

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

最佳(鄉土)教材獎

040112

衝吧！震動向前的龍爪草

學校名稱：國立臺南女子高級中學

作者： 高二 謝安玗 高二 呂冠蓉	指導老師： 邱世寬 郭政宜
-------------------------	---------------------

關鍵詞：彈跳、波、摩擦力

摘要

小時候爸爸設計一組遊戲，遊戲規則為讓龍爪草在橡皮筋上平穩且快速的前進，但是並非磨越大力龍爪草跑越快，我們發現應該是頻率主宰龍爪草的移動，因此想透過設計實驗模型進行研究。我們發現不同頻率下龍爪草在吸管中的運動速率不同，為了進一步瞭解龍爪草的運動情形，我們將頭髮黏在吸管上，並觀察吸管不同位置下頭髮的震動情形。此外在探討不同頻率下位置對速率關係時，發現在不同頻率下，吸管中皆有兩處的速率明顯較小，因此我們設計了保麗龍球的實驗來驗證。為了解倒刺角度、密度、長度是否影響速率，我們製作模型來探討並分析龍爪草運動的力圖，而分析結果與實驗是吻合的。最終我們希望將此行進模式運用在機器人的移動上。

壹、研究動機

小時候爸爸曾做給我一種有趣的玩具，將龍爪草放在以二根釘子繃緊的橡皮筋上，用石頭磨釘子，龍爪草就會往前進，看起來就像毛毛蟲在往前爬。當我們在玩的時候，我們發現要讓龍爪草平緩且快速地在橡皮筋上前行並非容易的事，因為龍爪草可能會從橡皮筋上翻覆。因此當有機會參加科展時，便想以這個主題做為研究對象，希望能運用我們所學的波動概念及力圖分析來了解如何讓龍爪草平穩且快速前進的方法。

貳、研究目的

- 一、觀察龍爪草如何前進並推測其原因
- 二、探討不同頻率對龍爪草前進速率的影響
- 三、以頭髮在吸管上的震動情形解釋頻率對前進速率的影響
- 四、探討龍爪草在各頻率下於吸管不同位置的速率變化
- 五、利用小保麗龍球在吸管中的震動情形探討龍爪草停滯的原因
- 六、製作倒刺構造的模型印證推論並探討倒刺角度對前進速率的影響
- 七、製作倒刺構造的模型以研究倒刺密度對龍爪草前進速率的影響
- 八、製作倒刺構造的模型以研究倒刺長度對龍爪草前進速率的影響

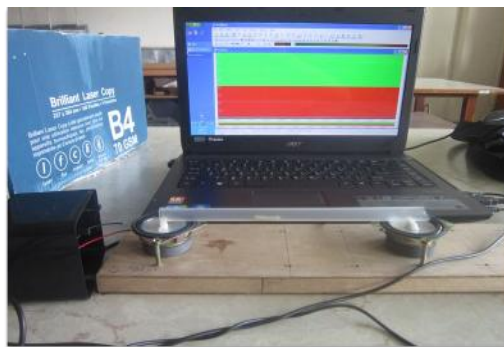
參、研究設備及器材

一、實驗材料：

木板、龍爪草、橡皮筋、鵝卵石、吸管、塑膠牙籤、壓克力膠、螺絲、R型端子、木板、鐵釘、電線、強力黏著膠、保特瓶、黏土、直尺、雙面膠、鐵線、導線、剪刀、電源開關、3M 泡綿、鋼刷、梳子、塑膠罐、塑膠盒。

二、實驗器材：

Gold wave 軟體、電腦、喇叭、震動馬達、相機、馬錶、三號電池、切割機、電子天平。



(圖一)Gold wave軟體、吸管跑道與喇叭

肆、研究方法與結果

我們的研究由觀察龍爪草的花序在橡皮筋上的運動情形開始，之後我們將龍爪草放入吸管中並以喇叭給予震動，進而嘗試製作倒刺構造的模型，研究倒刺角度、倒刺密度與倒刺長度對龍爪草運動速率的影響。最後我們思考是否可以應用在生活上或對未來有幫助，像是可以運用在機器人上，使機器人可以在平地上更順利的前行。

一、觀察龍爪草運動的情形

(一)實驗說明：

我們利用假日先到郊區採樣，太嫩以及太成熟的龍爪草花序不採，以減少不必要的狀況出現(例如太成熟花序容易脫落)。

(二)實驗步驟：

- 1.首先我們分別將二根鐵釘以相距20cm釘在木板，再將橡皮筋套在二根鐵釘上。將龍爪草剪取2.5cm長，放在橡皮筋上。然後以鵝卵石在其中一根鐵釘上磨擦，觀察龍爪草的運動情形。
- 2.改變龍爪草的方向，觀察石頭磨擦後龍爪草的運動情形。
- 3.改變橡皮筋的斜率，觀察石頭磨擦後龍爪草能爬升的最大角度。



(圖二)龍爪草在橡皮筋上的移動



(圖三)龍爪草的爬升

二、探討不同頻率對龍爪草前進速率的影響：

(一)實驗說明:

我們想研究影響龍爪草移動速率的因素，因此以改變振動頻率為操縱變因。然而石頭的摩擦無法產生可控制的頻率，所以我們上網找到可產生特定頻率的軟體，並用電腦喇叭產生震動，再以吸管取代容易將樣本震落的橡皮筋。

(二)實驗步驟：

- 1.剪取 2.5cm 長的龍爪草花序(以下簡稱龍爪草)，五種樣本。
- 2.以頻率30Hz、35Hz、40Hz……600Hz，響度15dB的喇叭振動吸管跑道，測量龍爪草在吸管跑道移動20cm 所花的時間。

(三)實驗結果：

初步發現當我們加大頻率，速率有下降的趨勢。

三、以頭髮在吸管上的震動情形解釋頻率對前進速率的影響

(一)實驗說明:

為了解釋頻率對龍爪草前進的影響，我們將吸管黏上頭髮，以頭髮的震動情形模擬龍爪草倒刺結構的震動情形，並加以解釋速率變化的原因。



(圖四)吸管黏上頭髮

(二)實驗步驟:

- 1.剪取3cm的頭髮。
- 2.以熱熔膠將頭髮黏在20cm吸管上，且兩根頭髮間取2cm的間隔。
- 3.調整頻率，並觀察頭髮的運動情形。

(三)實驗結果：

我們發現頭髮在不同位置的震動情形不同，且頭髮的震動方向並不一致。

四、探討各頻率在吸管不同位置的速率變化

(一)實驗說明:

在測量龍爪草的平均速率時，發現龍爪草會在同一頻率下各位置的前進速率不同，因此我們將吸管分成二十等份，觀察各區間龍爪草的運動情形。

(二)實驗步驟:

- 1.將龍爪草放入吸管跑道內
- 2.將頻率調整到龍爪草不跳躍並穩穩的前行之頻率
- 3.記錄龍爪草的運動情形

(三)實驗結果：

我們發現龍爪草不同的位置速率皆有差異且在各個頻率下皆有兩處速率極低的點。

五、利用小保麗龍球在吸管中的震動情形探討龍爪草停滯的原因

(一)實驗說明:

利用肯特管實驗的概念，探討波在吸管中的情形，進而了解龍爪草停滯不前的原因。

(二)實驗步驟:

- 1.將小保麗龍球裝入吸管中
- 2.利用保鮮膜將吸管開口封閉
- 3.放在實驗喇叭上，並觀察各頻率小保麗龍球的分布狀況

(三)實驗結果：

我們發現保麗龍球經震動後在吸管中不再是均勻分布，而是有些地方保麗龍球較多，有些地方保麗龍球較少，且較少處與實驗四中停滯點的位置相同。

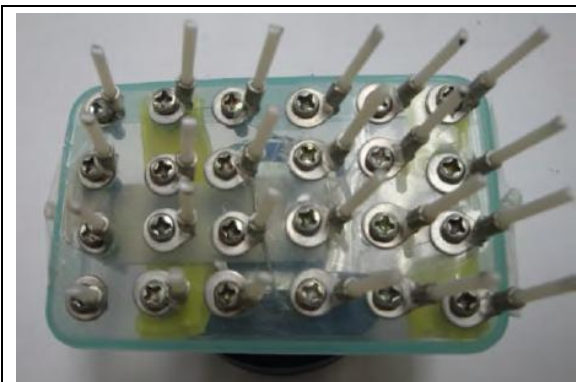
六、製作倒刺構造的模型驗證推論並探討倒刺角度對前進速率的影響

(一)實驗說明：

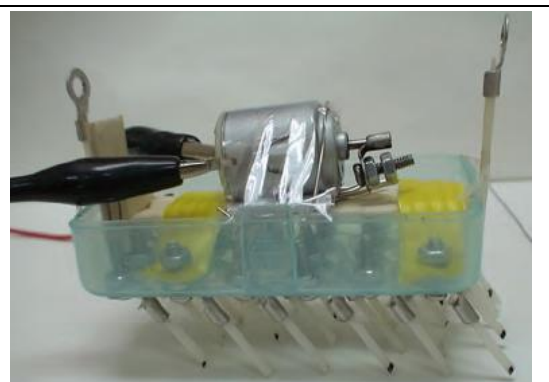
因為龍爪草的質量都很輕，因此我們推測龍爪草倒刺結構的角度可能是影響移動速率的主要原因。但因無法控制龍爪草花序上倒刺結構的角度，因此我們必須動手製作類似的倒刺構造模型，以了解角度對移動速率的影響。

(二)製作模型：

- 1.取一小盒蓋鑽洞成陣列，將R型端子以螺絲鎖在盒蓋上，剪取2cm塑膠牙籤固定在R型端子上。
- 2.將馬達套上R型端子與螺絲，即成震動馬達。再將馬達固定在小盒蓋的另一方，即成倒刺模型。



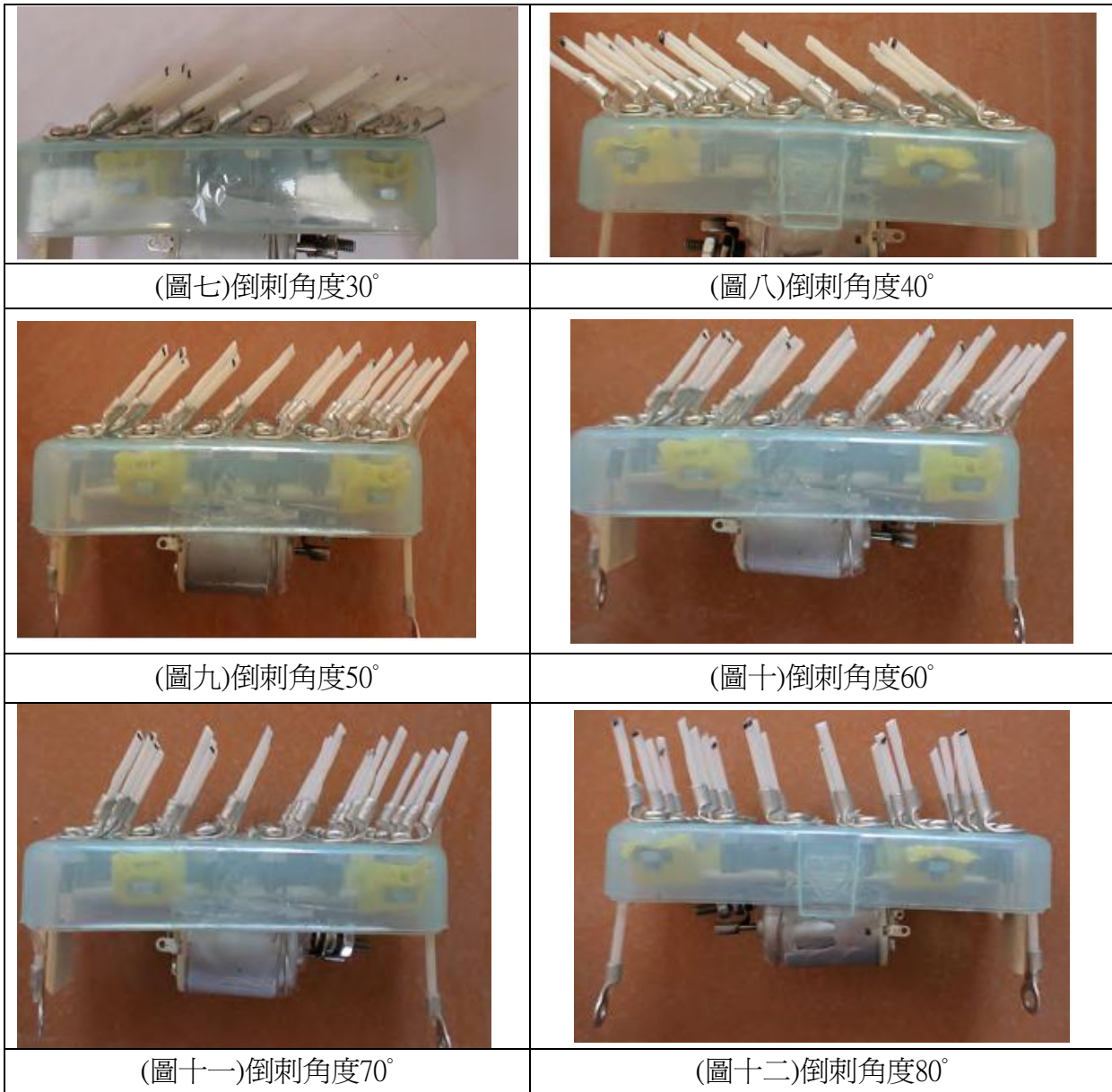
(圖五)模型底部



(圖六)模型整體

(三)實驗步驟：

- 1.以鐵線穿過雙環並調整倒刺與主體夾 30° 角，以電壓3V 使馬達震動，測量模型前進20 cm所需的時間。
- 2.重覆步驟1，將倒刺結構與主體的角度依次調整為 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° ，測量模型前進20cm所需的時間。



(四)實驗結果：

在各個角度下模型移動的速率不同，且我們發現在角度 70° 時模型跑最快。

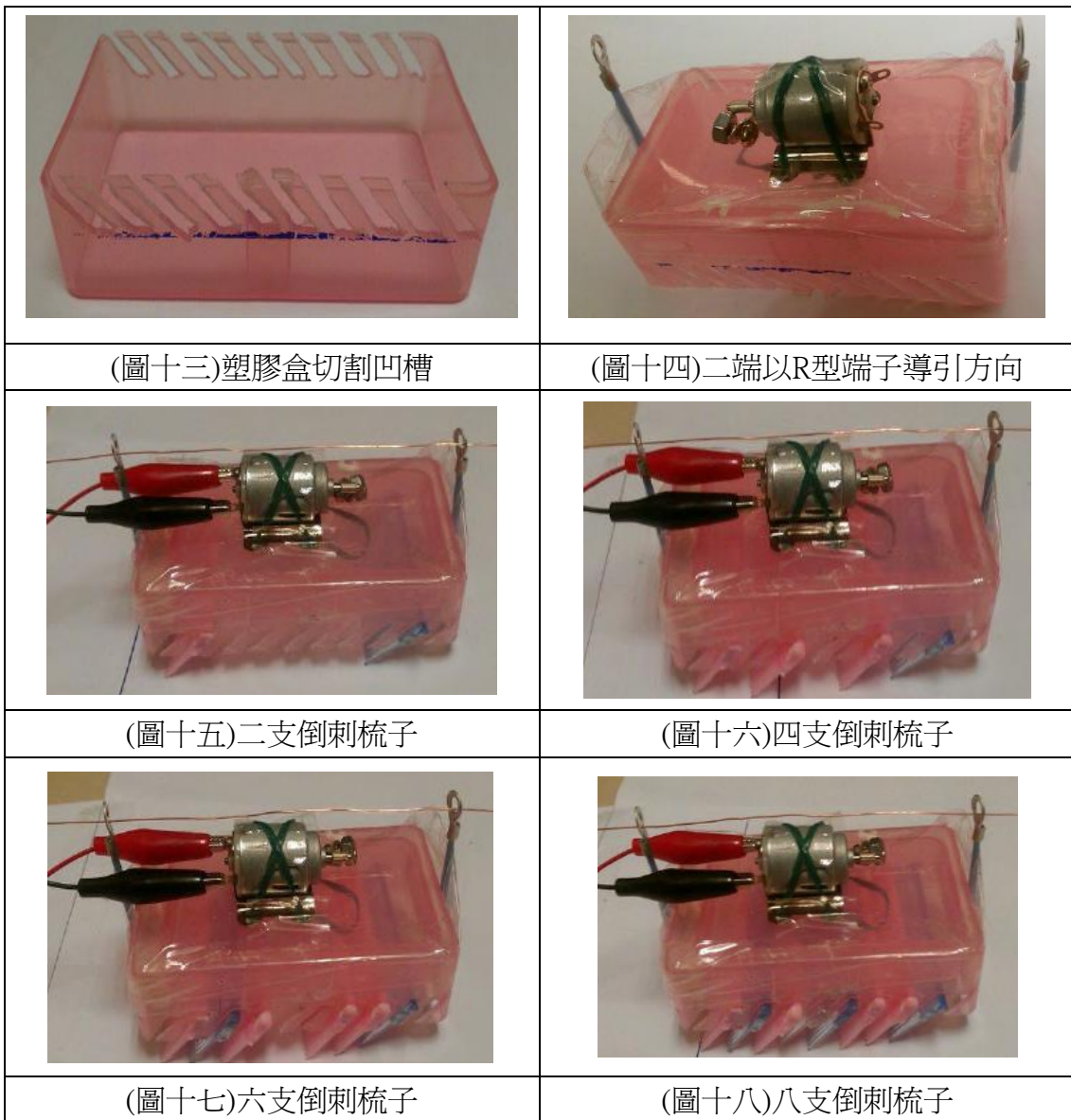
七、製作倒刺構造模型以研究倒刺密度對前進速率的影響

(一)實驗說明：

我們欲了解倒刺密度對於龍爪草移動速率的影響，且若倒刺構造愈密集，則刺與刺間的距離愈小，模型在凹凸不平的地面行進時，較不易被凸起的障礙物卡住。

(二)實驗步驟：

- 1.將塑膠盒利用切割機，切割出十個凹槽。
- 2.將震動馬達固定在塑膠盒背面中間。
- 3.取2個R型端子固定在塑膠盒二端，並以一金屬線穿過此二孔。使模型在移動時能沿此直線前進。
- 4.將塑膠梳子切割成適當長度，將2支梳子對稱固定在塑膠盒凹槽中，將馬達通電，測量5次模型移動20cm 所需的時間，求其平均時間。
- 5.重覆步驟4，將梳子數量改以4支、6支、8支置入凹槽，將馬達通電，測量5次模型移動20cm所需的時間，並求其平均時間。



(三)實驗結果：

我們發現梳子排數的多寡對速率的影響並不大。

八、製作倒刺構造的模型以研究倒刺長度對前進速率的影響

(一)實驗說明：

我們想知道倒刺的長度是否對速率有影響，因此開始尋找適合實驗的器材，並找到可以摺收的梳子，且倒刺排列整齊，還可以調整我們想要的角度。我們將握把的部分利用工藝教室的切割機鋸掉，盡量只留下可調角度的部分。握把彎曲時向下太長會卡到地面，也因為如此，當我們逐漸剪去梳子毛的長度時，也只能剪到剩0.9公分。剪更短時，調角度的轉軸會卡到地面影響移動。在這實驗中我們固定倒刺角度為70°是因為之前的實驗模型發現此時有很好的移動速率。

(二)實驗步驟：

- 1.將震動馬達固定在梳子上，並在梳子前後加上R型端子。
- 2.調整倒刺角度為70°，前將金屬直線穿過二個R型端子並拉直。使模型移動時能直線前進。
- 3.梳子倒刺長度為1.5 cm，倒刺角70°，測量五次梳子模型移動20cm時所需的時間，並求得平均時間。
- 4.重覆步驟3，將梳子倒刺長度依次剪成1.3cm、1.1cm、0.9cm，倒刺角70°，測量五次梳子模型移動20cm 所需的時間，求得平均時間。



(圖十九)可伸縮梳子



(圖二十)調整梳子角度成70°角



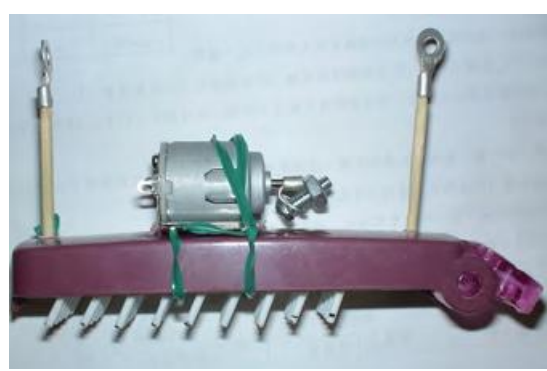
(圖二十一)梳子長度為1.5 cm



(圖二十二)梳子長度為1.3 cm



(圖二十三)梳子長度為1.1 cm



(圖二十四)梳子長度為0.9 cm

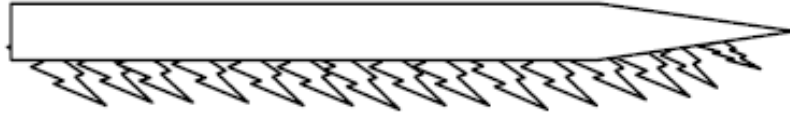
(三)實驗結果：

我們發現不同長度對龍爪草移動速率影響並不大。

伍、研究結果

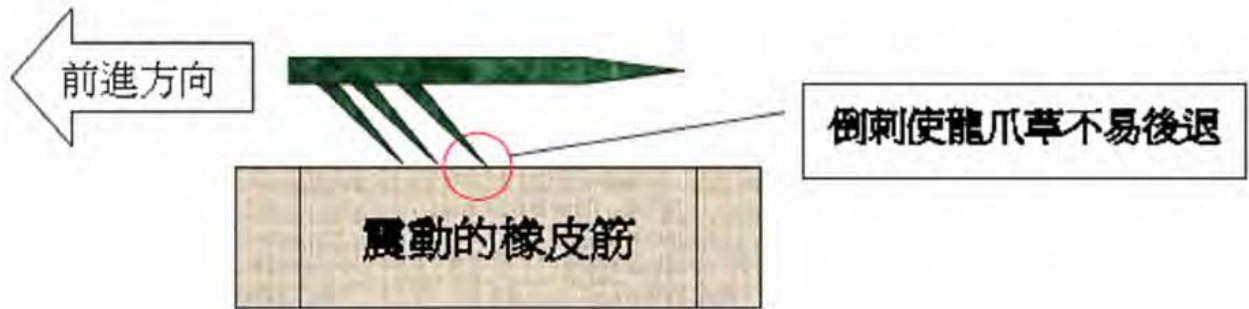
一、觀察龍爪草運動的情形並推測其前進的原因

爲什麼龍爪草都朝向同一方移動呢？我們觀察龍爪草的花序結構發現它穗狀花序粗短，小穗密集呈覆瓦狀排列，形如倒刺狀。



(圖二十五)龍爪草的倒刺花序模擬圖

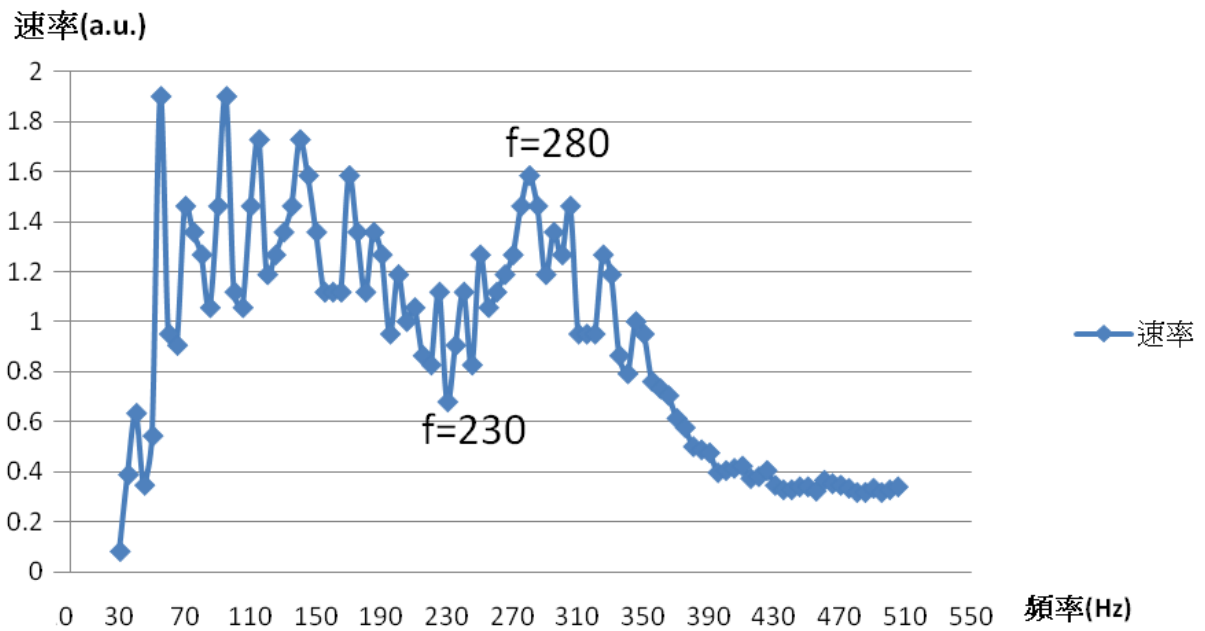
我們推測：以石頭磨擦鐵釘時，橡皮筋會產生震動，此震動傳到倒刺結構後，因爲倒刺結構的特性迫使龍爪草往前移動。



(圖二十六)龍爪草前進方向與倒刺結構示意圖

二、討論不同頻率對龍爪草移動速率的影響

我們發現不同頻率下，龍爪草在吸管中移動的平均速率不同，且並非如我們所預期的隨著頻率增大，速率會平緩的下降。



(圖二十七)頻率對速率的關係圖

三、討論頭髮在吸管中的震動

我們起初猜測在頭髮震動幅度越大的位置，龍爪草的速率越大，但是在280Hz(速率高點)時，卻發現頭髮震動幅度較小，但我們也發現不同位置頭髮的震動方向幾乎都一致，因此我們推論若頭髮震動方向都朝著吸管的兩端，就能提供龍爪草前進的動力；相反的，若頭髮沿著其他的方向震動，不管震動多大，對龍爪草前進皆無太大的幫助。



(圖二十八)55Hz(速率高點)



(圖二十九)65Hz(速率低點)



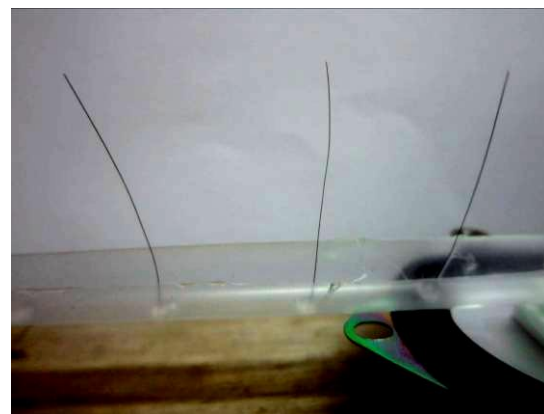
(圖三十)95Hz(速率高點)



(圖三十一)115Hz(速率低點)



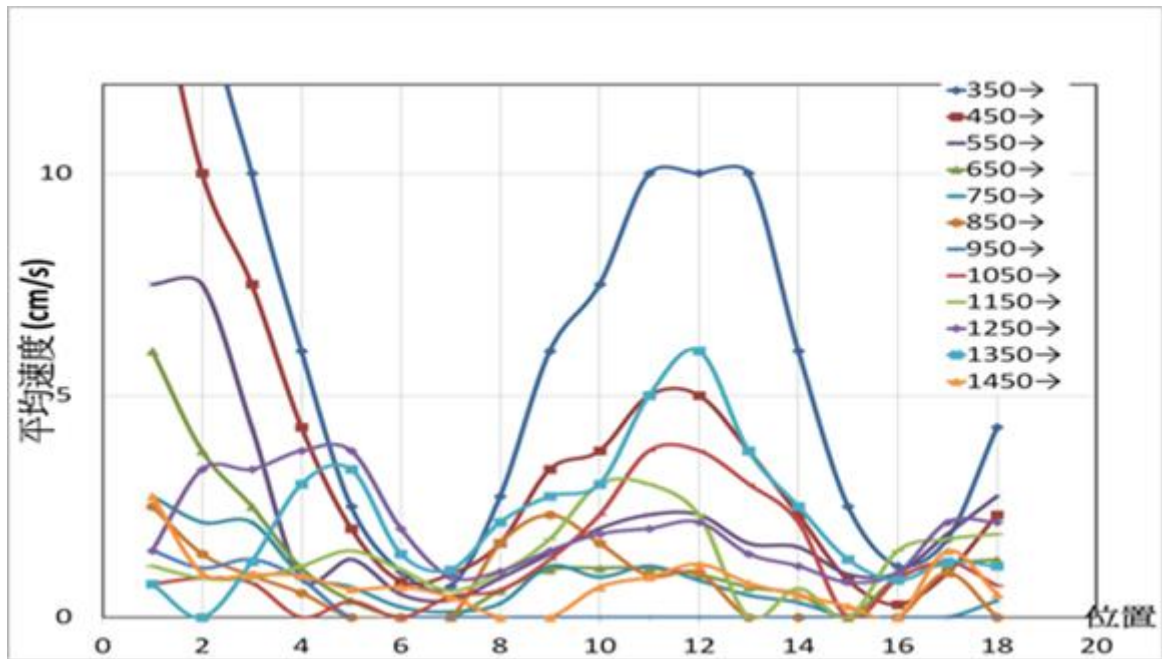
(圖三十二)230Hz(速率低點)



(圖三十三) 280Hz(速率高點)

四、研究不同頻率下不同位置對龍爪草移動速率的影響

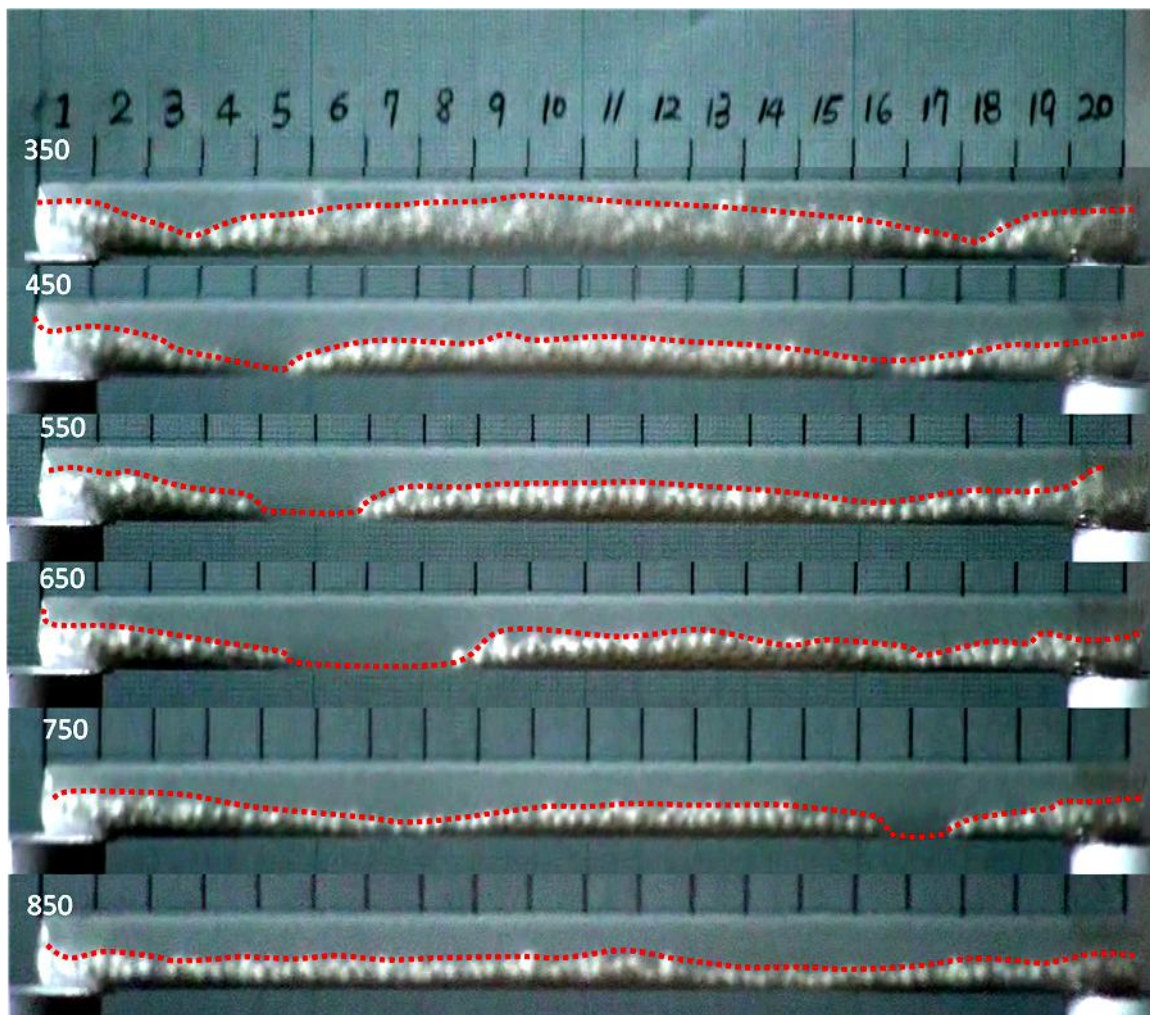
實驗結果發現各頻率下速率與位置關係圖有大致相同的起伏趨勢，且在大多數的頻率下都有兩處是速率明顯較小的地方，若以駐波的觀點解釋，則這兩處可能是其節點，因此速率較小，然而駐波只在特定的頻率下發生，並非在所有的頻率都有，但我們實驗發現在不同的頻率下皆有類似節點的地方。顯然這節點並非空氣在吸管中所造成的，而是吸管本身在震動傳遞上所行程的節點，具有較大的頻率響應範圍，在我們提供的頻率內，大致發生在相同的位置。



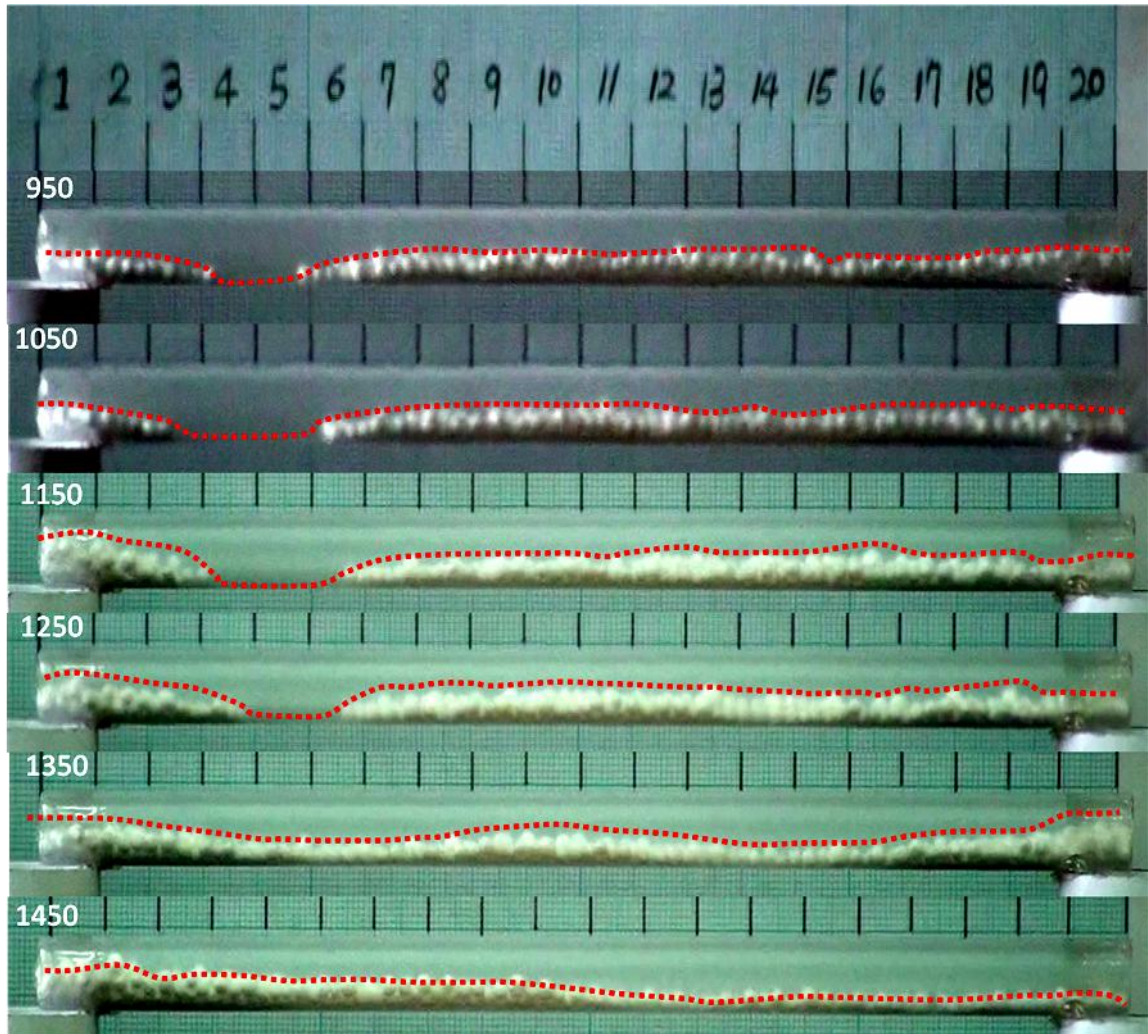
(圖三十四)不同頻率下速率對位置的關係圖

五、觀察保麗龍球在吸管中的分布情形

我們發現保麗龍球在吸管中會移動，並在不同頻率下吸管會有一至二個地方是保麗龍球明顯較少處，甚至有些特定頻率會有特定位置沒有保麗龍球，而我們發現這些保麗龍球明顯較少處就是龍爪草在吸管中跑較慢的地方。



(圖三十五) 保麗龍球在吸管中的震動情形



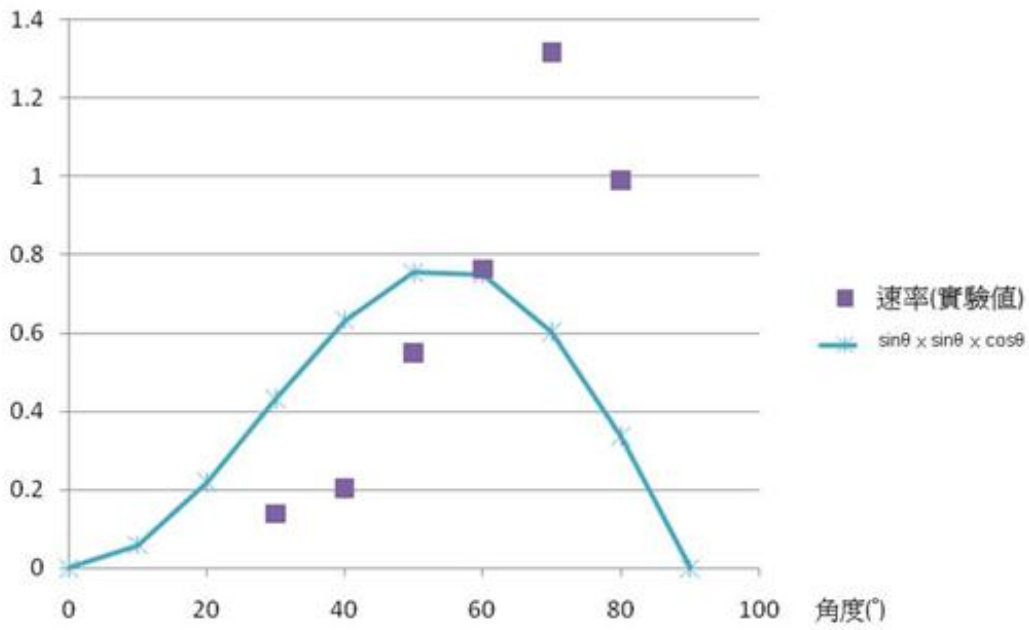
(圖三十六)保麗龍球在吸管中的震動情形

六、不同角度下模型的移動速率

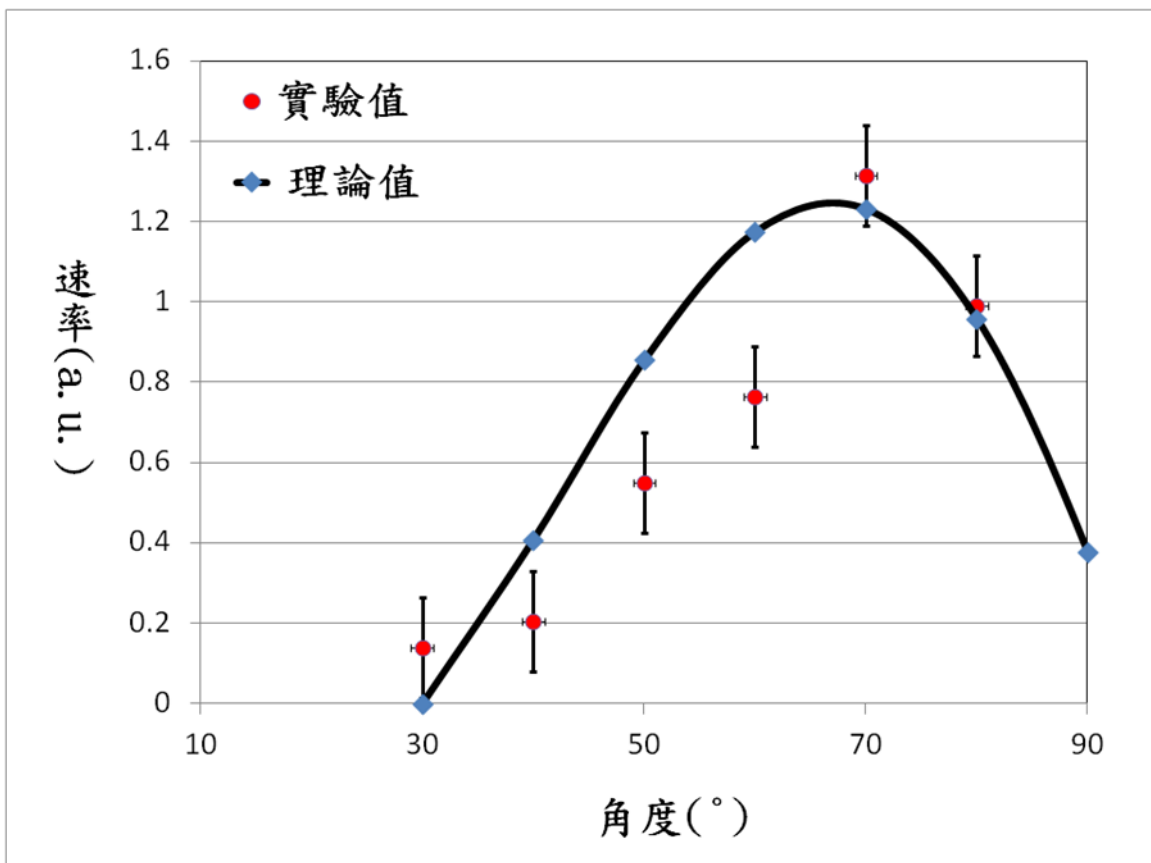
角度對龍爪草移動速率的實驗數據

時間(秒) 角度(°)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
30	7"78	7"47	7"09	7"35	6"31	7"20
40	5"20	5"19	4"56	5"06	4"47	4"90
50	1"91	1"94	1"81	1"82	1"88	1"82
60	1"33	1"28	1"37	1"25	1"31	1"31
70	0"68	0"88	0"84	0"72	0"69	0"76
80	1"19	1"03	1"03	0"88	0"91	1"01

(表一)



(圖三十七)實驗值與理論值的比較

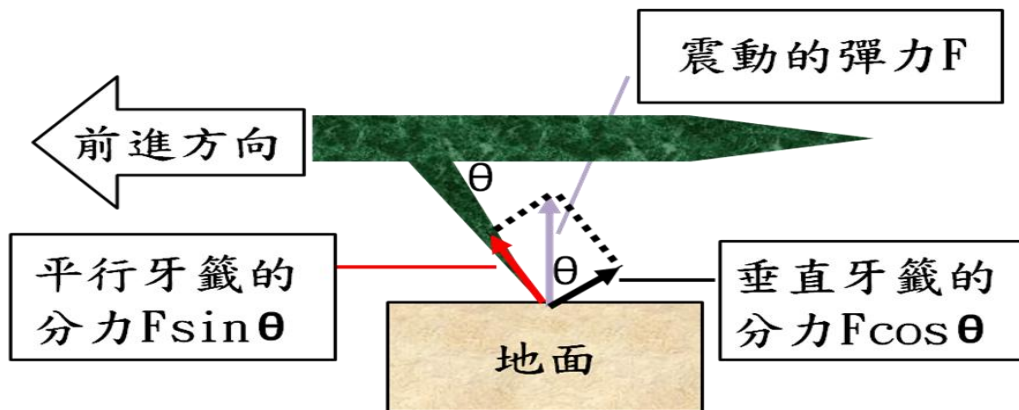


(圖三十八)調變後的理論值與實驗值比較圖

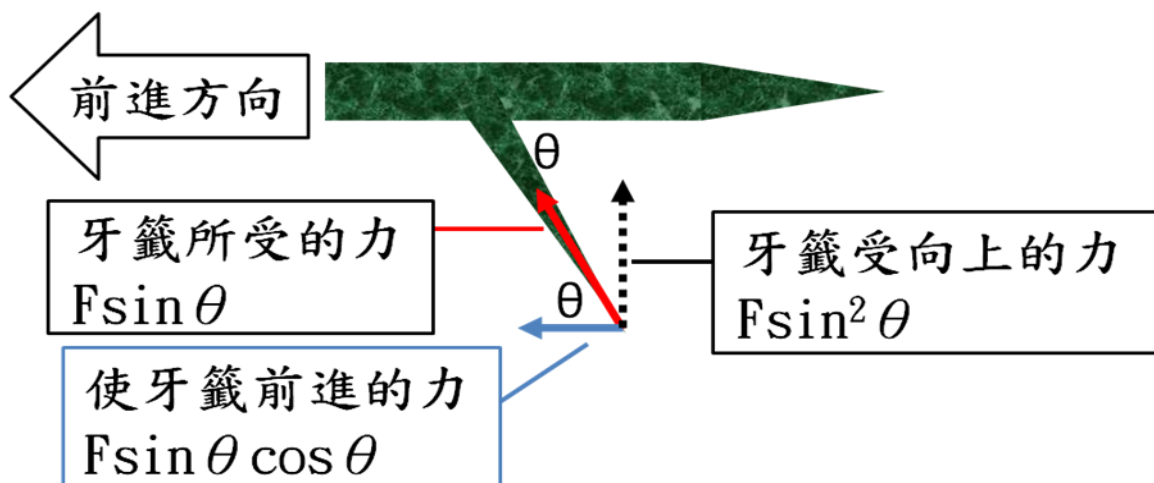
不同的倒刺角度(30°~80°)對模型移動速率的影響，可以明顯發現角度變大時，移動20cm所需的時間愈短，即移動速率愈快，且在70°時速率達到最大值。這與我們原來的預測有很大出入，因為我們預測馬達給牙籤的震動速率是相同的，因此推論角度45°時的震動速率可以得到最大的水平位移，然而在我們的實驗中最大值並非在45°，所以我們將針對原先的理論模型進行修正。

我們將力圖修正為下圖。之前預測地面的反彈力應沿牙籤方向作用。可是實際上馬達只在上、下方向震動，並不是斜前推動，我們推論龍爪草之所以能前進是因為地面給予摩擦力，故向前的分力大小應表示為 $F \cdot \sin\theta \cos\theta$ 。

我們發現實驗數據的趨勢和力圖所分析出來的 $F \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta \cos\theta$ (=正向力 • 使龍爪草向前的分力)有蠻高的吻合度(如圖三十七)，因此我們試著調整我們的理論值，結果發現 $y=2.5 [\sin\theta \sin 2(\theta + 25^\circ)] + 30^\circ$ (θ 為模型與地面的夾角)的理論值幾乎符合我們的實驗值(如圖三十八)。



(圖三十九)彈力F對牙籤產生的推力 $F\sin\theta$



(圖四十)牙籤受力後在水平方向產生的分力 $F\sin\theta \cos\theta$

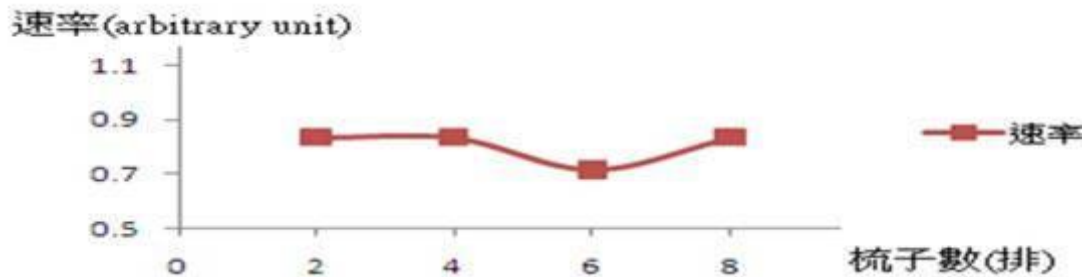
七、不同密度對模型移動速率的影響

由實驗結果發現不同排數的梳子對模型移動速率的影響不大，並非如我們一開始所預想的密度越大，受到震動的倒刺結構越多所以移動速率越大，而我們推測速率變動不大是因為我們密度的改變在一定範圍內，因此對模型前進沒有顯著的影響。

密度對龍爪草移動速率的實驗數據

時間(秒) 梳子數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
2 排	1"2	1"1	1"2	1"2	1"2	1"2
4 排	1"2	1"2	1"1	1"1	1"2	1"2
6 排	1"4	1"4	1"5	1"5	1"4	1"4
8 排	1"3	1"2	1"2	1"3	1"2	1"2

(表二)



(圖四十一)密度對速率關係圖

八、不同長度對模型移動速率的影響

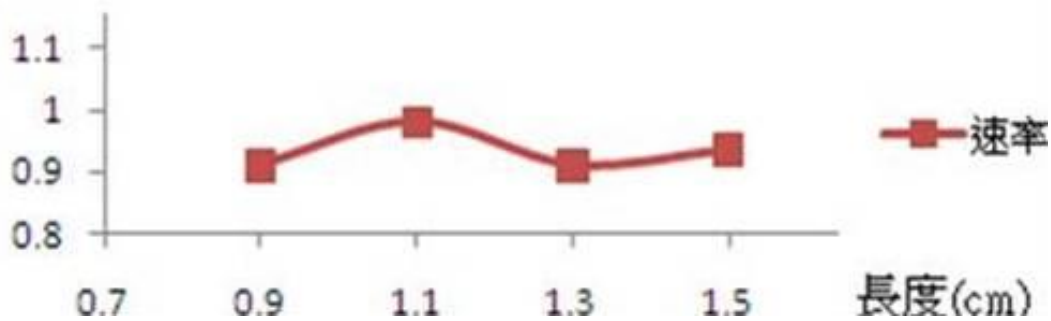
由實驗結果發現不同長度對模型移動速率的影響不大，並不符合我們一開始所預設的隨著長度越長，倒刺結構儲存的而能量越多，而我們推測速率變動不大是因為我們長度的改變在一定範圍內，因此對模型前進沒有顯著的影響。

長度對龍爪草移動速率的實驗數據

時間(秒) 長度	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
0.9cm	1"00	1"09	1"12	1"10	1"03	1"07
1.1cm	1"03	1"06	1"00	1"31	1"09	1"10
1.3cm	1"12	1"00	1"03	1"00	0"97	1"02
1.5cm	1"19	1"09	1"07	1"21	0"90	1"10

(表三)

速率(arbitrary unit)



(圖四十二)長度對速率的關係圖

陸、討論

一開始我們是以石頭磨擦釘子使龍爪草在橡皮筋上運動，因此我們認為讓龍爪草前進的原因是釘子給予橡皮筋震動進而帶動龍爪草前進，所以我們假設震動頻率為影響龍爪草前進的重要因素。在進行頻率對龍爪草移動速率影響的觀測時，發現在不同的頻率下，龍爪草在吸管中移動的速率確實不同，且在吸管中的速率也會和位置有關，因此，我們了解到震動頻率確實是使龍爪草前進的重要因素。為了解速率和位置的關係，我們進行了保麗龍球在吸管中震動的實驗，並發現保麗龍球在吸管震動後較少處與龍爪草速率較低處大致是在同一地方，所以可將保麗龍球的跳動情形視為吸管震動所造成的結果，速率較慢或停滯的位置是在吸管震動後產生的節點處，而速度較快的位置，則和震動產生的波腹位置有關。經過這一連串實驗的探討，我們發現頻率是影響龍爪草震動向前的主要因素，只有在特定頻段下龍爪草才能平緩且快速的前進，這解答了我們小時候心中的疑問，因此當我們磨釘子所產生的震動頻率符合龍爪草快速向前的頻率時，我們便能使龍爪草迅速平穩的前進。

柒、結論

- 一、龍爪草因皆具有倒刺結構，經震動後能夠前進，甚至能由低處往高處爬。
- 二、影響龍爪草移動速率的因素最主要是喇叭的響度，響度愈大移動愈快。頻率由30Hz~600Hz時，低頻的移動情形很不穩定；直到280Hz後，才漸漸平緩前進，並且有頻率越大，速率越慢的情形。
- 三、經由頭髮震動的實驗了解到不同位置的頭髮震動方向須一致，並只有特定方向的震動才能使龍爪草前進。
- 四、分析不同頻率下龍爪草在吸管中不同位置的速率，發現在中央部分速率最快且兩旁皆有速率較小的地方。
- 五、用保麗龍球來驗證龍爪草在吸管中的運動，進而發現保麗龍球實驗結果與速率位置關係圖相符合。
- 六、製作單面倒刺震動模型探討倒刺角度對移動速率的影響。發現在70°時有最大的移動速率。
- 七、倒刺排列愈密集，移動速率並不會有很明顯不同；但若倒刺愈密集，在凹凸不平的地面愈不會被卡住。
- 八、倒刺長度愈短，在地面移動速率不受影響，但可以降低重心，增加模型移動時的穩定性。

捌、參考資料及其他

- 一、不均勻介質中弦波形成駐波的研究，第34屆全國中小學科學展覽會，高中組物理科，作者：蔡金吾、洪瑞聰、黃奎綱、蕭錚。
- 二、空氣柱之駐波 <https://www.youtube.com/watch?v=y7opmwEDTMU>
- 三、都是駐波，為什麼差這麼多，第42屆全國中小學科學展覽會，高中組物理科，作者：李俊瑩、楊昱恆、黃耀正、莊敦榮。
- 四、膜上的波扭，第49屆全國中小學科學展覽會，高中組物理科，作者：呂伊庭；鄭惟允；洪家琪。
- 五、駐波，台灣師範大學物理系討論區
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/wiki/index.php/%E9%A7%90%E6%B3%A2>
- 六、Standing Waves Generated by String Vibration <https://www.youtube.com/watch?v=no7ZPPqtZEg>

【評語】 040112

1. 從鄉土的童玩出發作為研究的主題，非常有趣。
2. 作者對於研究的主題充滿熱情，願意針對其不足之處，多加學習及探索。