上角為釣魚線綁在繩子兩端。左圖為測量每條橡皮筋伸長長度與拉力的關係。圖中間為第 3 代張拉共構體把釣魚線改成橡皮筋之實際照片(作者自攝)。

肆、 研究結果

為了製作出穩定的張拉共構體，慢慢的做了許多的實驗，在做實驗過程中發現了許多意外的事情，有些甚至影響了實驗，但還是做了一些改正，重新進行實驗。先模仿其他文獻，製作了四條線的張拉共構體，接著又製作了三條線的張拉共構體發現張拉共構體會不斷倒下，於是再做一個四條線的張拉共構體，並拍照錄影張拉共構體第四條線剪斷時的模樣，發現張拉共構體會有規律地往後倒下。於是製作了有前桿、和後面部分的第 1 代張拉共構體，前桿是為了懸掛重物並增加重物重量，代替第四條線的拉力，於是就能以 3 條線的方式平衡了。

然後測試張拉共構體是否符合槓桿原理，為了方便實驗，做了第 2 代張拉共構體，將圓孔改成相距 1 公分的長方孔，方便掛上砝碼。用第 2 代張拉共構體進行晃動測驗，最後發現每次懸掛的重物重量都不一樣，懸掛越前端，所需的重物重量就越輕，懸掛點越靠近第 3 號線，所需的重物重量就越重，也發現前桿和下結構三角形邊緣行成直線時一定會倒下(圖九)。

為了瞭解前桿和三角形邊緣行成直線只要跨過第 3 號線上結構就會倒下的問題，設計了第 3 代張拉共構體。將上下結構都作成 T 型，並設計可以移動的第 3 號線的結構，進行晃動實驗，最終發現第 3 號線位置越靠近前桿後端晃動幅度的極限就越小、越靠近前面晃動幅度就越大，因此第 3 號線的位置放在接近第 1、2 號線的位置是最可以忍受晃動的。

接著用彈簧代替釣魚線試著去推測出釣魚線的拉力，但發現彈簧與線的特性不同，一晃就會倒下，可能伸長長度增加時，拉力增加的幅度不足以抵抗拉力；後來改用橡皮筋來做成三線式張拉共構體，成功測量到在張拉共構體在水平懸浮的過程中，每一條線的拉力。

一、 實驗一：三條線的張拉共體真的做不出來嗎

根據前人的研究，三條線的張拉共構體不能做出來，在此將驗證是否真的做不出來。首先根據前人的科展文獻做出四條線張拉共構體，並錄影把第四條線剪斷的瞬間，觀看張拉共構體會往哪個方向倒。為了方便實驗，做了上下結構上有小圓孔的第 1 代張拉共構體，繼續在張拉共構體前端加重直到上結構不會倒下。

二、 實驗二：張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

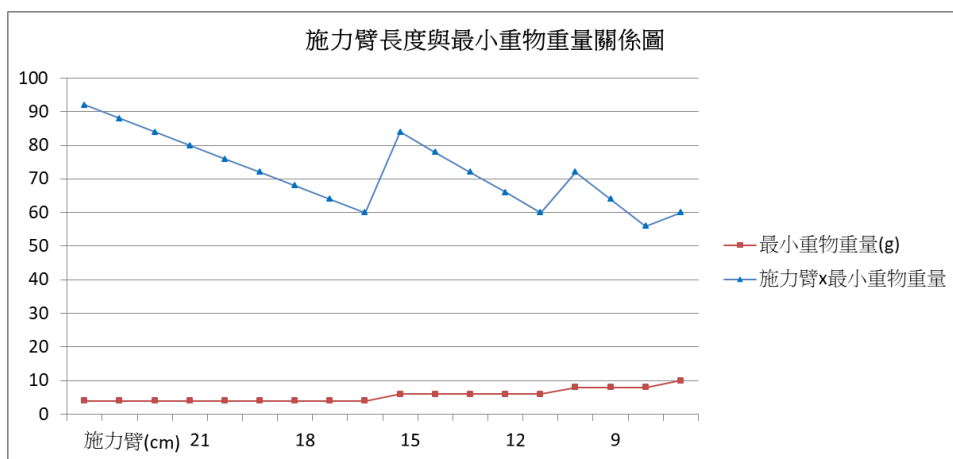
將重物懸掛在張拉共構體的前桿上，觀察重物在張拉共構體上的哪個位置上，張拉共構體會更穩定。最後發現重物懸掛在越接近前桿前端越穩定，越接近第 3 號線位置就需要更多的重物。

三、 實驗三：張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

透過實驗三發現張拉共構體，重物懸掛在前桿的最前方時。會比懸掛在靠近第 3 號線位置所需的重量還要輕。若將該重物往第 3 號線位置靠近，上結構會倒下來的關係很像槓桿原理，於是做了第 2 代張拉共構體，並在每個固定距離，觀察所需的最小重量。若以第 3 號線為支點，第 1、2 號線為抗力，為了維持上結構不會倒下，重物越靠近支點，需要的力則越大。

表一、施力臂長度與最小重物重量關係紀錄表。

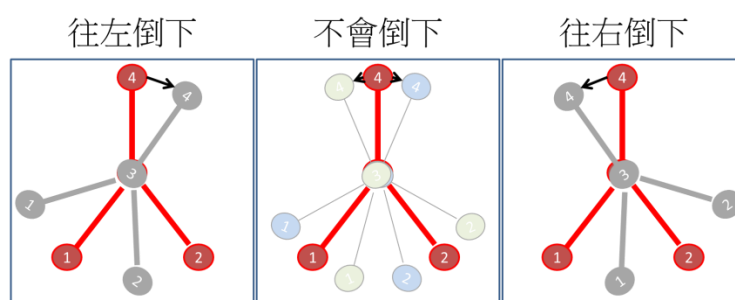
施力臂(cm)	最小重物重量(g)	施力臂 x 最小重物重量
23	4	92
22	4	88
21	4	84
20	4	80
19	4	76
18	4	72
17	4	68
16	4	64
15	4	60
14	6	84
13	6	78
12	6	72
11	6	66
10	6	60
9	8	72
8	8	64
7	8	56
6	10	60



圖八、最小重物重量、施力臂長的積與重物位置關係圖(源表一，作者自繪)。

在實驗三的實驗中，把實驗結果記錄在表一。將表一的實驗結果繪製成折線圖(圖八)。發現放在前桿前端的最小重物重量會隨著施力臂越短，所需的重物重量就越重。根據槓桿原理，施力矩是施力臂長度乘以施力大小，於是將最小重物重量乘以施力臂長度，繪製在圖八的藍線。依據實驗結果測到最小的積為 56，若以最長距離 23 來推算，則所需最小砝碼重量為 $56 \div 23 \approx 2.4$ 公克；由於砝碼最小重量為兩公克，為了符合最小積 56，必須懸掛兩顆砝碼則積會達到 224，比原本預期的 56 多出將近四倍，因此造成圖表中的鋸齒狀。另外發現施力臂大小最小重物重量的積低於六十以下，張拉共構體的上結構就會倒下(測到最小的積是 56)。

在實驗三進行過程中發現當重物重量遠遠超過最小平衡重量十，張拉共構體上結構橫向到張拉共構體上結構前桿和下結構的三角形邊緣形成直線則一定會倒下(圖九)。



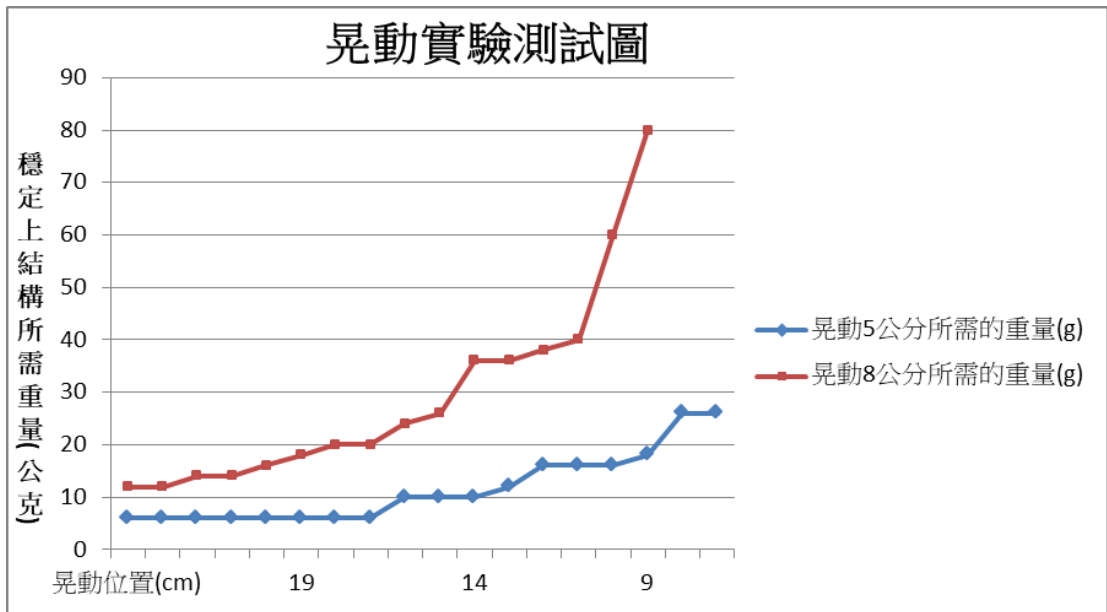
圖九、張拉共構體上結構前桿和下結構的三角形邊緣形成直線，上結構就會倒下(作者自繪)。

四、實驗四: 前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響

張拉共構體上結構懸掛砝碼，重量與距離有一定的關係，於是針對這個關係，對張拉共構體的前桿加重物使它保持水平，再以橫向推動觀察每個位置加重物時晃動到 5 或 8 公分時所需的重量。

表二、晃動實驗測試表。

重物懸掛位置(cm)	晃動 5 公分所需的重量(g)	晃動 8 公分所需的重量(g)
23	6	12
22	6	12
21	6	14
20	6	14
19	6	16
18	6	18
17	6	20
16	6	20
15	10	24
14	10	26
13	10	36
12	12	36
11	16	38
10	16	40
9	16	60
8	18	80
7	26	過重
6	26	過重



圖十、晃動實驗測試折線圖(源表二，作者自繪)。

在圖十，將表二的實驗過程'結果也做成折線圖，分為晃動 5 公分和晃動 8 公分的重量。實驗當中發現晃動越遠，所需的重量越重，如果晃動幅度超過 9 公分張拉共構體就會倒下，表示懸掛物越重、懸掛距離越遠，則上結構越穩定。還發現重物越接近第 3 號線時，晃動保持穩定所需的重量就越重，且越容易晃倒。在該實驗中，亦有發現距離越遠重物越輕的現象，符合槓桿原理。

五、實驗五: 晃動極限測試

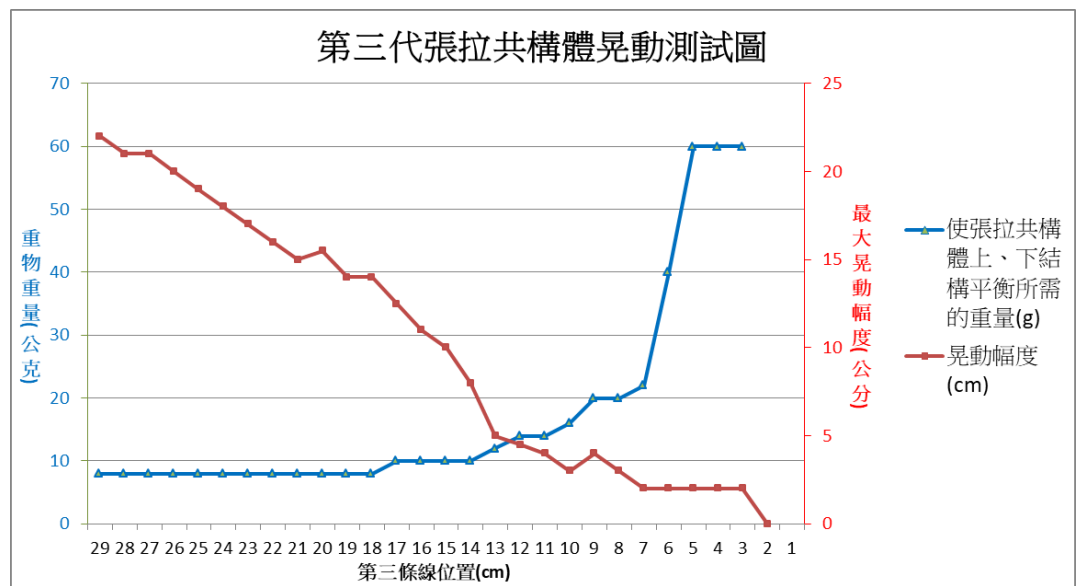
經歷實驗四，打算找出讓張拉共構體更加穩固的因素，於是做了可以移動第 3 號線的第 3 代張拉共構體，要用它找出最穩定的第 3 號線位置。將張拉共構體的第 3 號線位置不斷前進(遠離第 1、2 號線的距離)，若會倒下就持續加重直到不再倒下，將重物重量及忍受的最大晃動幅度紀錄於表格中(表三)，並繪製折線圖(圖十一)。

將第 3 代晃動實驗做成折線圖。最終得出結論是張拉共構體第 3 號線越靠近第 1、2 號線時越穩固，可以忍受的晃動幅度就越大，若越遠離第 1、2 號線，則上結構越不穩固，最後的第 28、29 公分時甚至無法使張拉共構體平衡。因此第 3 號線位置在最接近前桿後端的位置是最穩定的，最可以忍受大幅度的晃動。

表三、第 3 代張拉共構體晃動測試表。

第 3 號線位置(cm)	晃動幅度(cm)	使張拉共構體上、下結構平衡所需的重量(g)
1	22	8
2	21	8
3	21	8
4	20	8
5	19	8
6	18	8
7	17	8
8	16	8
9	15	8
10	15.5	8
11	14	8
12	14	8
13	12.5	10
14	11	10
15	10	10
16	8	10
17	5	12
18	4.5	14
19	4	14
20	3	16
21	4	20
22	3	20
23	2	22
24	2	40

25	2	60
26	2	60
27	2	60
28	因過重而無法測試	
29		



圖十一、第 3 代張拉共構體晃動測試折線圖(源表三，作者自繪)。

六、 實驗六：使用彈性材質去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力

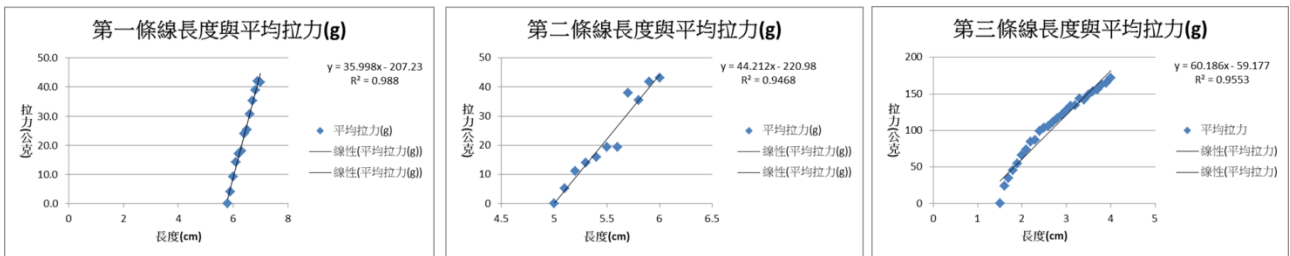
運用虎克定律，用彈簧替代釣魚線來測出拉力，但後來發現張拉共構體以彈簧代替釣魚線，彈簧會晃動以至於張拉共構體上結構倒下。後來換成綁在繩子上的彈力飛機橡皮筋繩，三條線的張拉共構體可以維持平衡了。

於是將彈簧改成橡皮筋，將釣魚線綁在橡皮筋的兩端(圖七左上)，先把橡皮筋其中一端固定在磅秤上然後扣重，然後紀錄每次橡皮筋伸長 0.1 公分時所產生的拉力，由於橡皮筋的伸長長度與拉力的關係會隨著橡皮筋的品質、粗細、長度、綁的方式不同而有不一樣的關係，所以三條線的每一條線都要做 3 次量測(表四及圖十二)。並求出每一條線之線長度與拉力的回歸曲線及公式，用以線的總長度回推線的拉力。

表四、第 1 到第 3 號線的橡皮筋伸長長度與拉力的關係。

第一條線					第三條線				
長度(cm)	第一次	第二次	第三次	平均拉力(g)	長度(cm)	第一次	第二次	第三次	平均拉力
5.8	0	0	0	0.0	1.5	0	0	0	0
5.9	0.5	6	6	4.2	1.6	23	25	25	24.3
6	10	9	9	9.3	1.7	37	35.5	31	34.5
6.1	17	15	11	14.3	1.8	47	49	40	45.3
6.2	16	18	17.5	17.2	1.9	54	55	55	54.7
6.3	13	22	19	18.0	2	66	66	66.5	66.2
6.4	24	25	23	24.0	2.1	75	72	74	73.7
6.5	25	24	27	25.3	2.2	85.5	82.5	85	84.3
6.6	32	30	30	30.7	2.3	87	88	85	86.7
6.7	35	33	38	35.3	2.4	98	99	100	99.0
6.8	40	38	39	39.0	2.5	105	100	106	103.7
6.9	42	42	42	42.0	2.6	108	106	103	105.7
7	44	42	39	41.7	2.7	117	110	108	111.7
					2.8	114	119	116.5	116.5
					2.9	123	120	120	121.0
					3	130	127	126	127.7
					3.1	133	131	137	133.7
					3.2	132	135	135	134.0
					3.3	144.5	141	144	143.2
					3.4	141	142	142	141.7
					3.5	150	149	148.5	149.2
					3.6	155.5	154.5	149.5	153.2
					3.7	153	156	158	155.7
					3.8	162	163	163.5	162.8
					3.9	165.5	164	165.5	165.0
					4	170	170	174.5	171.5

第二條線				
長度(cm)	第一次	第二次	第三次	平均拉力(g)
5	0	0	0	0
5.1	6	5	5	5.3
5.2	12	12.5	9	11.2
5.3	16	11.5	14.5	14.0
5.4	17	15	16	16.0
5.5	20	20.5	18	19.5
5.6	22.5	17	19	19.5
5.7	37	42	35	38.0
5.8	35.5	34	37	35.5
5.9	43	41	41.5	41.8
6	42	41	46.5	43.2

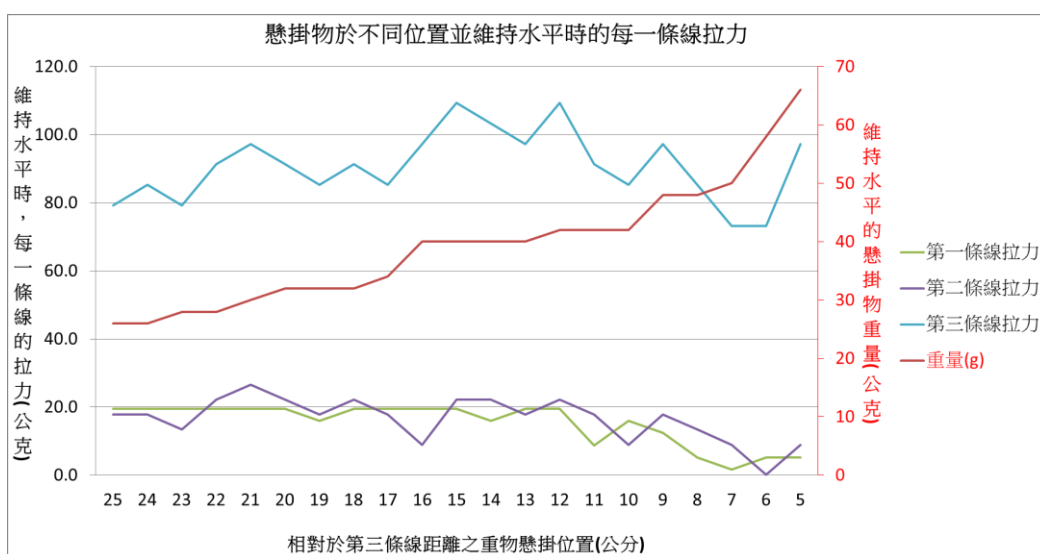


圖十二、橡皮筋與拉力的回歸曲線圖(源表四，作者自繪)。

接著將第 3 代張拉共構體的釣魚線改成橡皮筋(圖七)，紀錄砝碼在每個位置讓上、下結構保持水平所需的重量，和 1、2、3 號線伸長的長度，並將長度換算成拉力(表五、圖十三)。

表五、不同位置懸掛重物下，保持水平的橡皮筋伸長長度及拉力紀錄

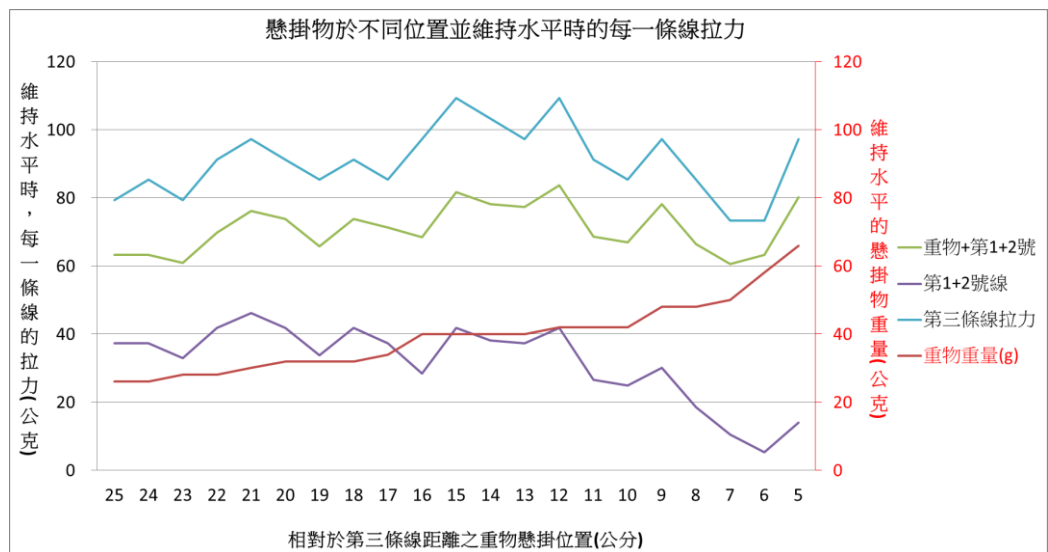
位置 (差距) (g)	重量	第一條 線長度	第二條 線長度	第三條 線長度	第一條 線拉力	第二條 線拉力	第三條 線拉力
25	26	6.3	5.4	2.3	19.6	17.8	79.3
24	26	6.3	5.4	2.4	19.6	17.8	85.3
23	28	6.3	5.3	2.3	19.6	13.3	79.3
22	28	6.3	5.5	2.5	19.6	22.2	91.3
21	30	6.3	5.6	2.6	19.6	26.6	97.3
20	32	6.3	5.5	2.5	19.6	22.2	91.3
19	32	6.2	5.4	2.4	16.0	17.8	85.3
18	32	6.3	5.5	2.5	19.6	22.2	91.3
17	34	6.3	5.4	2.4	19.6	17.8	85.3
16	40	6.3	5.2	2.6	19.6	8.9	97.3
15	40	6.3	5.5	2.8	19.6	22.2	109.3
14	40	6.2	5.5	2.7	16.0	22.2	103.3
13	40	6.3	5.4	2.6	19.6	17.8	97.3
12	42	6.3	5.5	2.8	19.6	22.2	109.3
11	42	6	5.4	2.5	8.8	17.8	91.3
10	42	6.2	5.2	2.4	16.0	8.9	85.3
9	48	6.1	5.4	2.6	12.4	17.8	97.3
8	48	5.9	5.3	2.4	5.2	13.3	85.3
7	50	5.8	5.2	2.2	1.6	8.9	73.2
6	58	5.9	5	2.2	5.2	0.1	73.2
5	66	5.9	5.2	2.6	5.2	8.9	97.3



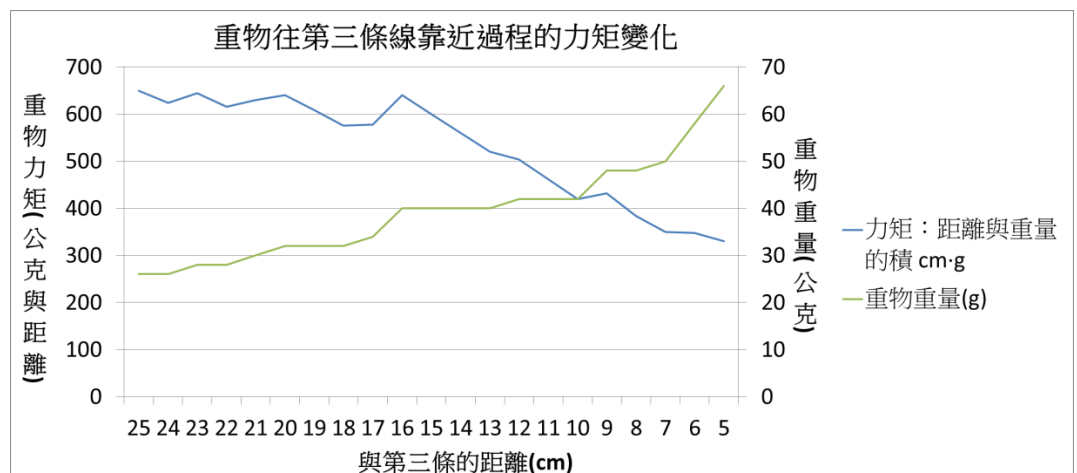
圖十三、使用繩索用橡皮筋替換的第 3 代張拉共構體，在維持水平的前提下，於每一個位置點懸掛之重物、繩索拉力紀錄(源表五，作者自繪)。

原本假設隨著重物重量增加，第 3 號線的拉力應該會增加，第 1、2 號線的拉力不會明顯改變。但是經過實驗結果發現與假設完全不同。隨著重物重量增加、重物懸掛位置接近第 3 號線，第 3 號線的拉力沒有明顯改變，但是第 1、2 號線的拉力減少的現象。

考量到第 1、2 號線在裝置上有並行的現象，再加上唯一往上的拉力源自於第 3 號線，又在重新繪製一張重物重量、第 1、2 號線總和與第 3 號線拉力的關係圖(圖十四)。



圖十四、將第 1、2 號線相加的力或重物、第 1 與 2 號線的力相加繪製的關係圖(源表五，作者自繪)。

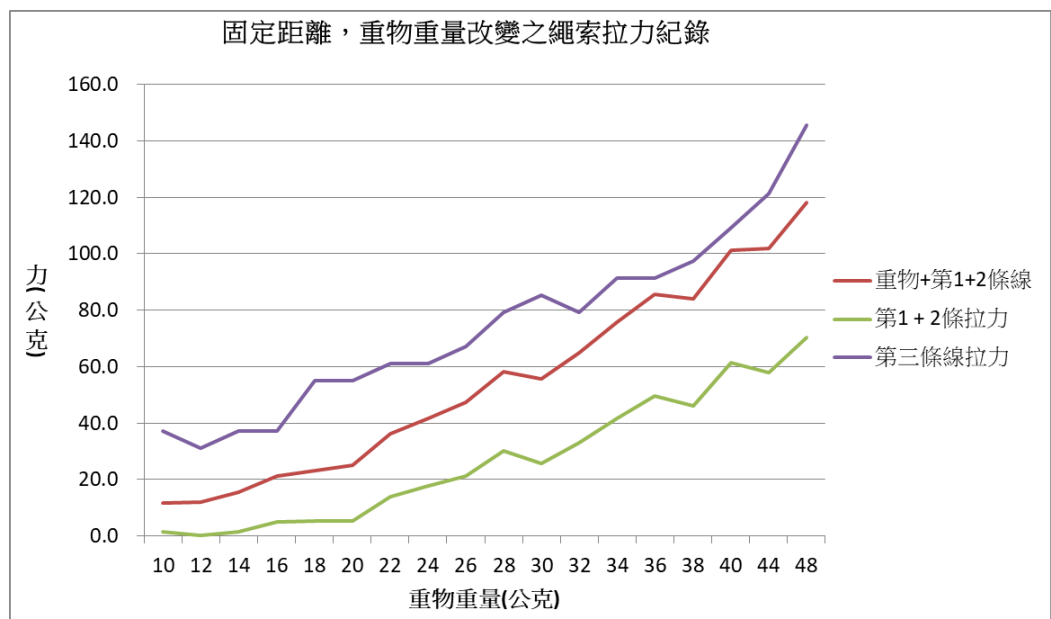


圖十五、在圖十二的實驗中，重物距離第 3 號線越近，要使上結構維持水平的重物重量及力矩的紀錄圖(源表五，作者自繪)。

從圖十四中，第 1、2 號線拉力的和逐漸減少、第 3 號線拉力沒有明顯變化；雖然重物重量逐漸增加，可是第 1、2 號線拉力減少，所以整個往下拉的力幾乎被抵消，因此第 3 號線的拉力沒有明顯變化。重物+1+2 的力總和略低於第 3 號線拉力，差距平均為 20 公克，應該是上結構本身的重量(20 公克)所致。

由於重物往第 3 號線移動，理應第 3 號線的拉力會越來越高。又因為重物的施力點往第 3 號線逐漸移動，而若以第 3 號線為支點，則移動過程中的力矩是逐漸下降的(圖十五)。重物重量增加要保持上結構維持水平，整個上結構會下沉，所以第 1 及 2 號線也跟著下降。所以第 1 及第 2 號線的拉力會逐漸減少。用槓桿原理在實驗前預測，理論上第 1 及第 2 號線的拉力應該會因為重力增加而跟著拉力增加，但是因為重物逐漸往第 3 號線靠近，所以施力臂逐漸變短，施力矩也跟著下降(從 650 降至 330)。所以第 1 及第 2 號線由於抗力點固定，所以拉力降低才可以維持上結構的水平。

最後將重物固定在距離第 3 號線 15 公分處，從維持上結構懸浮的最低重量持續加重，記錄每增加 2 克時，每條橡皮筋最後的實際長度並換算成拉力，繪製成折線圖(圖十六)。



圖十六、固定距離，重物重量改變之繩索拉力變化(作者自繪)。

當重物的施力點固定，逐漸增加重物重量，所以作為唯一往上提拉的第 3 號線需要增加拉力(圖十四)。以槓桿原理討論，由於施力點固定，重物重量逐漸增加，所以施力矩增加，抗力矩及抗力就必須跟著增加，因此第 1、2 號線的拉力逐漸增強，又因為重物重量逐漸增加，所以第 3 號線的拉力也隨著增加。

伍、 討論

根據前人的研究，三條線的張拉共構體沒辦法做出來(高滕悅等人，2021)，於是想驗證是否真的做不出來。首先根據前人的科展文獻做出四條線張拉共構體，並錄影把第四條線剪斷的瞬間，觀看張拉共構體會往哪個方向倒。最後得知上結構都是往後翻倒，於是開始在前端加上重物，後來可以得到穩定的三線式張拉共構體。

在第二個實驗中，仍在摸索三線式的張拉共構體穩定方式。使用第一代的三線是張拉共構體進行實驗(圖四左)，觀察到在上結構放置重物的位置是有趨勢的，放在越遠離第 1、2 號線的位置會越穩定，而且也有觀察到似乎離 1、2 號線越近的時候，需要的重物就會越重。

為了確定該現象與槓桿原理是否有密切的關聯，因此在實驗三又進一步的重新設計出第二代的三線是張拉共構體(圖四右)，以解決第一代無法懸掛砝碼、重物太重會往前倒的問題。藉此可以透過等距的孔洞來懸掛各種不同重量的重物來穩定上結構。觀察到懸掛的距離越遠，所需的物體重量就越輕，移往接近 1、2 號線的位置時，就會慢慢不穩定而倒下，需要繼續追加重物的重量，距離與追加的重量繪製在圖八的藍線(表一、圖八)。發現藍線呈現鋸齒狀，因為在實驗時每增加砝碼最小重量就是兩公克，所以當發現上結構不穩定而增加重量時，每一次就是兩公克，導致懸掛物品的重量與長度的積在圖八的折線圖中呈現鋸齒狀，而且距離越遠鋸齒就越嚴重。積在在該裝置的實驗中發現只要低於六十以下，張拉共構體的上結構就會越容易倒下(測到最小的積是 56)，只要重物與距離的積超過六十，積越大則越穩固。

雖然找到了最小重物重量使三線式張拉共構體保持懸浮，但是後來發現越接近最小重物時，越容易因為桌面晃動而倒下，所以以第 2 代的三線張拉共構體作了方便進行懸

掛物品的修改，在實驗四中追加 5、8 公分的橫移實驗(圖五)。發現隨著晃動幅度越大、懸掛重物位置距離 1、2 號線的距離越近，需要的物體重量越重(圖十)。

在實驗四中，發現一旦上結構前桿前端與第 3 號線及第 1 或第 2 號線連成一直線，上結構一定會倒塌(圖九)，於是在實驗五中又重新設計了第三代的三線式張拉共構體，主要是讓第 3 號線的位置可以任意被調整，輕量化的上結構以降低結構本身重量造成的干擾(圖六)。藉此研究第 3 號線位置與張拉共構體穩定性極限的關係。發現當第 3 號線位置距離前桿前端的距離越近(距離第 1、2 號線越遠)，就如之前實驗的，平衡所需要的重物重量就越大；另外，也發現當第 3 號線距離前桿前端越近，能夠承受的橫移幅度就會越小(圖十一)。

在之前的實驗，在實驗六中，用彈性物質替代繩索中部分的釣魚線，並量測在各種不同總長度下會產生的拉力(圖十二)。實驗發現第 3 號線的拉力比第 1、2 號線還高。在實驗六的重物移動實驗中，隨著重物增加重量且逐漸往第 3 號線靠近的過程中，為維持上結構水平，重物重量逐漸增加，可是重物與重物距離的積一直下降，從 650 下降至 330(圖十五)，透過槓桿原理以第 3 號線為支點為觀點來解釋，第 1、2 號線需要的拉力就會越來越小，並且在實驗結果亦得到驗證(圖十四)。

實驗六又加做一個實驗，固定重物位置，重量逐漸增加，所以重物重量與距離的積是逐漸增加的狀態。在此實驗中發現，隨著積的逐漸增加，第 1、2 號線的拉力總和也跟著逐漸增加(圖十六)，由於重物的重量一直在增加以及第 1、2 號線的拉力也在增加，所以第 3 號線的拉力也跟著一直在增加。

陸、 結論

根據前人的研究，有提到四條線的張拉共構體非常穩定，因此以四條線的張拉共構體為基礎，找出製作三條線張拉共構體的訣竅。四條線時，其中一條負責提吊張拉共構體的上結構，另外 3 條線負責往下拉住、固定上結構，使上結構不會傾斜或旋轉；當剩下 3 條線時，仍然需要一條線往上拉，剩下兩條線往下拉，平面物體需要三個著力點才能穩固，否則會出現傾斜倒下的問題，所以後來發現可以直接在原本第三個點加上重物，

充當往下的拉力，就可以讓物體懸掛起來。

用物體重力當作向下拉力會有一個缺點，就是沒有橫向穩固上結構扭轉的力，會變得不穩固、容易左右晃動。經過這次實驗，我們預測：如果持續想辦法用地心引力減少線的數量，有機會做出只有兩條線的張拉共構體，但是會變得比較不穩定。

在研究三線式張拉共構體的過程中，發現如果要作出穩定的三線式張拉共構體，有一些條件需要滿足：

第 1 個條件：上結構的前桿前端要設計得比較長，用以懸掛重物，懸掛的重物重量與距離第 3 號線距離的積需要維持在一定的數值以上才能避免上結構倒下。如果前桿夠重，就可以取代懸掛重物的重量。

第二個條件是上結構的槓桿現象。懸掛物距離第 3 號線的距離越長，保持上結構穩定所需要的重物重量就越輕、第 3 號線的拉力負擔比較小、對於晃動的忍受極限比較高；越近則需要越重的懸掛物。

第三個，懸掛比較輕的懸掛重物時，上結構比較不能承受太大的搖晃幅度。懸掛比較重的懸掛物有助增強張拉共構體側向搖晃的忍受強度。

第四個，發現不管懸掛的重物多重，只要張拉共構體上結構前桿、第 3 號線和下結構的三角形邊緣形成直線會倒下，也就是說第 3 號線與 1、2 號線的位置也會影響上結構發生側向搖晃時的忍受範圍。也就是說第 3 號線的位置越接近第 1、2 號線的連接處，上結構越穩定；如果第 3 號線的位置離第 1、2 號線距離越遠，上結構越不穩定，容易因為一點點晃動，就倒下來了。經過這些實驗發現，設計出來的第三代三線式張拉共構體，只要第 3 號線越靠近第 1、2 號線，則越穩固。

原本想使用釣魚線全部更換成彈簧，運用虎克定律，用彈簧替代釣魚線來測量三線式張拉共構體拉力，但後來發現張拉共構體以彈簧代替釣魚線時，因為彈簧拉長時增加的拉力不夠多，無法對上結構產生足夠的反應拉力，導致沒辦法上結構沒辦法穩定的懸浮並倒下。最後，將釣魚線兩端綁上釣魚線以取代原本的釣魚線並成功使上結構懸浮，透過迴歸曲線的公式將繩索總長度回推拉力，觀察到懸掛的重物重量以及與第 3 號線的距離確實是有槓桿原理的現象。隨著重物的增加會使第 1、2、3 號線繩索的張力增加，

其中第 3 號線承擔了第 1、2 號線張力以及重物、上結構重量的所有反作用力；重物遠離第 3 號線可以減緩第 3 號線的張力，轉移到第 1、2 號線，但是要適時地將第 1、2 號往外延伸以增加抑制晃動的能力。

柒、 參考文獻資料

高滕悅、胡起元、陳品萱、邱秀蓮(2021 年)。破解反重力懸浮數-運用力的平衡對抗重力。

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會作品說明書。取自

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-080108.pdf?0.17991876020096242>

戴明鳳(2022 年)。張拉整體結構的發展史與其應用。科學研習月刊，61-01。取自

<https://www.ntsec.edu.tw/monthly/detail.aspx?a=19208>

彈力(2023 年 2 月 7 日)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B9%E5%8A%9B>

虎克定律(2024 年 2 月 12 日)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%83%A1%E5%85%8B%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第五冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。

康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第八冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。

【評語】 080113

本作品探討張拉共構體穩定性。根據 2021 年科展談到三條線無法利用張拉效應產生平衡的共構體，發想而試著產生出穩定的三條線張拉共構體。

文獻回顧除了介紹張拉效應以外，也提到自然學科教材有教到三條線張拉共構體相關知識。

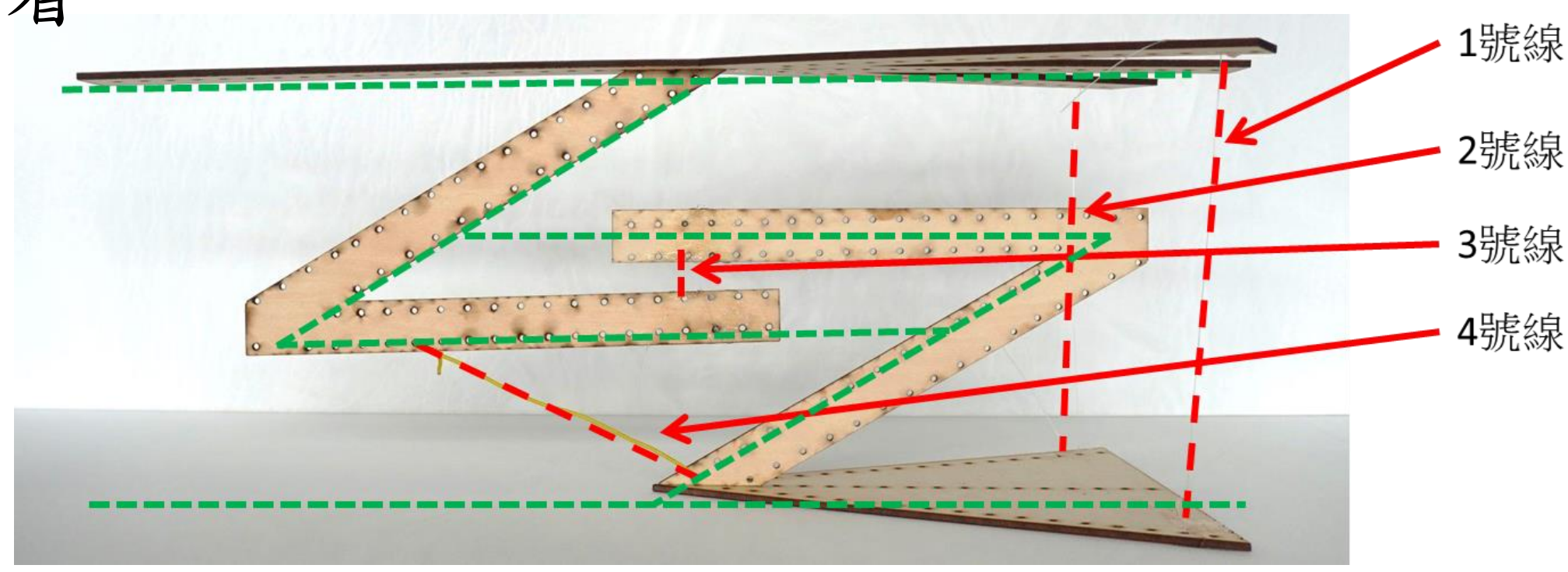
研究內容詳細說明實驗過程，力的分析，穩定的測試，提問及觀察，最後做出成果。對於研究領域有所貢獻。本研究能提出問題並尋找解決方案，不失為有創意而完整的探索。

作品簡報

三線式張拉共構體 穩定性研究

摘要

1. 張拉共構體以常見的細繩使一個結構漂浮在半空中，想了解張拉共構體當中的原理。
2. 前人研究提到三條線的張拉共構體做不出來，想挑戰看看。
3. 發現製作穩固的三線式張拉共構體方法及注意事項：
 - 1) 三線式張拉共構體需要在上結構追加重物才能讓它穩定不翻倒。
 - 2) 三線式張拉共構體的上結構有槓桿原理的特性。
 - 3) 懸掛的重物越重，越能夠承受一定程度的橫移晃動。
 - 4) 第3號線位置越接近第1、2號線使上結構可以承受較大的晃動。



圖一、張拉共構體四條線之編號。張拉共構中隱藏互字(綠線)(作者自攝、自繪)。

動機

1. 用日常生活中常見的細繩上下連接兩個物體，物體能懸浮在半空中，產生強烈的視覺衝擊。
2. 繩子看起來是由上往下拉，卻能讓物體懸空，感到很驚奇，因此定了張拉共構體這個題目。
3. 前人科展研究提到四條線以上才能平衡^{*1}，我們想挑戰做出更少線的張拉共構體。

文獻回顧

1. 張拉共構體又稱張拉整體，在20世紀中期被美國理查·巴克敏斯特·富勒創造的特殊力學結構^{*2}。
2. 透過繩線的「張力」來形成「拉力」。上下結構透過繩子構成看起來懸浮的共構體(載明鳳，2022年)^{*3}。
3. 富勒：「以自然的機構，能運用最少的元素，形成堅固的結構。」前人科展研究張拉共構體^{*1}，發現張拉共構體一定會有「互」字形的結構(圖一)、要四條線以上才能達到平衡^{*2}。
4. 自然課本提到地心引力也是力以及繩子兩端的拉力大小相同、方向相反，物體就會達到平衡。^{*5}結構穩定的張拉共構體，此時這些張力彼此達到平衡(如圖一)。我們的研究還運用到槓桿原理，被物體給施力的點稱為施力點，抵抗整個槓桿的力是抗力點，抗力點到支點的距離是抗力臂，施力點到支點的距離則是施力臂，當抗力的大小乘以抗力臂與施力的大小乘以施力臂相等就會平衡^{*6}。

目的

1. 找出三線式張拉共構體的製作方法。
2. 了解張拉共構體的繩索以及結構的特性，找出穩定的製作方法。

研究設備與器材

1. 設備：電子秤、電腦、簽字筆、照相機、雷射切割機、直尺、剪刀、小刀、砝碼(20g)、砝碼(2g)、鉛塊
材料：3D列印材料PETG 1.75mm、電線、熱熔膠條、彈簧(10X80mm)、釣魚線、快乾CA-260、快乾加速劑、KT板(5mm)、椴木板(3mm)、吸管、彈力飛機專用橡皮筋繩

研究過程

整個實驗過程串接以下目標：做出三條線的張拉共體、研究此共構體的力學特性，並做出更穩定的三線式張拉共構體。為了方便研究，過程中使用了初代、三代的共構體設計。

表一、每一代張拉共構體外觀、探究用途(作者自攝、自繪)。

代數	初代	第一代	第二代	第三代
圖像				
階段	實驗一	實驗二	實驗三、四	實驗五、六
研究項目與方向	實作張拉共構體，並觀察每條線用途。改良成三條線。	1. 以初代為原型，重新設計。 2. 重物與距離的初步觀察。	1. 為方便懸掛多個砝碼，將上結構改切方孔。 2. 研究重物重量、距離與三線式張拉共構體懸浮關係。 3. 觀察重物重量與該共構體晃動極限關係。	1. 重新設計第三代，第3號線可以移動位置。 2. 第3號線與第1、2號線距離對穩定度(晃動極限測試)的影響。 3. 研究重物重量、三條線之張力關係與狀態。

研究方法及結果

實驗一、三條線的張拉共構體真的做不出來嗎

目的：驗證是否真的做不出來三條線以下張拉共構體，並找出製作方法。

觀察及提問：製作四條線的張拉共構體，剪掉其中一條線，觀察變化並修改。

方法：

1. 以前人研究的四線式張拉共構體做基礎^{*1}，用KT板(魔術板)製作出四線式張拉共構體(圖二左)。
2. 將初代的第四條線弄斷，觀察它的反應(圖二中)。
3. 適當調整，直到剩下三條線的共構體可以懸浮。

結果：

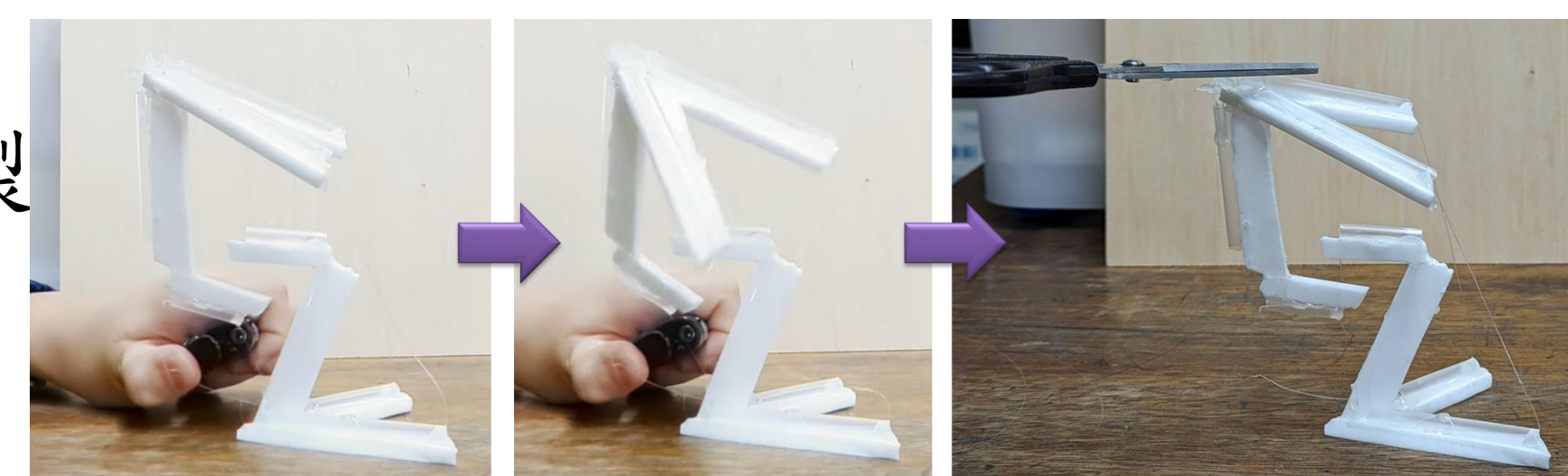
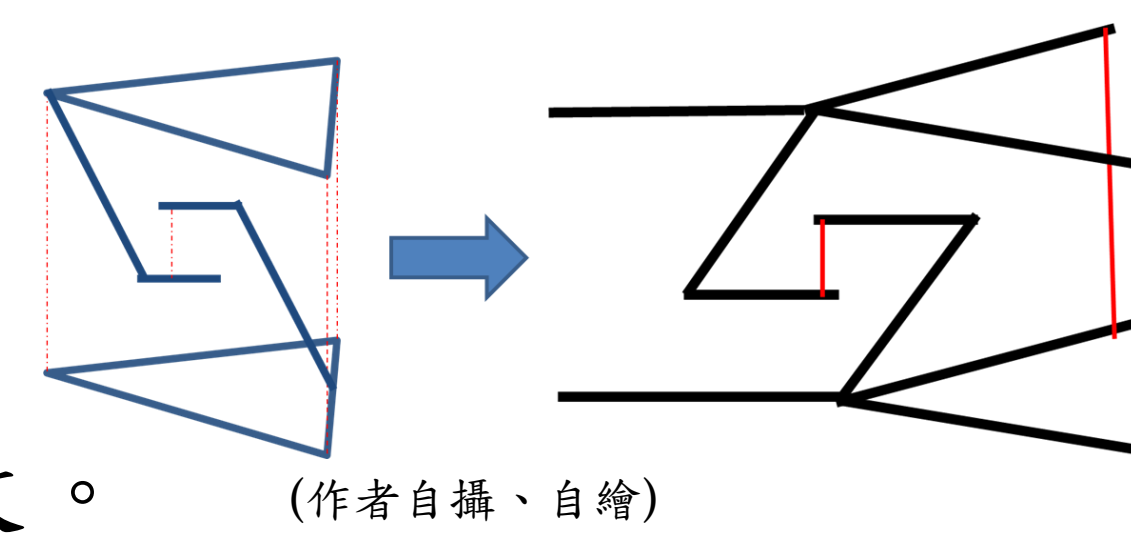
1. 剪斷後，上結構會先往後上方移動，在馬上墜落。初步認為是因為拉力不見，所以才會往上彈。
2. 開始在上結構放上筆芯盒、橡皮擦等物。最後放上比較重的橡皮擦，它竟然穩定懸浮了(圖二右)。
3. 弄斷第1、2、4條線，都是發生往另一邊傾斜；弄斷第三條則是直接墜落。
4. 將初代作為原型，以Tinkercad設計實驗用張拉共構體，並用釣魚線連接，進行接下來的實驗。

實驗二、張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

目的：在實驗一有疑似槓桿原理的現象，重物放得越邊緣，越穩定。進行放置位置與重量的觀察。

實驗方法：

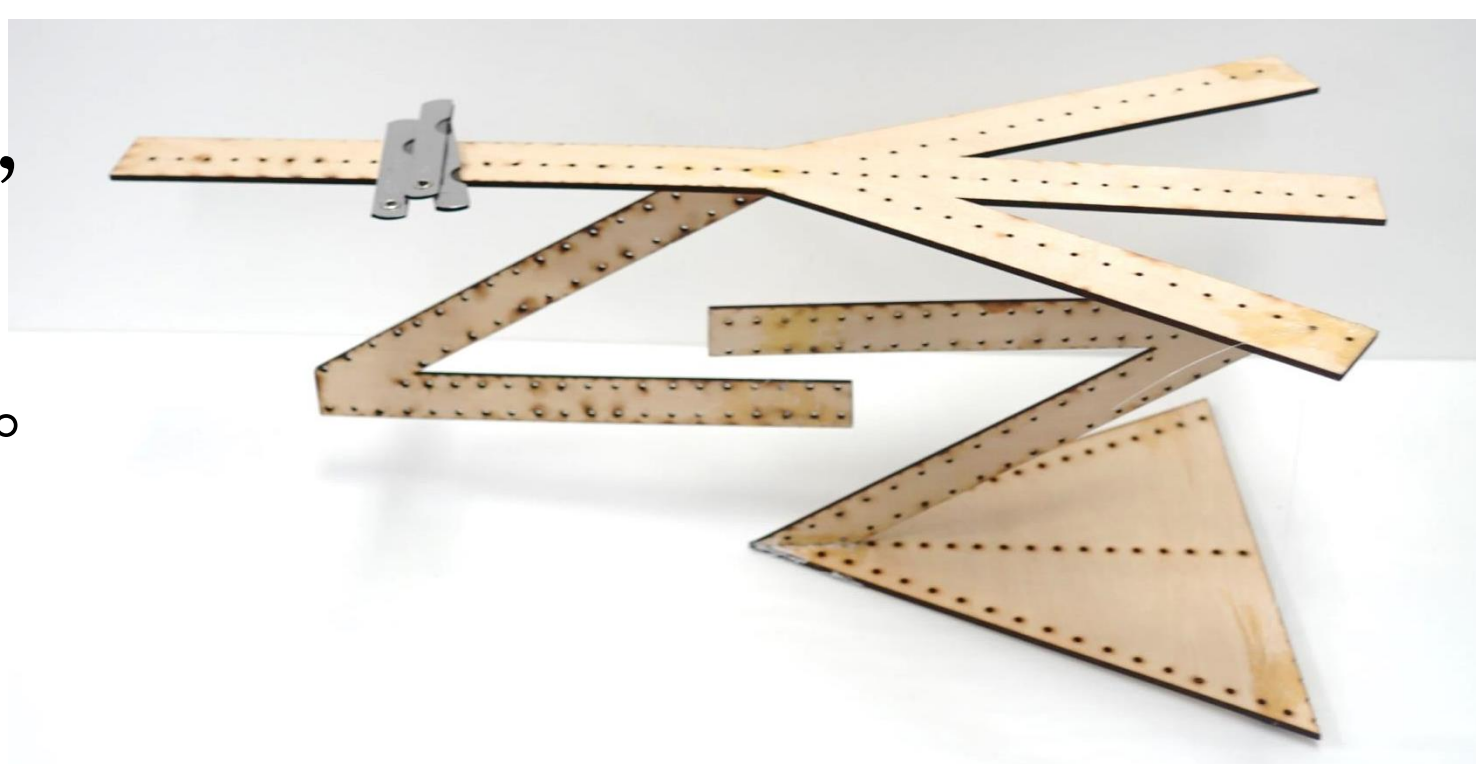
1. 假設：重物懸掛在前桿前方，會比後方的重量還輕。重物往第三條線位置靠近，上結構會倒下。
2. 將重物放在前桿中間處，逐漸加重。使其剛好穩定不倒下(圖三)。
3. 將重物(三支小刀)移往前桿前端，觀察是否倒下。移往前桿後端放置，觀察是否倒下。



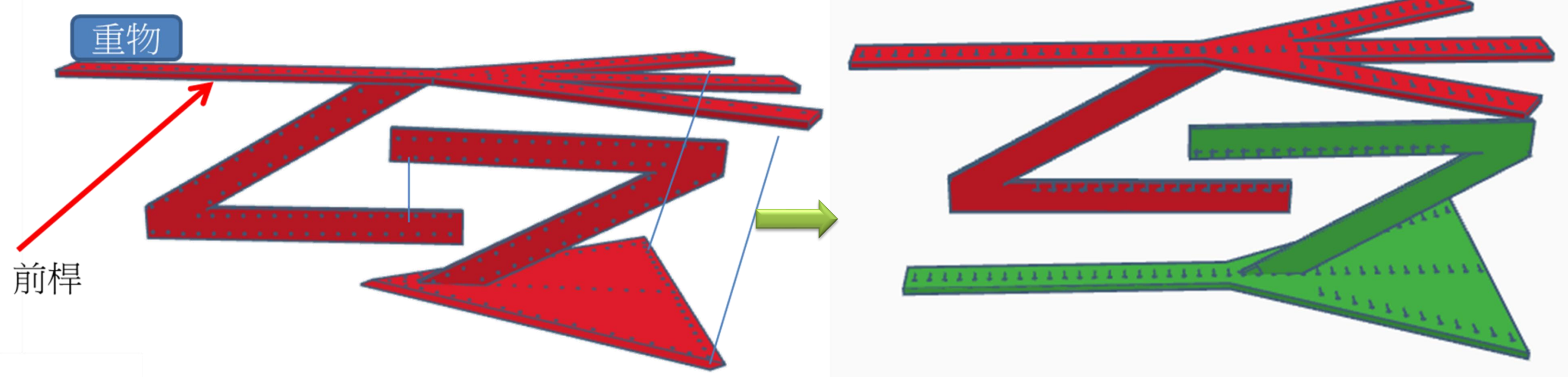
圖二、弄斷第四條線，上結構會往後墜落，加重後會繼續懸浮(作者自攝、自繪)。

結果：

1. 第一代張拉共構體以初代設計線條化，缺乏位置標示、第三條線定位、對稱設計。此實驗以特性觀察、研究為主。
2. 前桿中間放置三支小刀，剛好使張拉共構體的上結構可以懸浮在上面。
3. 三支小刀往前挪移時，仍不會倒下，但有注意到晃動變小了，比較穩定。
4. 三支小刀往第三條線逐漸靠近，上結構就會倒下來。
5. 實驗中，注意到某一種規律性，重物越靠近前端會越穩定，重物越靠近第三條線，則越不穩定。有點像槓桿原理，所以下一步要觀察每一個位置的砝碼，至少要多重才能使上結構懸浮。
6. 為了可以觀察前桿每一個位置所需的重量，重新設計張拉共構體。上結構加裝等距的大量方形孔、底座往前延伸，避免重物懸掛導致往前倒下(圖四)。



圖三、測試中的第一代張拉共構體(作者自攝)。



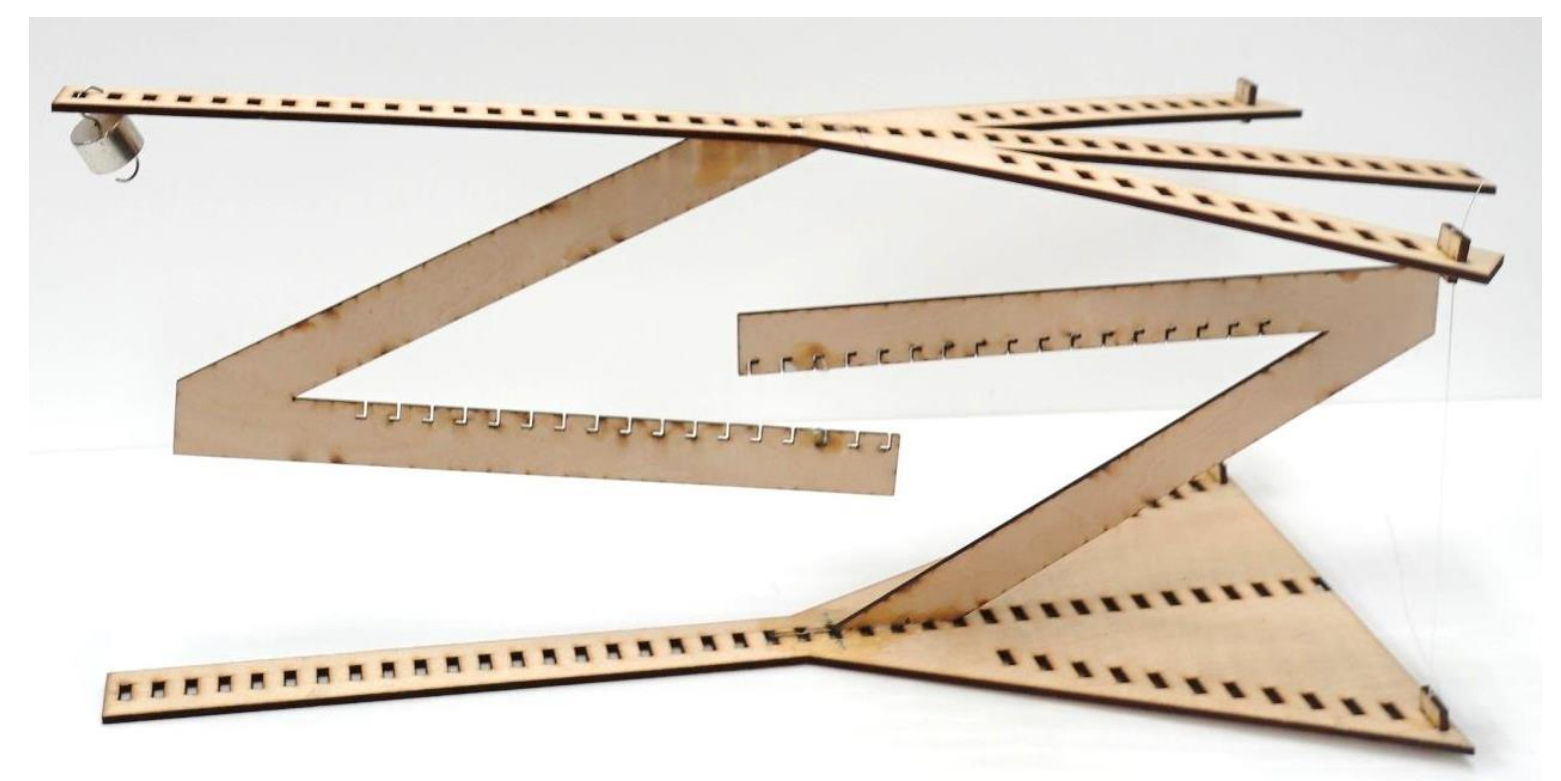
圖四、圖左為第一代張拉共構體，圖右為第二代。主要是上結構的圓孔改成方孔且等距。底座增加往前延伸的結構，避免重心不穩(作者自繪)。

實驗三、張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

目的：前端加重量，只要很輕的物品就能保持平衡；越靠近第三條線位置，需用更重的物品。想確認，物體與距離和重量平衡的關係，是否有槓桿原理的現象。

實驗方法：

1. 假設：重物的重量與重物到第三條線距離的積，會有一個臨界值。且重物越靠近第三條線，所需的重量就會越重。
2. 操縱變因：重物到第三條線的距離。應變變因：保持懸浮的最小重量。
3. 用Tinkercad設計並雷切。用快乾將上、下結構組合。(圖五)
4. 用釣魚線於第三條線以上、下結構懸浮、不接觸的狀態進行黏合。
5. 將上結構以懸浮姿態固定。第一號線用快乾以釣魚線黏合，再黏第二號線。此時的張拉共構體仍然會往後倒。
6. 開始在前桿上逐漸增加重量，直到上結構懸浮不會倒為止。紀錄該距離所需的最小重量。

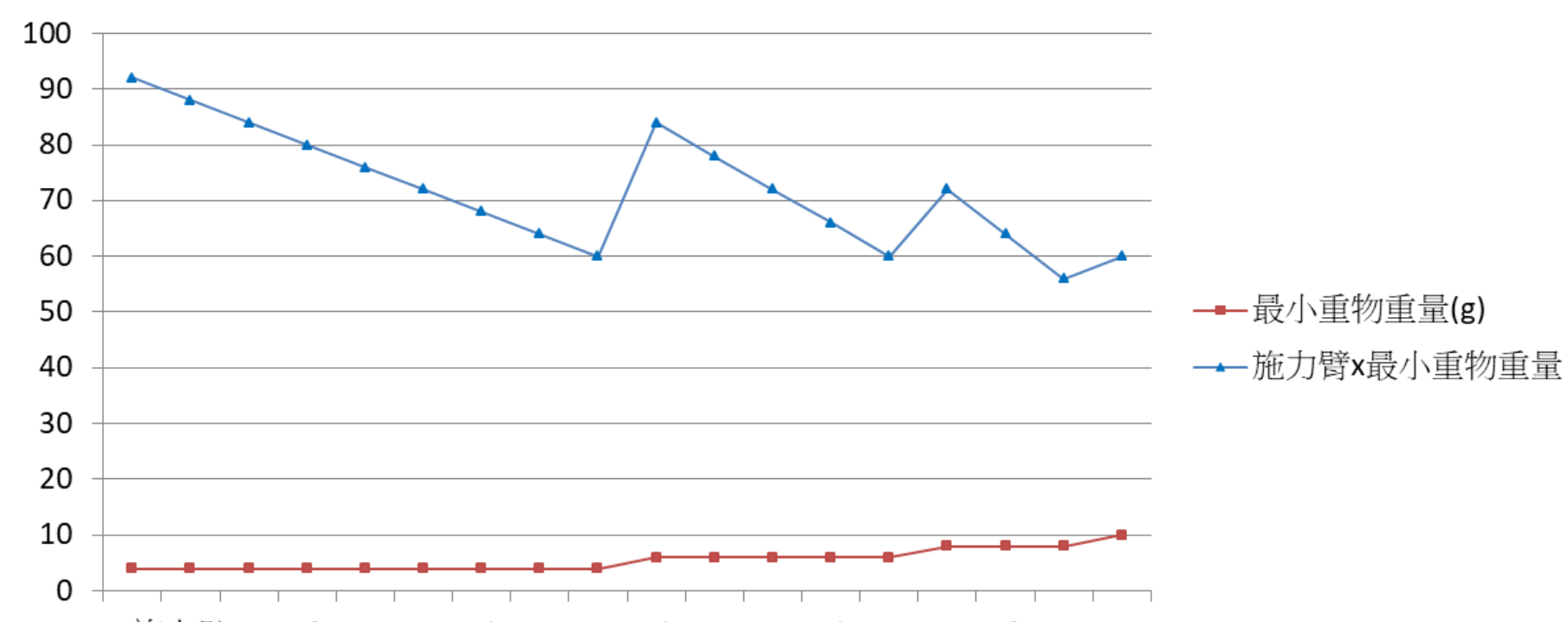


圖五、第二代張拉共構體(作者自攝)。

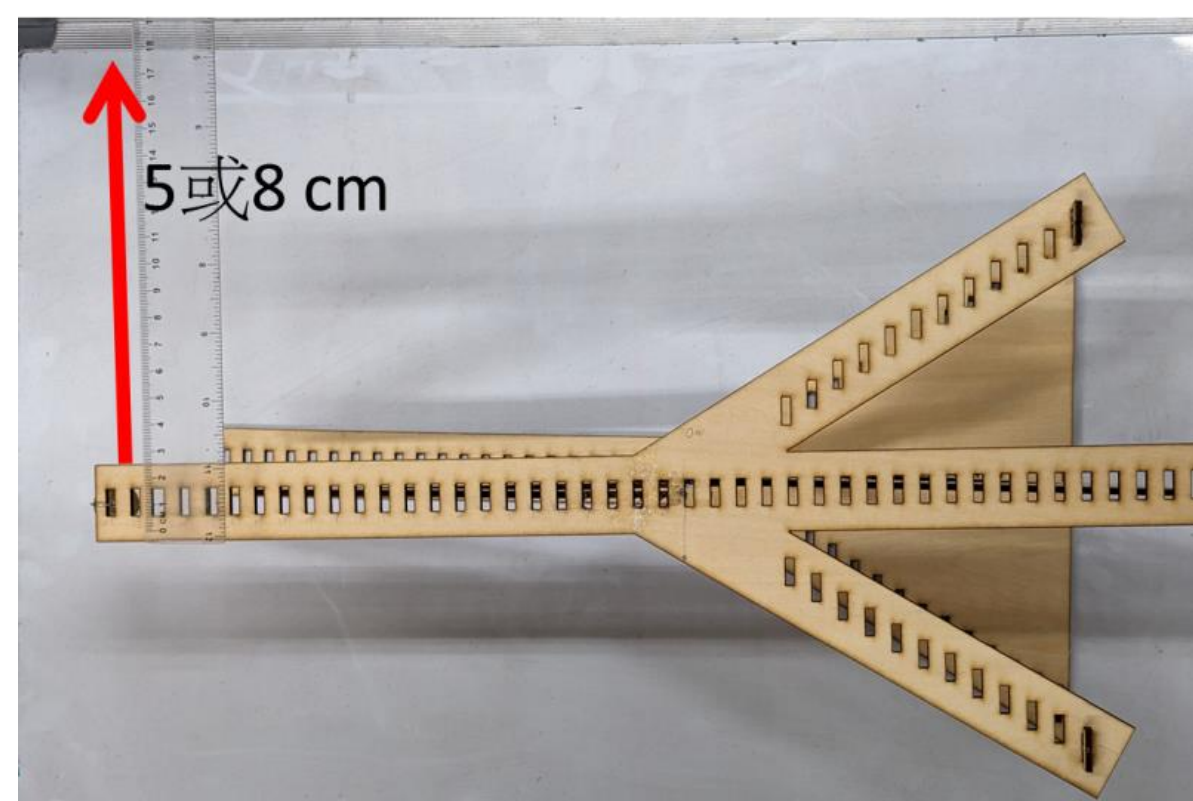
結果：

1. 將記錄下來的數據全部轉換成折線圖(圖六)。
2. 前桿前端的重物重量隨著施力臂越短，所需的重物重量就越重。
3. 藍線呈現鋸齒狀，是因為在實驗時每增加砝碼最小重量就是2公克，若能找出更小的重量，線可能會呈現直線。
4. 若施力臂與最小重物重量的積低於六十以下的臨界值。張拉共構體的上結構就會倒下(測到最小的積是56)。
5. 經過該實驗，無意間發現晃動會造成臨界重量的上結構容易倒下。似乎會隨著重量增加而穩定。所以又重新設計了第二代的張拉共構體，改善重心不穩、缺乏懸掛點的問題。以進一步進行晃動的穩定性研究。

施力臂長度與最小重物重量關係圖

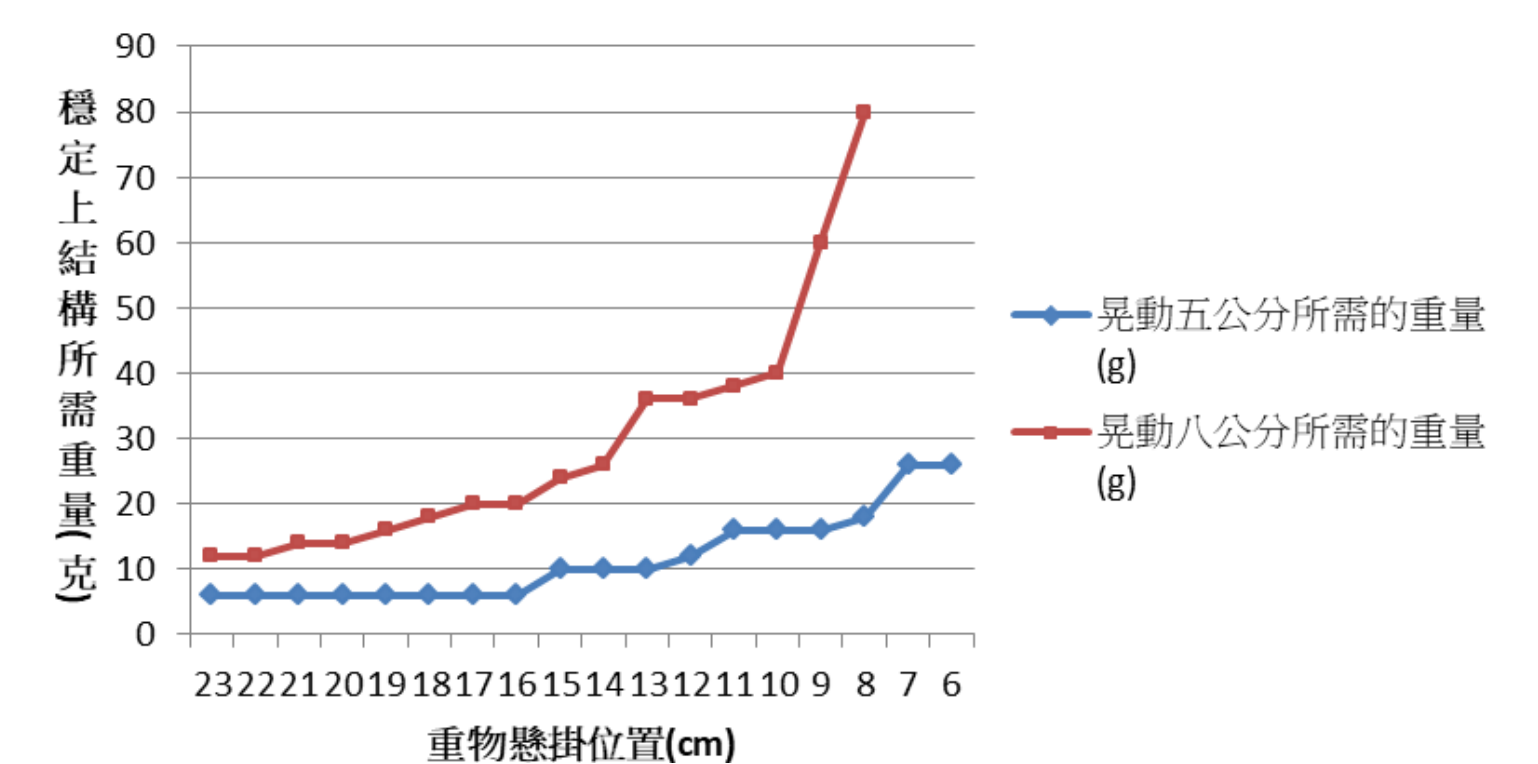


圖六、最小重物重量、施力臂長的積與重物位置關係圖(作者自繪)。



圖七、晃動實驗的移動方式(作者自攝、自繪)。

晃動實驗測試圖



圖八、晃動實驗之重量與位置關係(作者自繪)。

實驗四、前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響

目的：找出最穩定的三線式張拉共構體結構比例。

設計及製造：以第一代的張拉共構體為設計原型，為了方便懸掛砝碼，所以上結構改成大量的方孔，方便懸掛。為了避免加重物時，整個共構體傾倒。所以底座再進一步往前延伸(圖五)。

假設：上結構晃動越大、重物到第三條線的距離越短，張拉共構體上結構所需的前桿重物就越重(配置方式如圖七)。

實驗方法：

1. 操縱變因：重物到第三條線的距離和上結構的晃動幅度。應變變因：重物重量。
2. 張拉共構體前桿上加重物，前方放一把尺，橫向推動到五或八公分，若倒下就追加重物，紀錄每個位置的最小重量(如圖八)。

結果：

1. 晃動越大，所需重量越重。懸掛物越重、距離越遠，則上結構越穩定。
2. 發現距離越遠，重物的最小重量就會越輕，符合槓桿原理。

實驗五、晃動極限測試

目的：找出最穩定的三線式張拉共構體結構比例。

設計及製造：製作第三代張拉共構體，做成橫向的T形，讓上下結構一樣並做出等距長方孔，第三條線機構改成活動式(圖九)。

假設：第三條線位置越靠近前桿前端，晃動幅度就越小。

實驗方法：

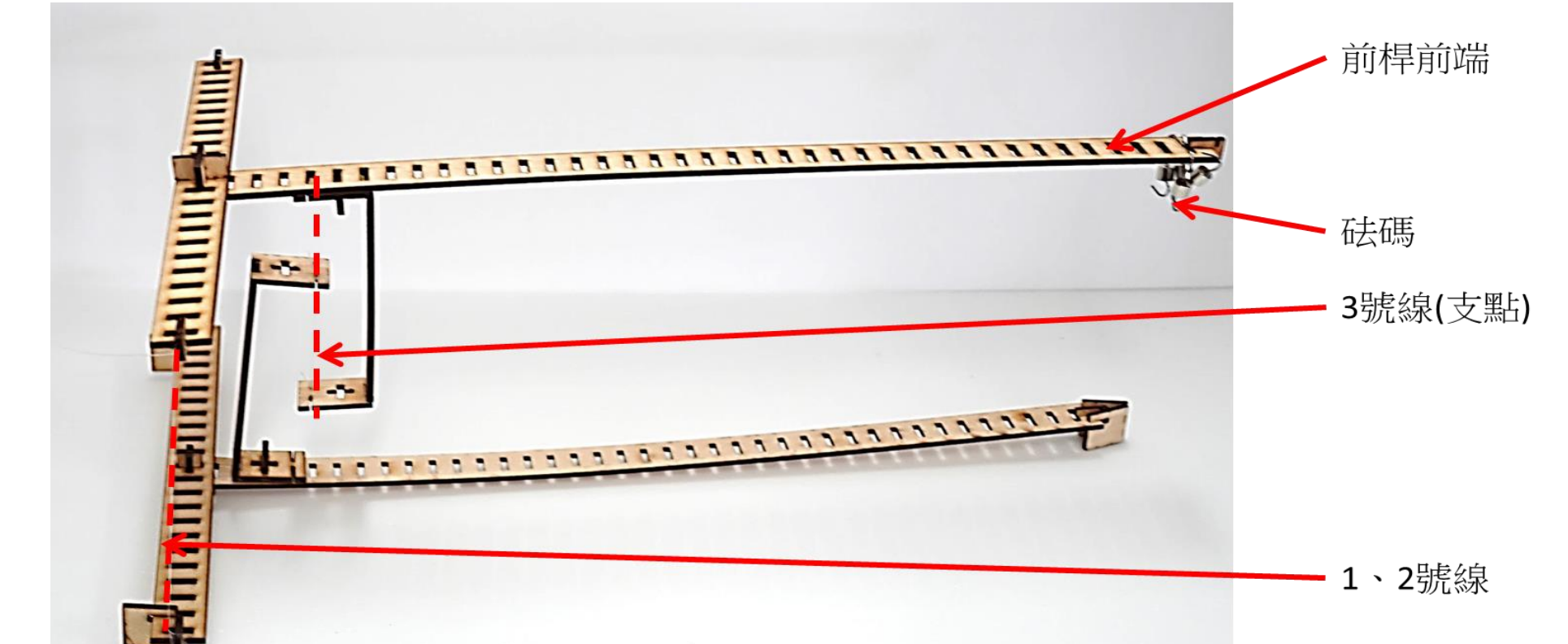
1. 操縱變因：第三條線的位置(數字越大，距離越近)。
2. 應變變因：重物重量、晃動最大幅度。
3. 在Tinkercad上重新設計張拉共構體，上下結構呈T形，移動式第三條線機構。
4. 以橫向推動前桿前端，觀察並記錄前桿前端位置移動的極限，並逐漸移動第三條線往前桿前端，測試每個位置點的幅度晃動實驗。

結果：

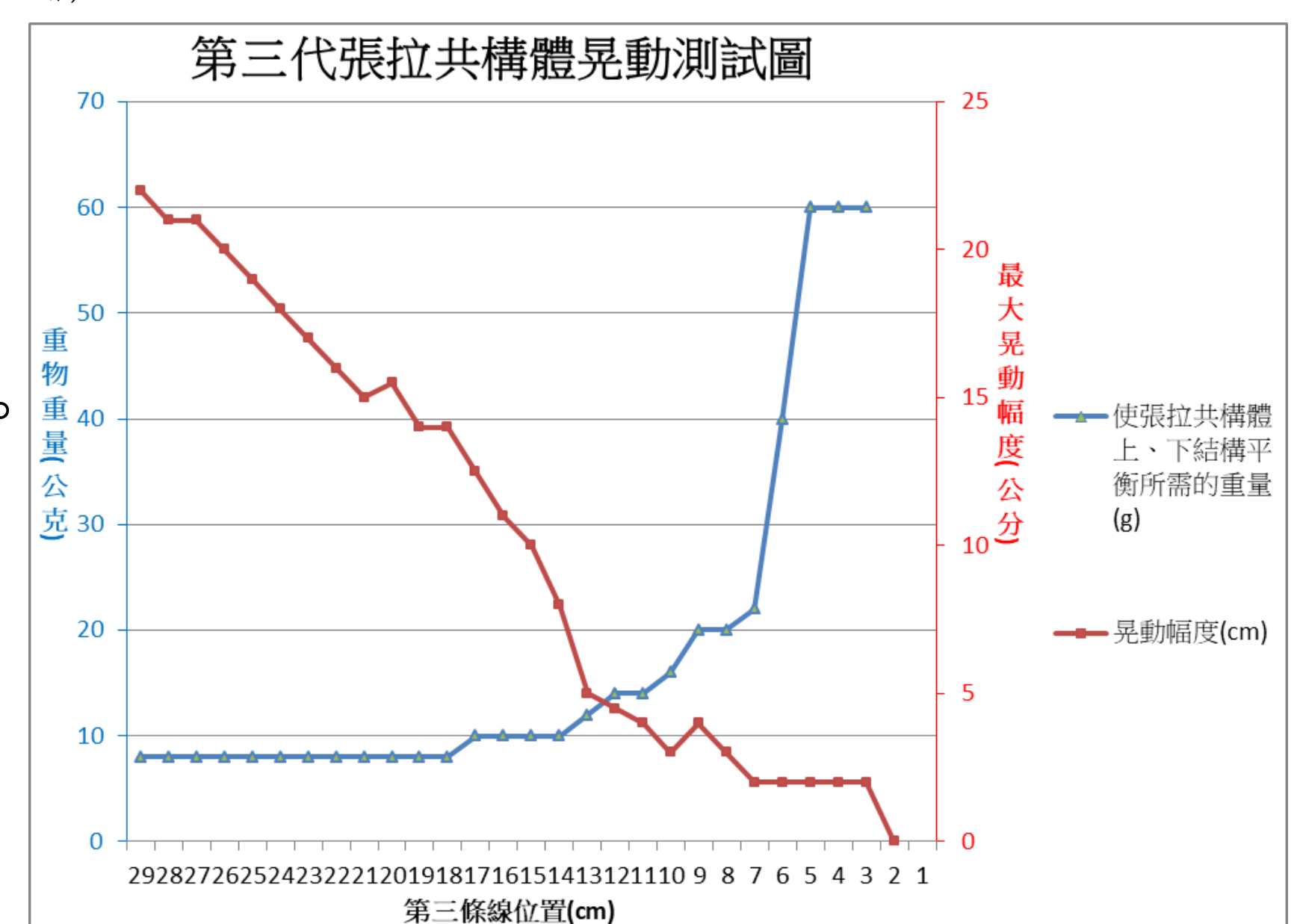
1. 如圖十，第三條線位置數字越大代表離前桿前端越近。
2. 張拉共構體第三條線在前桿前端時越不穩固，忍受的晃動幅度就越小，重物需要越重。在第28、29公分，甚至無法使張拉共構體平衡。

表二、重物在張拉共構體前桿位置的影響(作者自繪)。

重物位置	前桿前端	前桿中間	前桿接近第三條線
重物數量		三支小刀	
上結構懸浮狀況	保持懸浮	剛好懸浮	倒下



圖九、第三條線可移動之張拉機構(作者自攝、自繪)。



圖十、第三條線對張拉機構穩定性影響(作者自繪)。

實驗六、使用彈性材質去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力

目的：運用虎克定律^{*3、4}，用彈簧及橡皮筋替代釣魚線來測出拉力。

假設：1.隨重物離第3號線的距離越短，重物就會越重，以至於第3號線會被拉長。

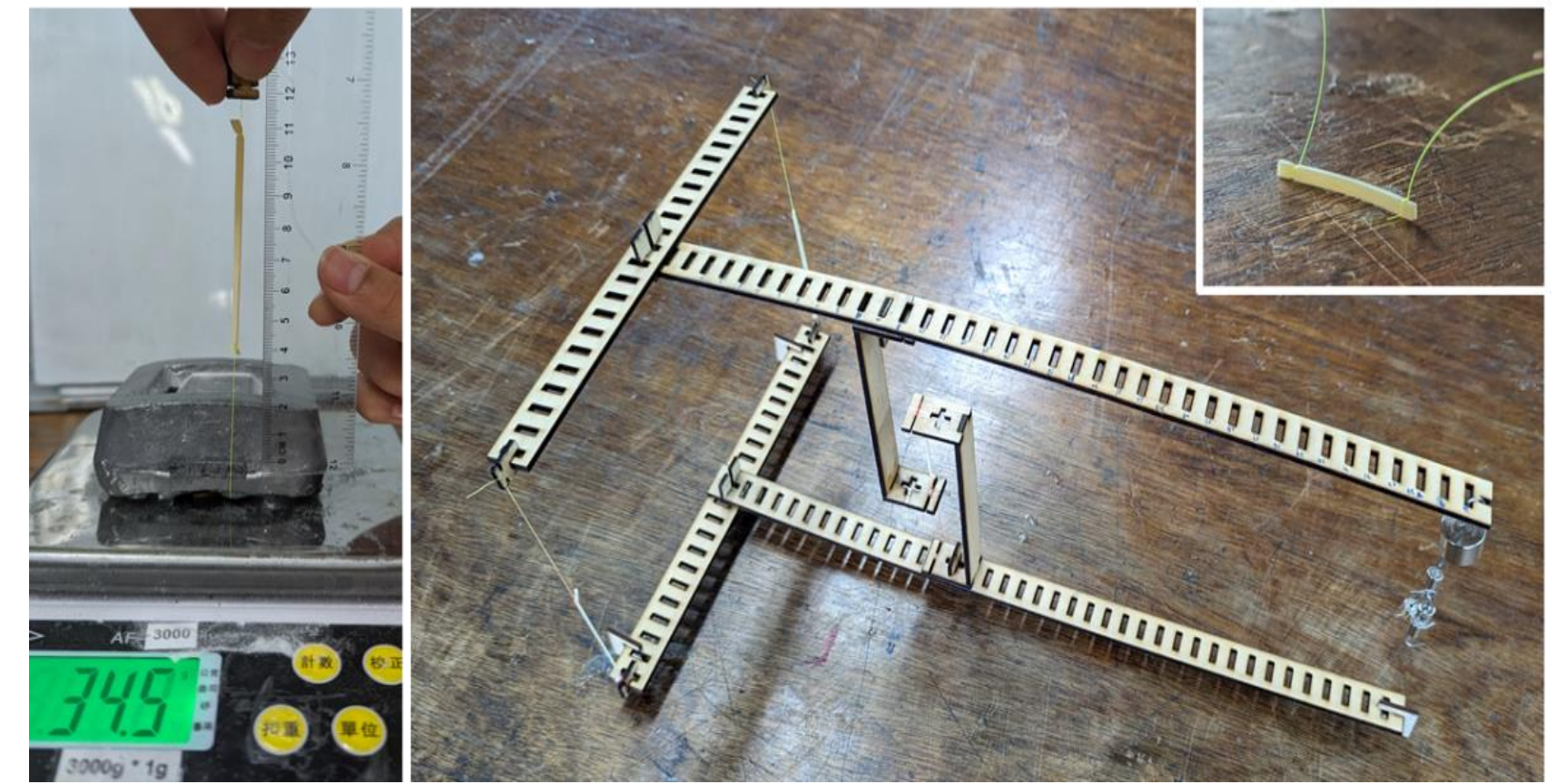
2.第1、2號線的拉力不會有明顯改變。

設計原理：釣魚線加入橡皮筋，張拉共構體穩定下，彈性材質隨著重物移動及增重而長度改變。

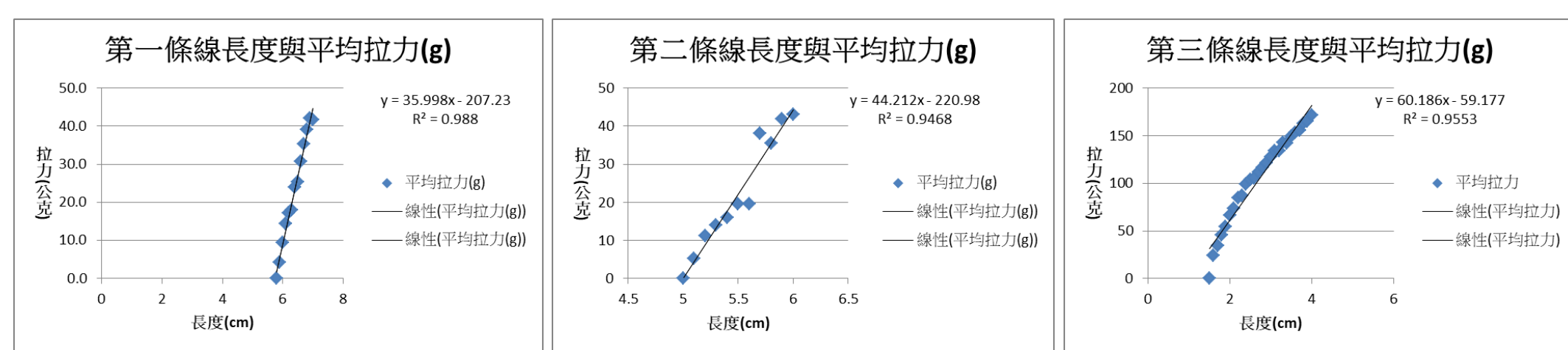
拉伸越長拉力就越大。透過虎克定律回推當時每一條線的拉力。藉此觀察每一條線拉力的關係。

方法：

- 1.發現彈簧伸長長度增加，增加的拉力不夠支撐整個上結構，於是將彈簧改成伸長一樣長度可以產生更大張力的橡皮筋。
- 2.釣魚線綁在橡皮筋兩端，橡皮筋一端壓上重物然後扣重，紀錄每次橡皮筋多伸長0.1公分時所增加的拉力(圖十一左)，先繪製出三個橡皮筋拉升長度與拉力關係圖(圖十二)。
- 3.第3代張拉共構體的釣魚線改成橡皮筋(圖十一右)，紀錄砝碼在每個位置讓上、下結構保持水平所需的重量，和每一條線伸長長度(圖十三)。將重物固定位置，並持續加重，記錄每加2克時，橡皮筋所改變的長度(圖十五)。



圖十一、用橡皮筋測量繩子張力。右上為釣魚線綁在繩子兩端。左圖為測量橡皮筋伸長長度及拉力關係(作者自攝)。

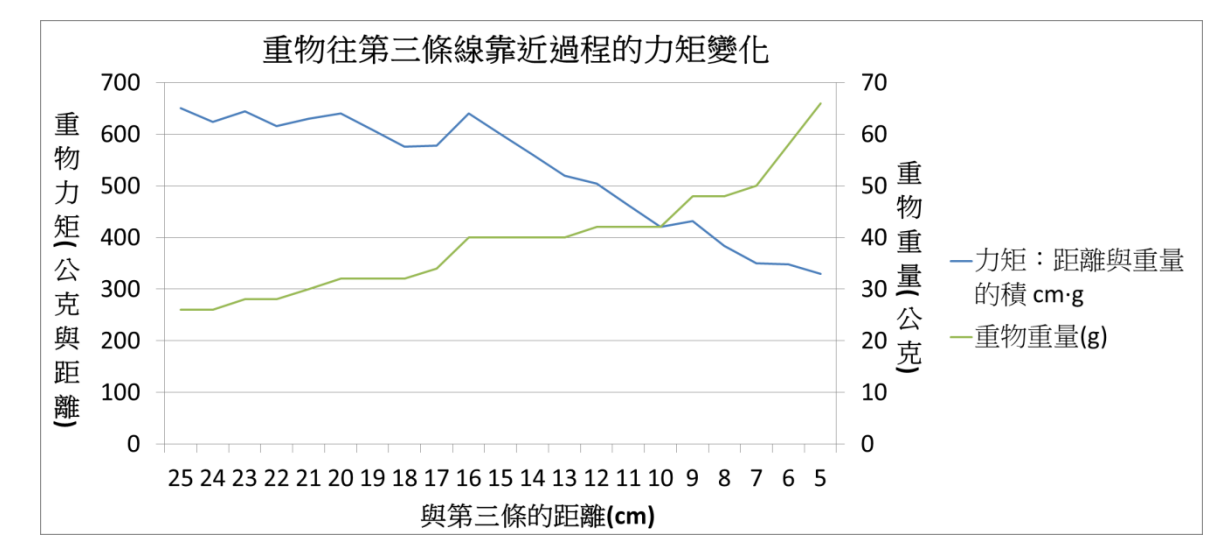


圖十二、橡皮筋與拉力的回歸曲線圖(作者自繪)。

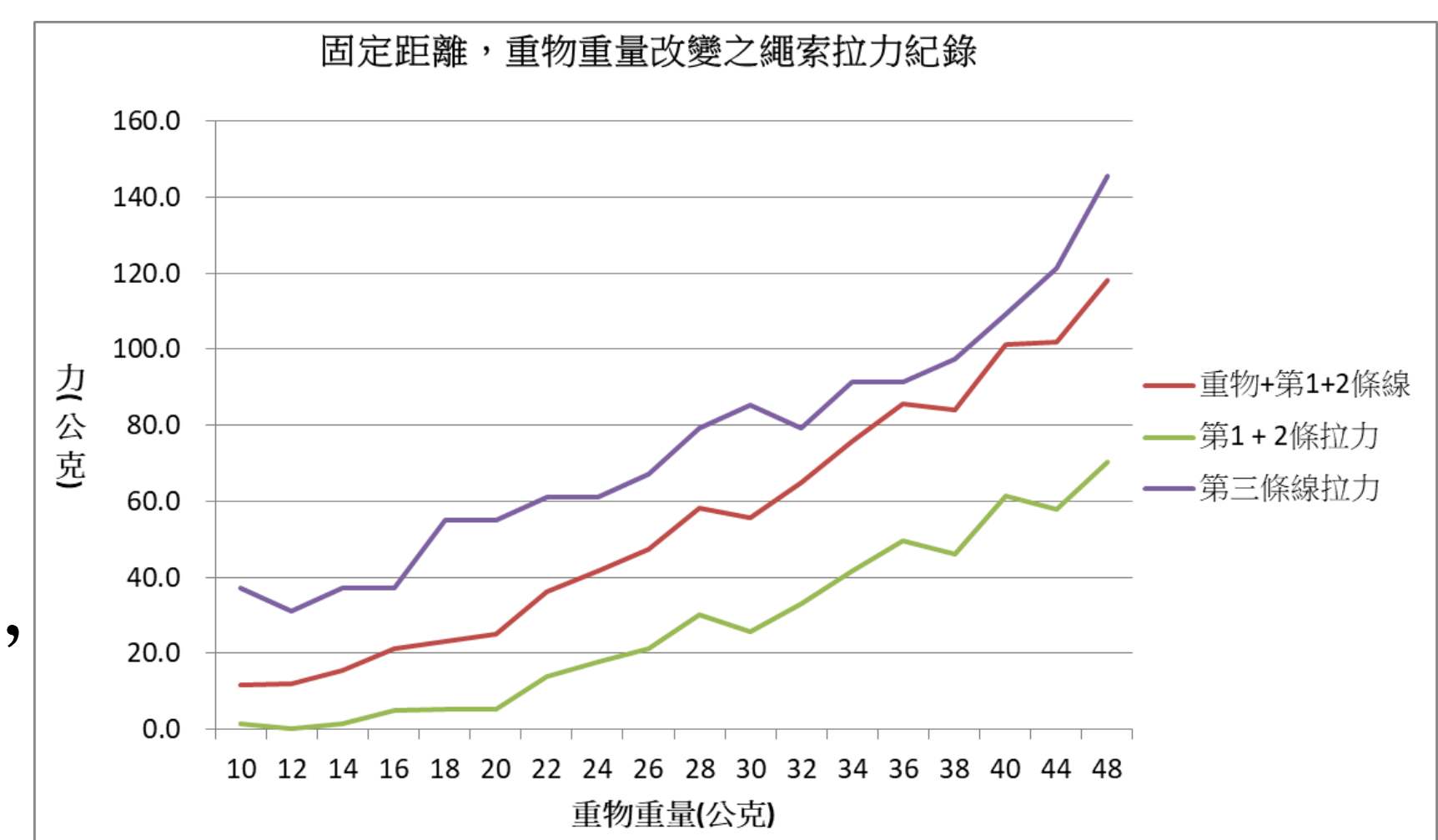
結果：

- 1.重物以最小重量靠近第三條線，重量逐漸增加，以第3號線為支點，則移動過程中的力矩是逐漸下降(圖十四)，第1、2號線拉力也跟著減少，所以整個往下拉的力幾乎被抵消，因此第3號線的拉力沒有明顯變化。
- 2.重物+1+2的力略低於第3號線拉力，平均差距20公克，研判是上結構重量(20公克)所致(圖十三)。
- 3.重物固定離第3號線15公分處，上結構懸浮的最低重量持續加重，每增加2克，紀錄每條橡皮筋實際長度並換算成拉力，繪製成折線圖(圖十五)。
- 4.重物重量逐漸增加，施力矩增加，抗力矩跟著增加，因此第1、2號線拉力增強，第3號線的拉力也隨著增加。

圖十三、第1、2號線相加的力或重物、第1、2號線的力相加關係圖(作者自繪)。



圖十四、根據圖十三，隨重物放置位置越靠近第3號線，力矩逐漸降低(作者自繪)。



圖十五、重物固定位置逐漸增重，各繩索的拉力變化(作者自繪)。

討論

- 1.前人研究，三條線的張拉共構體做不出來^{*1}。本實驗以四條線張拉共構體為基礎，把第四條線剪斷，發現上結構都是往後翻倒。於是開始在前端加上重物，成功做出三條線張拉共構體。
- 2.第二、三實驗，發現在上結構放置重物的位置與重量是有趨勢的。重物離第1、2條線距離越遠會越穩定；重物移往接近1、2號線的位置，就會慢慢不穩定而倒下，需要繼續追加重物重量。
- 3.圖六的折線圖中，距離與重量的積只要低於60以下，張拉共構體的上結構就會不穩定倒下。
- 4.實驗四，穩定度測試發現物體越重而上結構對橫移的距離忍受度越大。第二代的張拉共構體進行5、8公分的實驗五的橫移實驗。隨著晃動幅度越大，重物與1、2號線的距離要越短、需要的重量越重。
- 5.實驗五，第三代讓第三條線的位置可以被調整。研究第三條線位置與張拉共構體穩定性的關係(圖十)。當第三條線距離前桿前端距離越近，平衡所需要的重物重量就越大、能夠承受的橫移幅度就會越小。
- 6.實驗六，運用虎克定律，使用橡皮筋替代釣魚線來測出拉力。觀察到第3號線平衡了第1、2號線拉力、重物及上結構的重力。重物重量增加會因為槓桿原理造成第1、2號線的拉力增加，同時第3號線也會因為重量增加而跟著增加。

結論

- 1.以四條線張拉共構體為基礎，找出製作三條線張拉共構體的訣竅。三條線時，一條提吊，兩條下拉。原第三個點改掛重物，充當往下的拉力。
- 2.用物體重力替代下拉力會有缺點：沒有橫向穩固上結構扭轉的力，會變得不穩固、容易偏轉。
- 3.我們預測：持續用地心引力減少線的數量，可以做出兩條線的張拉共構體，但是會比較不穩定。
- 4.要作出穩定的三線式張拉共構體，需要：
 - (1)前桿前端要懸掛重物，懸掛的重物重與距離的積在一定的數值以上才能穩定。
 - (2)懸掛物距離越長，所需要的重物就越輕；越近則越重。
 - (3)懸掛比較輕的懸掛重物時，上結構比較不能承受太大的搖晃幅度。越重則忍受力越強。
 - (4)第三條線與1、2號線的距離會影響上結構的穩定。越接近第1、2號線連接處，上結構越穩定。
- 5.橡皮筋兩端綁上釣魚線以取代原本的釣魚線並成功使上結構懸浮，透過迴歸曲線回推繩索拉力，觀察到懸掛的重物重量以及與第3號線的距離確實是有槓桿原理的現象。
- 6.重物重量增加使第1、2、3號線的張力增加，第3號線承擔第1、2號線張力以及重物、上結構重量。

參考文獻

- 1.高勝悅、胡起元、陳品萱、邱秀蓮(2021年)。破解反重力懸浮數 τ -運用力的平衡對抗重力。中華民國第61屆中小學科學展覽會作品說明書。取自<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-080108.pdf?0.17991876020096242>
- 2.戴明鳳(2022年)。張拉整體結構的發展史與其應用。科學研習月刊，61-01。取自<https://www.ntsec.edu.tw/monthly/detail.aspx?a=19208>
- 3.彈力(2023年2月7日)。維基百科，自由的百科全書。取自<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B9%E5%8A%9B>
- 4.虎克定律(2024年2月12日)。維基百科，自由的百科全書。取自<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%83%A1%E5%85%8B%E5%AE%9A%E5%BE%8B>
- 5.康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第五冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。
- 6.康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第八冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。