

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030106

吹毛求疵——絨毛種子的飛行密碼

學校名稱：基隆市立武崙國民中學

作者： 國二 莊詠安 國二 林睿騏 國二 游芷潔	指導老師： 葉玉君 莊旭瑋
---	-----------------------------

關鍵詞：絨毛、側向力、飛行軌跡

摘要

研究發現真實種子滯空時間和水平位移為繆絨花>芒草>小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 為繆絨花<芒草<小錦蘭。仿生種子最佳的側向力：寬度1.2公分，彎曲度90度，重量0.3公克，重心在下，絨毛長度5公分，絨毛數量720及900根，絨毛分布360度。最佳種子滑空比：絨毛分布360度，種子彎曲60度，絨毛數量720根，種子寬度1.4公分，絨毛長度5公分，種子重量0.5公克，重心在側邊。而在側向力與飛行模式實驗中，種子本身變因與其相關性較小，與絨毛相關性較大，顯示絨毛種子的絨毛對於種子的飛行模式具有高度的影響力。

壹、研究動機

夏去秋來，涼爽的秋風吹起一地的落葉，常會沿途看見芒草滿天飛舞的景象，自從看到芒草隨風飄逸的景象後，那畫面就一直深深地烙印在我們的腦海裡，並讓我們產生許多疑惑和興趣，在學校路邊和校園中採集芒草、繆絨花和小錦蘭，希望能藉由研究絨毛種子，更深入了解這些具有冠毛降落傘的飛行模式。

貳、研究目的

一、觀察絨毛種子的外觀以及探究真實絨毛種子自由落下軌跡模式

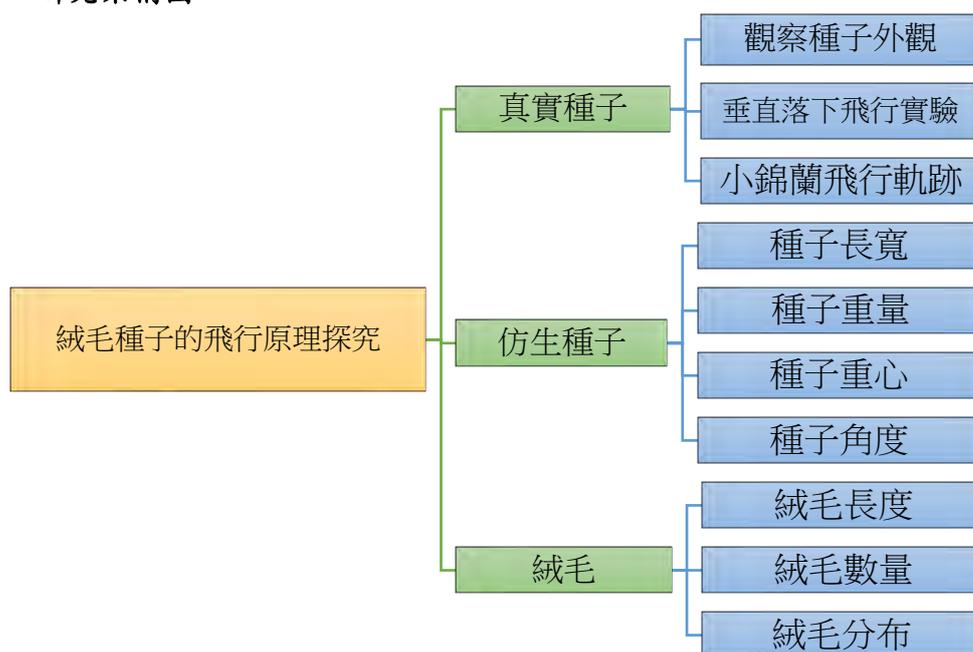
三、探究仿生小錦蘭種子在不同風速下對其產生側向力的影響

(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

四、探究仿生小錦蘭種子的飛行軌跡

(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

參、研究架構圖



肆、研究器材設備及研究原理

一、研究器材及設備

實驗用	風速計	用來測量側向力裝置，和軌跡裝置的風速，單位為 m/s
	微量天平	用來測量側向力，準確度為小數點後四位，單位為 g
分析用	Tracker	用來分析軌跡的電腦程式，並且可以算出速率
	excel	用來計算升力以及軌跡的數據

二、研究原理介紹

(一)絨毛種子飛行原理

隨風散佈的種子大致可以分成翅型及像蒲公英一樣具有絨毛狀的飛行器。當絨毛種子飛行時，它的柔軟絨毛起到了微風降落傘的作用。這些降落傘與我們使用的降落傘在構造上很不一樣，絨毛的設計使得種子降落傘像多孔洞設計的小型飛行器，也因為這種設計使得絨毛降落傘中有 90% 的空間長時間保持有空氣，使絨毛種子更容易被風吹起並帶到新的領土。就像人類的跳傘者一樣，絨毛種子依靠阻力來減緩他們的下降。而降落傘的**多孔性**實際上有助於在種子飛行時保持種子穩定渦流。這種旋轉空氣的質量有助於增加對種子的阻力。使得絨毛種子不需要花費任何力氣便可以移動很遠的地方。種子附著在降落傘上，增加了空氣動力阻力並增加了總行程。

(一)我們所研究絨毛種子的空氣動力學(aerodynamics)

1. 實驗中我們測量了種子的基本構造數據並設計實驗想了解絨毛種子的空氣動力學。在有風的環境中，種子水平移動，受到橫向風流的影響而傳播到很遠的距離。在實驗中我們測量種子的**滑空比**，以從中得到**升力/阻力**的比值。

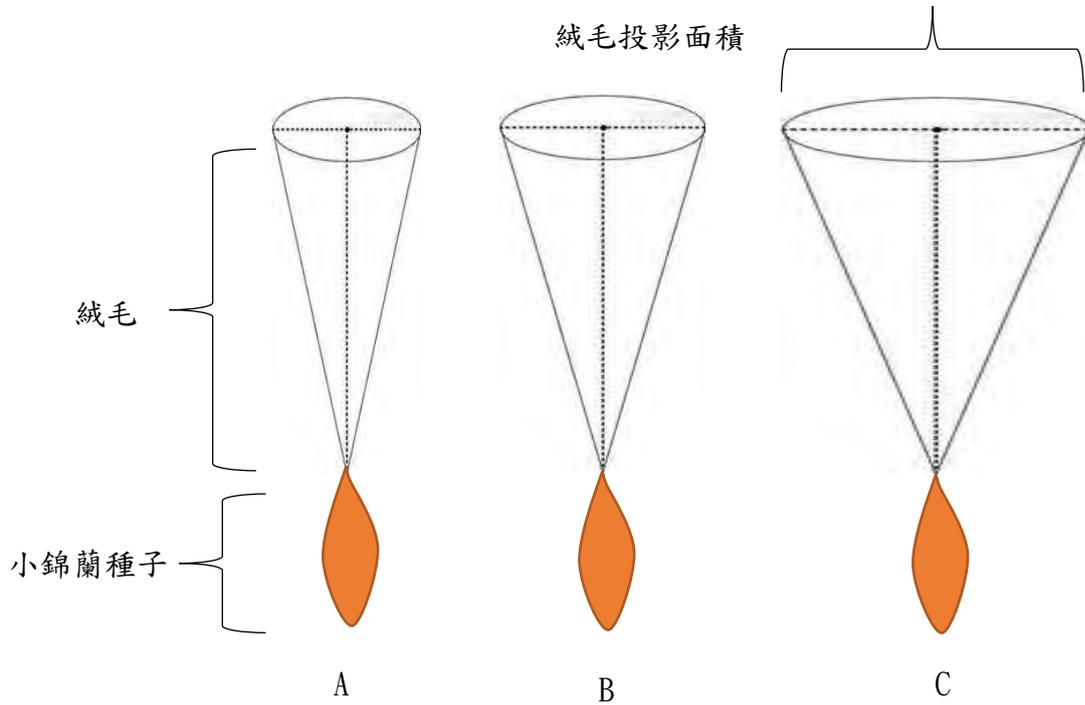
$$\text{升阻比(lift to drag ratio)} = \frac{\text{升力}}{\text{阻力}} = \text{滑空比(gliding ratio)} = \frac{\text{飛行距離}}{\text{下降高度}}$$

2. 除了滑空比之外，我們也測量了種子在飛行時的絨毛投影面積，根據理論為： C_D 是無因次阻力係數，其中前進速度 U ， ρ 是空氣密度= $1.29 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ ， A 為絨毛的投影面積。

$$F_D(\text{阻力}) = \frac{\rho A C_D U^2}{2}$$

絨毛種子在飛行過程中能夠排列成不同的形狀，絨毛降落傘的投影面積會因為絨毛的排列而有所不同。絨毛降落傘最大的面積為絨毛長度為半徑所形成的圓，隨著絨毛閉合投影面積會逐漸縮小。

$$\text{絨毛種子翼載荷(wing loading)} = \frac{\text{種子質量(mass)}}{\text{絨毛投影面積(projected area)}}$$



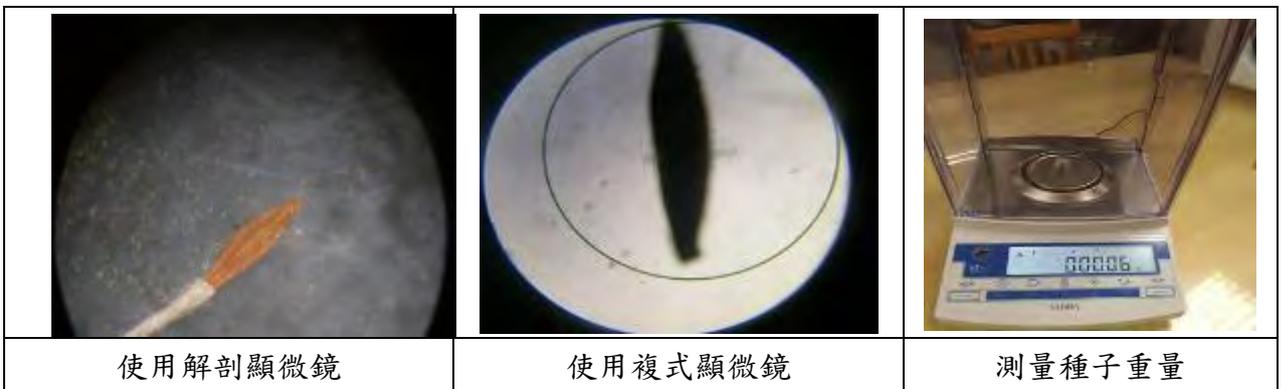
以小錦蘭種子為例，絨毛 A 的投影面積 < 絨毛 B 的投影面積 < 絨毛 C 的投影面積，也就表示 A 翼載荷 > B 翼載荷 > C 翼載荷，較小的翼載荷對於絨毛種子而言有較佳的飛行效率並且有較小的種子終端速度。

伍、研究步驟及研究結果

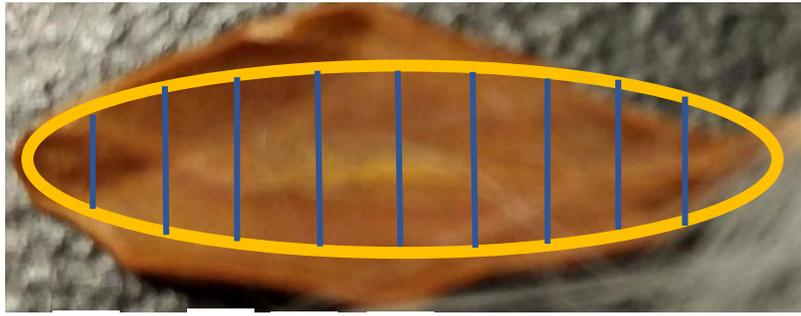
實驗一、觀察絨毛種子的外觀

目的: 得知種子的外觀，比較種子特性，作為仿生種子的基本數據

方法: (一) 在路邊或校園中找到繶絨花、芒草和小錦蘭並帶回實驗室，使用解剖顯微鏡和複式顯微鏡觀察。(二) 觀察繶絨花、芒草和小錦蘭種子長寬、絨毛的長度、數量，再利用微量天秤測量重量。



(三)實驗中為了仿生種子的精準性，我們將種子寬度分成九個線段測量，測量方式如下圖：



L4 L3 L2 L1 a R1 R2 R3 R4

a 為正中間最大的橫切長度，R1-R4 為中軸右邊的橫切長度，L1-L4 為中軸左邊的橫切長度。

結果:(一) 纓絨花、小錦蘭和芒草種子寬度測量

表一：纓絨花、小錦蘭和芒草九段寬度(單位：mm；N=10)

分段位置	R4	R3	R2	R1	a	L1	L2	L3	L4
纓絨花	0.431	0.62	0.71	0.765	0.828	0.802	0.7	0.6	0.473
芒草	0.475	0.52	0.635	0.73	0.735	0.735	0.505	0.37	0.085
小錦蘭	1.2	3.1	4.3	5	5.9	5.2	4.7	3.5	1.8

1. 纓絨花種子中央最寬的部位為 0.828mm，種子長度為 0.3mm，若將種子以橢圓形面積來做計算，橢圓形面積 = πab 。
2. 芒草種子中央最寬的部位為 0.735mm，種子長度為 0.5mm。
3. 小錦蘭種子中央最寬的部位為 5.9mm，種子長度為 16.3mm。

(二) 纓絨花、小錦蘭和芒草種子相關形質特徵

表二：纓絨花、小錦蘭和芒草種子相關形質比較(N=10)

	冠毛的數量(根)	冠毛的長度(mm)	種子長度(mm)	種子寬度(mm)	種子長/種子寬	冠毛長/種子長	種子面積(mm ²)	冠毛長/種子面積
纓絨花	99.70	8.20	3.00	0.8280	3.6232	2.7333	75.4900	0.1086
芒草	117.90	6.60	5.00	0.7350	6.8027	1.3200	19.4990	0.3385
小錦蘭	435.50	32.10	16.30	5.9000	2.7627	1.9693	28.8480	1.1127

1. 我們使用解剖顯微鏡觀察計算冠毛種子數量，纓絨花冠毛數量平均為 99 根，芒草為 118 根，小錦蘭為 436 根。以小錦蘭的冠毛數量最多。
2. 測量冠毛的長度結果顯示，纓絨花冠毛長度平均為 0.82 公分，芒草為 0.66 公分，小錦蘭為 3.21 公分。以小錦蘭的冠毛長度最長。

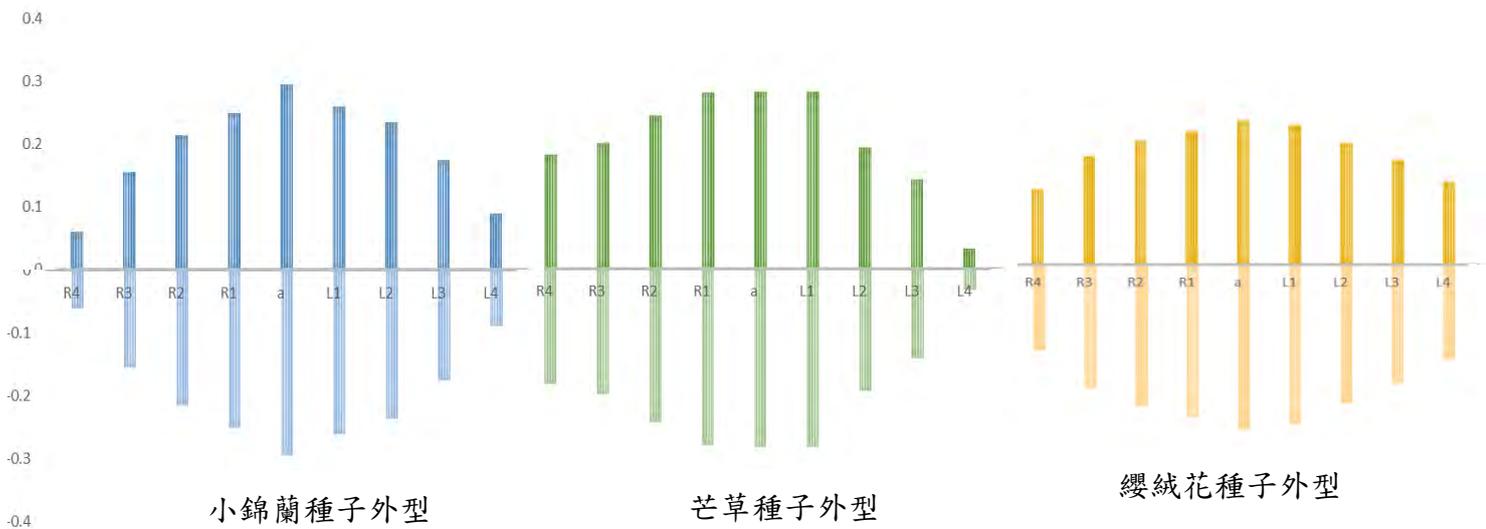


3. 種子的長度分別為繆絨花種子長度平均為 0.3 公分，芒草為 0.5 公分，小錦蘭為 1.63 公分。以小錦蘭種子最大。

4. 種子的重量分別為繆絨花種子重量平均為 0.00025 公克，芒草為 0.00031 公克，小錦蘭為 0.06019 公克。以小錦蘭種子最大。

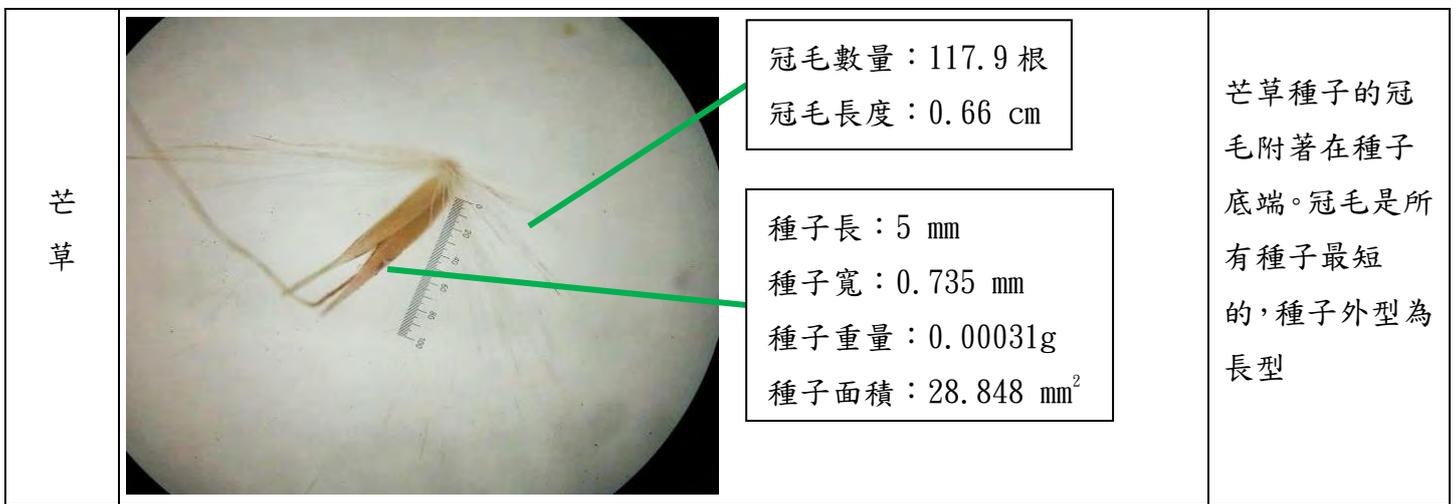
5. 以種子的長寬比來比較，芒草的比值最大；以冠毛和種子長比來看，繆絨花種子的冠毛特別長；若以冠毛和面積進行比較，小錦蘭的比值較大。

6. 所測量的種子比例將作為仿生種子的重要數據，並且會與我們後續的實驗數據進行相關性分析



表三、絨毛種子特徵比較

種類	測量後種子的數據	特徵
小錦蘭	 <p>冠毛數量：435.5 根 冠毛長度：3.21 cm</p> <p>種子長：16.3 mm 種子寬：5.9 mm 種子重量：0.06019 g 種子面積：75.49 mm²</p>	小錦蘭的冠毛都附著在種子的頂端，是三種種子中最大的，種子外型較偏向菱形的橢圓形。
繆絨花	 <p>冠毛數量：99.7 根 冠毛長度：0.82 cm</p> <p>種子長：3 mm 種子寬：0.828 mm 種子重量：0.00025 g 種子面積：19.499 mm²</p>	繆絨花冠毛附著在種子的頂端，是三種種子中最小的，種子外型較偏向瘦長的橢圓形。



(三)絨毛種子的翼載荷

測量冠毛種子質量及絨毛長度後，計算絨毛種子的翼載荷。絨毛投影面積以絨毛長度作為圓半徑進行計算。

$$\text{絨毛種子翼載荷(wing loading)} = \frac{\text{種子質量(mass)}}{\text{絨毛投影面積(projected area)}}$$

表四、繆絨花、小錦蘭和芒草絨毛種子翼載荷

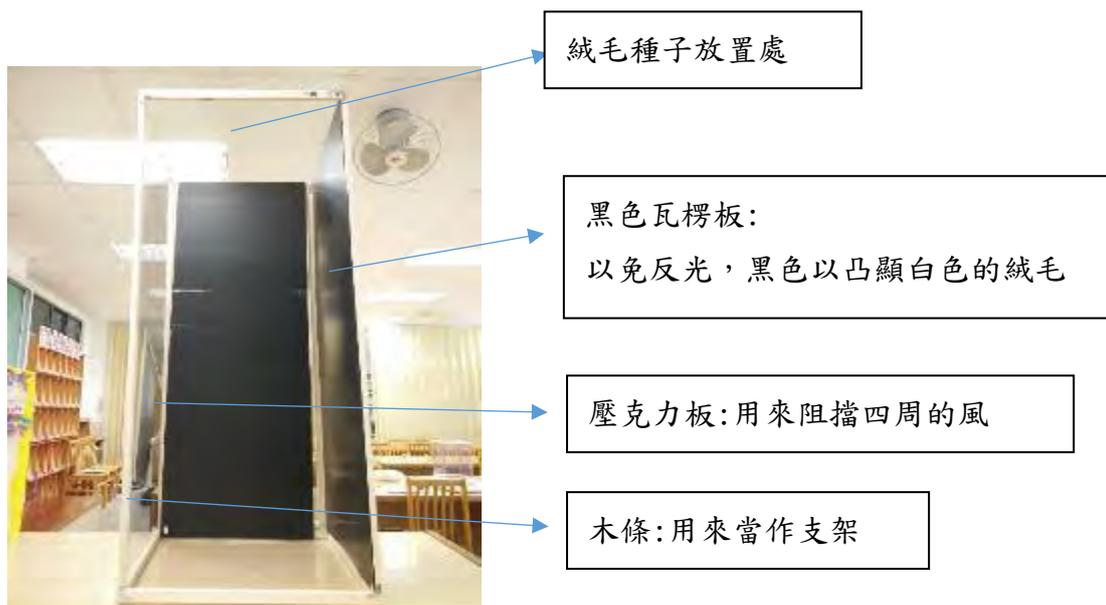
	種子質量(公克)	絨毛長度(公分)	絨毛投影面積(平方公分)	絨毛種子翼載荷
繆絨花	0.00025	0.82	2.11	1.1848*10 ⁻⁴
芒草	0.00031	0.66	1.37	2.2628*10 ⁻⁴
小錦蘭	0.06019	3.21	32.35	1.8606*10 ⁻³

結果：三種實驗的絨毛種子翼載荷：繆絨花 < 芒草 < 小錦蘭。

實驗二、探究真實絨毛種子自由落下軌跡模式

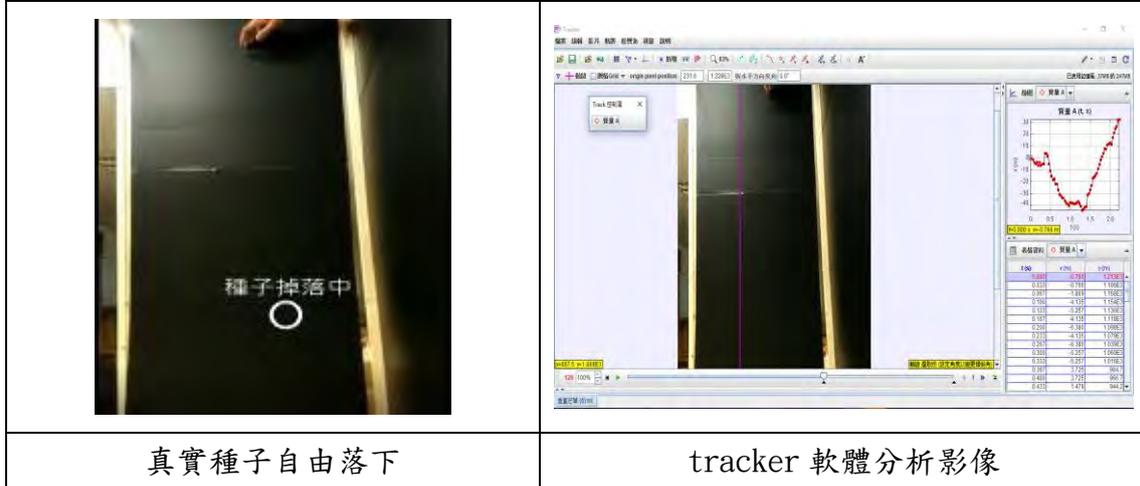
目的：測量真實絨毛種子的加速度以及是否有飄移之現象

方法：(一)垂直自由落下實驗儀器製作

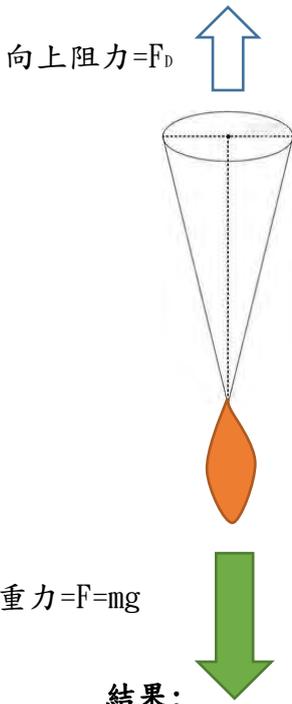


(二)種子自由落下軌跡實驗方式

1. 將真實種子放在離地約 1.5 公尺並讓它垂直落下
2. 使用相機攝影真實種子自由落下十次
3. 使用 tracker 軟體分析影像並計算落下軌跡數據



(三)種子自由落下數值的計算方式



1. 向上阻力的計算方式： $F - F_D = ma \rightarrow F_D = F - ma$
 F 為小錦蘭種子重量= mg ; m 為小錦蘭質量; g 為重力加速度= 9.8 m/s^2 ;
 a 為實驗中落下時所計算的平均加速度。
 2. 經由 1 式計算出向上的阻力，便可以計算小錦蘭在空氣中所受到的
 C_D 是無因次阻力係數，其中前進速度 U ，
 ρ 是空氣密度= $1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ， A 為絨毛的投影面積。

$$F_D(\text{阻力}) = \frac{\rho A C_D U^2}{2}$$

表五、真實種子自由落下的飛行數值

單位	t	x	v	a	阻力F _D	C _D	單位	t	x	v	a	阻力F _D	C _D
	秒(s)	cm	cm/s	cm/s ²	gw			秒(s)	cm	cm/s	cm/s ²	gw	
A小錦蘭	0.8	0.191	148.2	468.75	30.77214	0.067147	A芒草	1.667	1.47	72.7	107.957	0.27	0.058
B小錦蘭	0.8	1.719	149.4	468.75	30.77214	0.066073	B芒草	1.633	2.67	72.87	112.499	0.269	0.057
C小錦蘭	0.8	0.63	148.1	468.75	30.77214	0.067238	C芒草	1.167	3.5	103.54	220.282	0.236	0.025
D小錦蘭	0.8	0.9	135.6	468.75	30.77214	0.080206	D芒草	2.233	3.162	54.9	60.165	0.285	0.107
E小錦蘭	0.733	1.88	154.9	558.3587	25.37859	0.050691	E芒草	1.6	2.13	76.28	117.188	0.267	0.052
F小錦蘭	0.933	1.73	121	344.6339	38.24269	0.125183	F芒草	1.933	5.07	62.55	80.289	0.279	0.081
G小錦蘭	0.767	0.14	145.9	509.9534	28.2921	0.063697	G芒草	1.7	4.9	70.66	103.806	0.272	0.062
H小錦蘭	0.8	0.63	148.1	468.75	30.77214	0.067238	H芒草	1.567	3.653	78.9	122.175	0.266	0.048
I小錦蘭	0.8	1.7	149.4	468.75	30.77214	0.066073	I芒草	0.967	7.97	118.4	320.825	0.204	0.016
J小錦蘭	0.8	0.2	148.2	468.75	30.77214	0.067147	J芒草	1.767	0.1	68.61	96.083	0.274	0.066
平均	0.8033	0.972	144.88	469.4196	30.73183	0.072069	平均	1.623	3.463	77.941	134.127	0.262	0.057

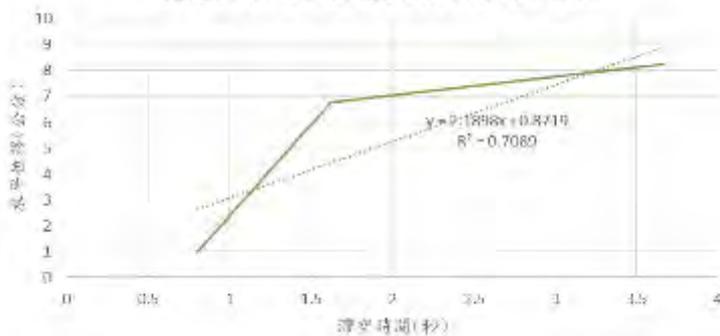
	t	x	v	a	阻力 F_D	C_D
單位	秒(s)	cm	cm/s	cm/s ²	gw	
A 繡絨花	3.7	5.8	34	21.914	0.24	0.152
B 繡絨花	2.3	7.23	21.2	56.711	0.231	0.377
C 繡絨花	3.767	5.21	32.75	21.141	0.24	0.164
D 繡絨花	2.3	7.23	21.21	56.711	0.231	0.377
E 繡絨花	3.633	11.83	31.42	22.73	0.239	0.178
F 繡絨花	4.767	4.236	27.17	13.202	0.242	0.241
G 繡絨花	3.867	14.82	32.08	20.062	0.24	0.171
H 繡絨花	5.033	9.61	26.24	11.843	0.242	0.258
平均	3.671	8.246	28.259	28.039	0.238	0.219

1. 真實種子在自由落下過程中，會向水平左右兩側飄移。距離為：繡絨花 > 芒草 > 小錦蘭
2. 滯空時間：繡絨花 > 芒草 > 小錦蘭
3. 落下速率：小錦蘭 > 芒草 > 繡絨花
4. 向下加速度：小錦蘭 > 芒草 > 繡絨花
5. 阻力大小：小錦蘭 > 芒草 > 繡絨花
6. 阻力係數 C_D ：繡絨花 > 小錦蘭 > 芒草

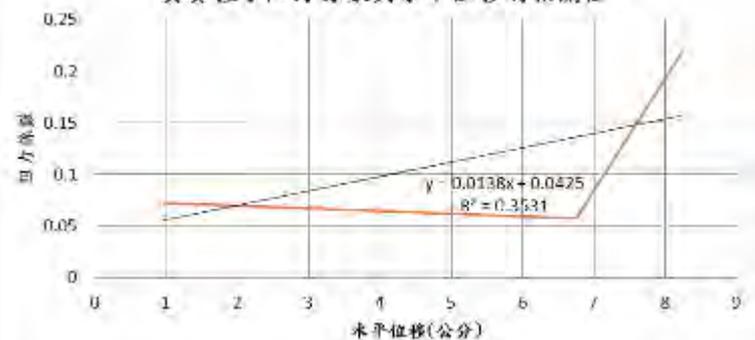
7. 統整結果：

	t	x	v	a	阻力 F_D	C_D
單位	秒(s)	cm	cm/s	cm/s ²	gw	
小錦蘭	0.803	0.972	144.88	469.42	30.732	0.072
芒草	1.623	6.75	77.941	134.127	0.262	0.057
繡絨花	3.671	8.246	28.259	28.039	0.238	0.219

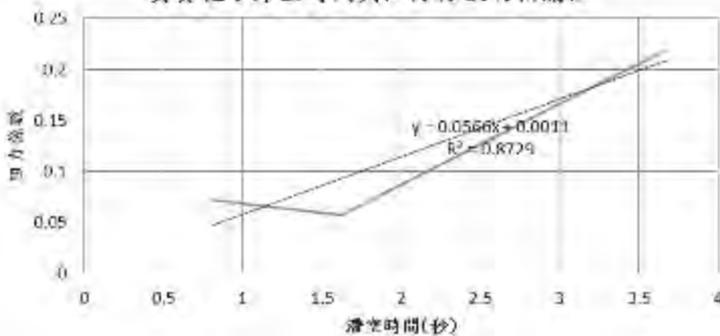
真實種子滯空時間與水平位移的相關性



真實種子阻力係數與水平位移的相關性



真實種子滯空時間與阻力係數的相關性



- (1) 種子滯空時間與水平位移呈正相關
- (2) 阻力係數與水平位移呈正相關
- (3) 阻力係數與種子滯空時間呈正相關
- (4) 從以上實驗結果顯示真實種子在自由落下過程中會有水平飄移現象，由於受到阻力，整個降落過程並非為單純的自由落體運動

實驗三、探究仿生小錦蘭種子在不同風速下對其產生側向力的影響

目的：探討仿生種子在�同變因下的側向力數值(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

方法：(一) 仿生種子的製作(以小錦蘭種子為仿生對象)

第一代種子的製作方法

1. 將拍完照後的小錦蘭種子正、反面在電腦上放大十倍後印下來
2. 用簽字筆在透明塑膠片描繪種子的正、反面各 8 個，再用雙面膠黏貼
3. 將塑膠繩用原種子絨毛的十倍 (7cm) 剪下

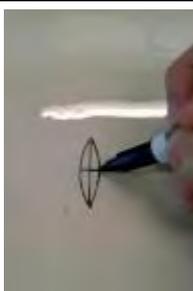
- 先在塑膠繩頂端用熱熔膠和種子黏合(避免撕開時散開)，再將塑膠繩撕成 100 根
- 觀察做出的種子重量是否與原來種子 10 倍重量相符

					
1. 描繪種子 正、反面	2. 用雙面膠 黏貼	3. 剪 7cm 的塑 膠繩	4. 將塑膠繩 與種子黏合	5. 將塑膠繩 撕成 100 根	6. 完成圖

結果及討論:經過我們測試後發現仿生種子沒有辦法像自然的種子飄移到很遠的地方，經過我們觀察和討論後，覺得種子的重量比較重，因此修改了黏貼種子的材料，將黏貼材質更改成由雙面膠改變成泡棉膠。

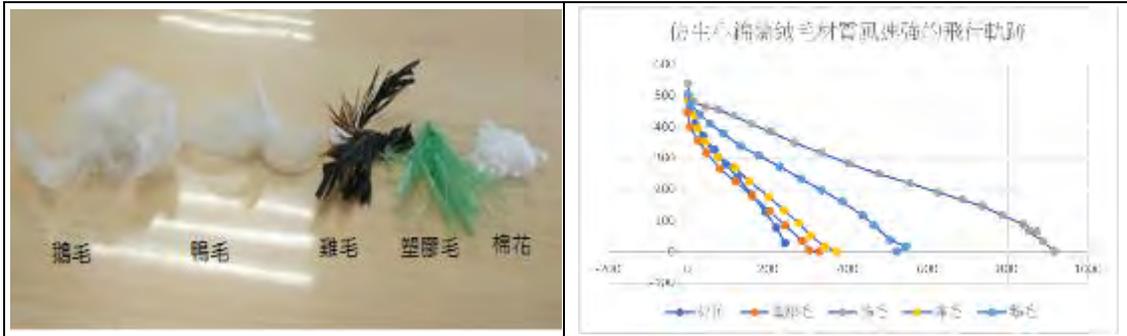
第二代種子的製作方法

- 將拍照後的種子正、反面在電腦上放大十倍後印下來
- 用簽字筆在透明塑膠片描繪種子的正、反面各 1 個，再用泡棉膠黏貼
- 將塑膠繩用原種子的十倍 (7cm) 剪下
- 先在塑膠繩頂端用熱熔膠和種子黏合(避免撕開時散開)，再將塑膠繩撕成 100 根
- 觀察做出的種子重量是否與原來種子 10 倍重量相符

					
1. 描繪種子 正、反面	2. 用泡棉膠 黏貼	3. 剪 7cm 的 塑膠繩	4. 將塑膠繩 與種子黏合	5. 將塑膠繩 撕成 100 根	6. 完成圖

結果及討論:修正後的第二代種子，雖然飄的比第一代種子來的遠，但依舊無法跟自然種子相比，所以我們進行種子大幅度的修正，而絨毛的材質使用棉花、塑膠毛、鴨毛、雞毛以及鵝毛。而實驗結果顯示，滑空比：鴨毛 1.71 > 鵝毛 1.039

> 雞毛 0.765 > 塑膠毛 0.66 > 棉花 0.53，因此後續實驗中都選用效果最佳的鴨毛為絨毛材質。



修正方式如下表六：

	種子材質	絨毛材質	黏貼種子
修改前	使用塑膠片	塑膠繩	泡棉膠
修改後	使用珍珠板	羽絨枕頭中的鴨毛	三秒膠
修改後優點	珍珠板密度比塑膠片小，減輕重量	鴨毛比塑膠繩密度小，且為生物真實材質，更接近絨毛種子的絨毛材質	三秒膠比泡棉膠更容易黏著，且重量更輕

第三代種子製作方法

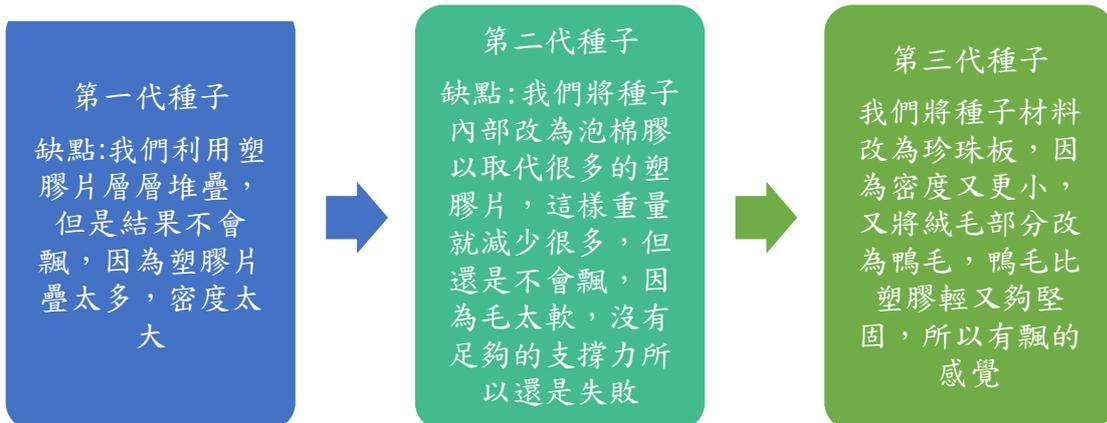
1. 利用珍珠板將一倍的種子剪下
2. 將枕頭中的羽毛取出，利用三秒膠將五根羽毛(羽毛的羽片部分有 90 根細毛)黏貼並和種子接合



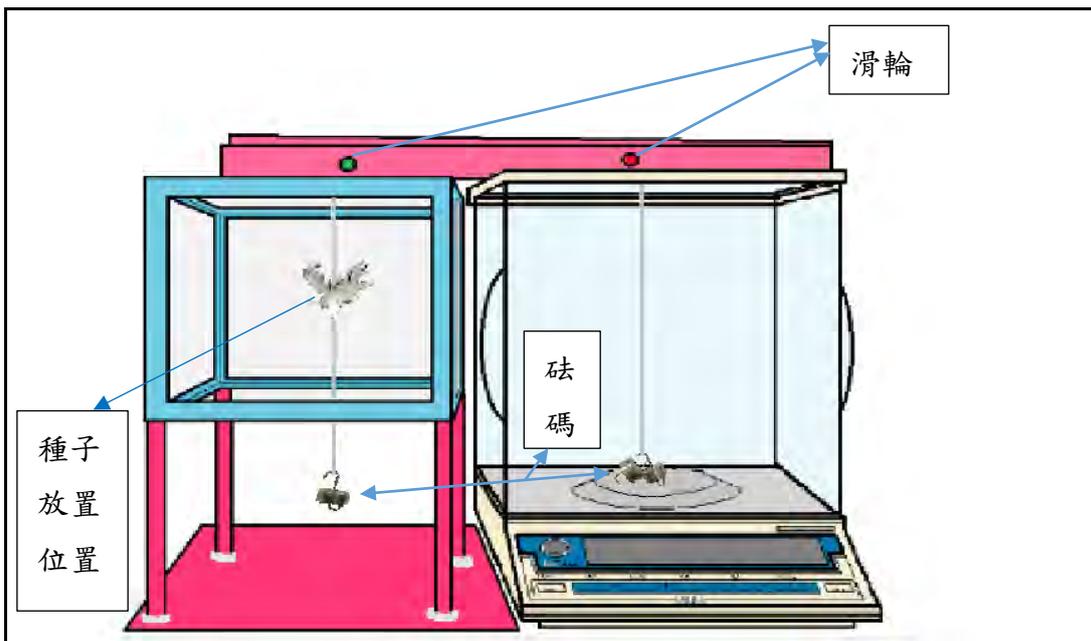
剪下種子	抽出羽絨枕頭中鴨毛	黏貼種子	完成圖

結果與討論:飄移的距離較遠，接近真實小錦蘭。因為種子換成珍珠板，重量較塑膠片輕。而將塑膠毛換成鴨毛重量輕且較硬，有較大的支撐力。

仿生種子改良過程



(二)側向力儀器的製作



測量側向力儀器設計圖



測量側向力儀器完成圖

1. 測試箱：以瓦楞板製作外框，用塑膠透明片製作外壁
2. 支撐架：用瓦楞板製作的支撐架(用來支撐滑輪與主體)是分開的，可拆開分別用在垂直風向與側風
3. 滑輪：從電腦硬碟中拆下，種子兩側則運用自製的吸管滑輪，放在支撐架上，功用為力的轉換

4. 微量天秤：測量測向力數值（準確度達到小數點第四位）
5. 種子兩側砝碼：讓種子固定在中間，避免種子隨風亂飄，且要支撐磅秤上砝碼重以免種子受到風吹而不穩定。
6. 風速大小由電風扇按鈕控制(強、中、弱)並使用風速計測量風速

結果：

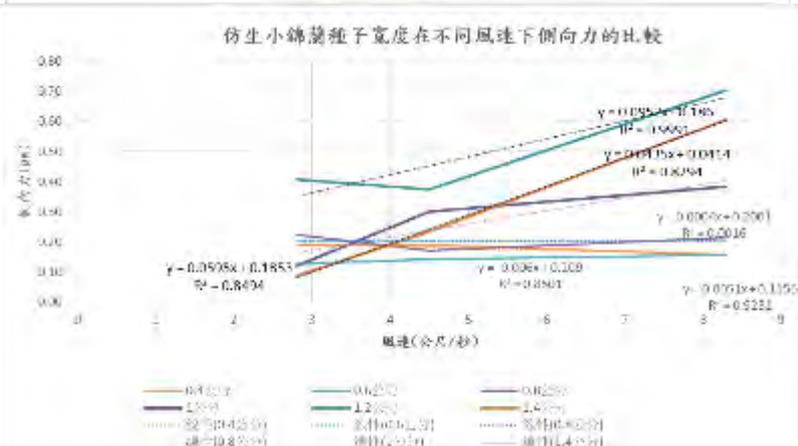
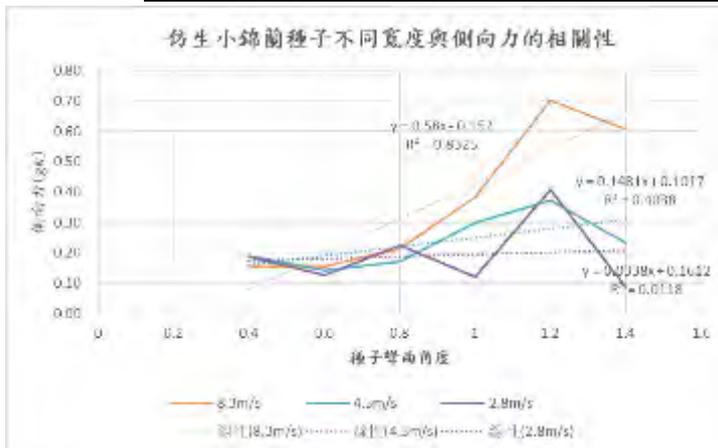
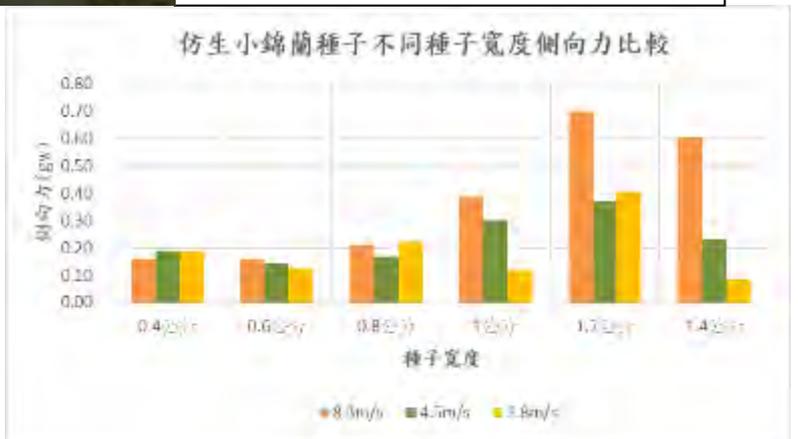
(一)小錦蘭種子寬度



1. 不同寬度的種子直接在珍珠板繪製，並且在繪製後剪下
2. 與絨毛黏貼製作成不同寬度種子。
3. 分別做出寬為 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 公分種子

表七：不同仿生種子寬度側向力(gw)

公分	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
0.4 公分	0.16	0.19	0.19
0.6 公分	0.16	0.14	0.13
0.8 公分	0.21	0.17	0.22
1 公分	0.38	0.30	0.12
1.2 公分	0.70	0.37	0.41
1.4 公分	0.61	0.23	0.09



1. 不同種子寬度側向力：種子寬度與側向力的大小呈正相關。
 - (1) 在高風速下的側向力：種子寬度 1.2 > 1.4 > 1 > 0.8 > 0.6 > 0.4 公分。
 - (2) 在中風速下的側向力：種子寬度 1.2 > 1.4 > 1 > 0.4 > 0.8 > 0.6 公分。
 - (3) 在低風速下的側向力：種子寬度 1.2 > 0.8 > 0.4 > 0.6 > 1 > 1.4 公分。
2. 不同風力下側向力：除了種子寬度為 0.8 公分外，其他種子的側向力與風速大小都呈顯著的正相關，風速越大其側向力也越大。

3. 總和結果：風速越大以及種子寬度 1.2 公分，所產生的側向力越大，在風速 8.3 m/s 種子寬度為 1.2 公分其側向力最大為 0.7gw。

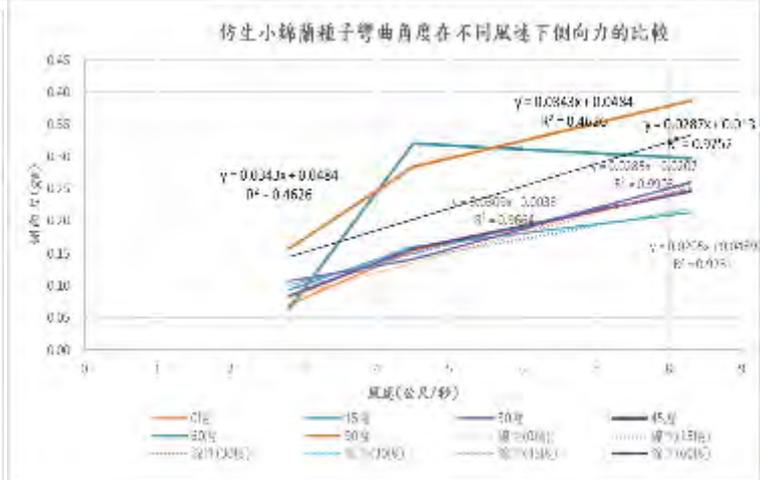
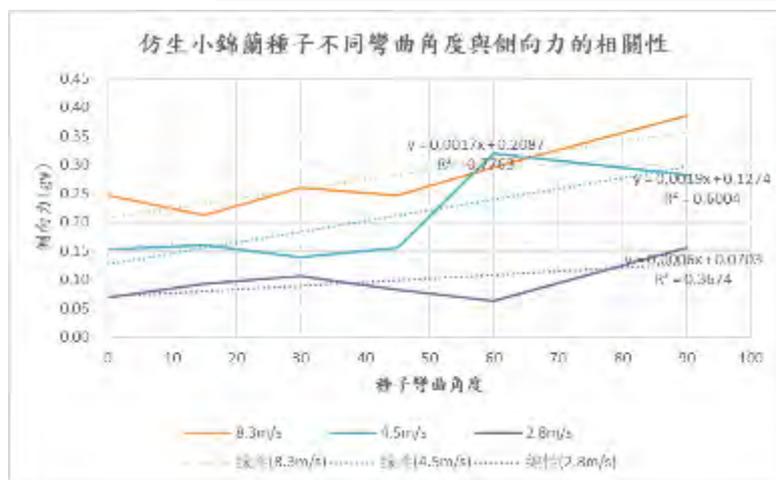
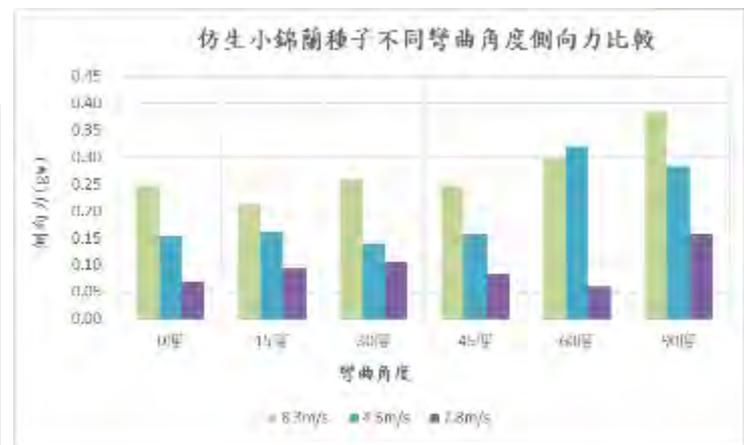
(二)小錦蘭種子彎曲角度



1. 將角度 0°、15°、30°、45°、60°、90°的種子畫出
2. 與絨毛黏貼製作成不同角度種子。

表八：不同仿生種子彎曲角度側向力(gw)

角度	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
0 度	0.25	0.15	0.07
15 度	0.21	0.16	0.09
30 度	0.26	0.14	0.11
45 度	0.25	0.16	0.08
60 度	0.3	0.32	0.06
90 度	0.39	0.28	0.16



1. 不同種子彎曲角度側向力：種子彎曲角度與側向力的大小呈正相關。
 - (1) 在高風速下的側向力：種子彎曲角度 90>60>30>0=45>15 度。
 - (2) 在中風速下的側向力：種子彎曲角度 60>90>45=15>0>30 度。
 - (3) 在低風速下的側向力：種子彎曲角度 90>30>15>45>0>60 度。
2. 不同風力下側向力：所有種子的側向力與風速大小都呈顯著的正相關，風速越大其側向力也越大。

3. 總和結果：風速越大以及種子彎曲角度越大，所產生的側向力越大，在風速 8.3 m/s 種子彎曲角度為 90 度其側向力最大為 0.39gw。

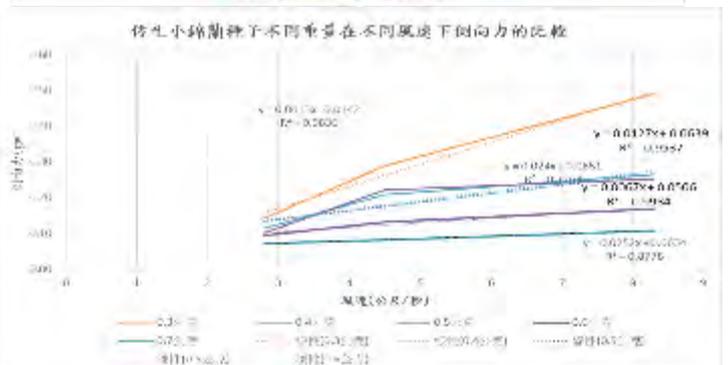
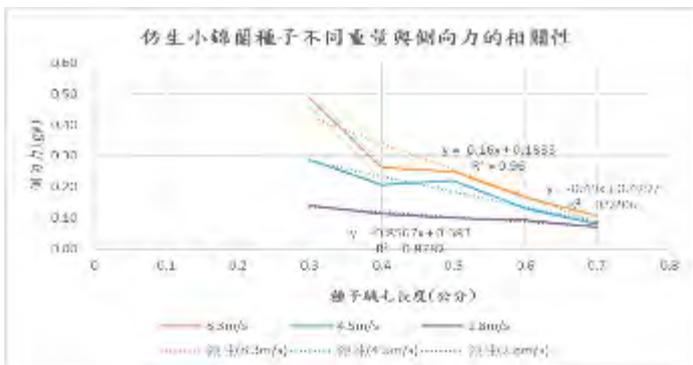
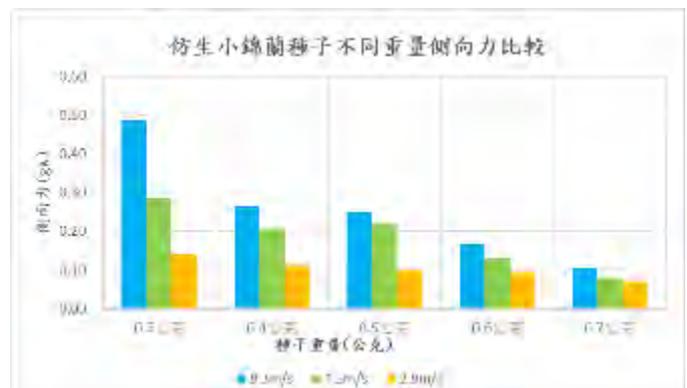
(三) 小錦蘭種子不同重量



1. 利用三秒膠當作重量的附著物，以製作不同重量種子
2. 將種子重量製成重量 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 公克

表九：不同仿生種子重量側向力(gw)

公克	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
0.3 公克	0.49	0.29	0.14
0.4 公克	0.26	0.21	0.11
0.5 公克	0.25	0.22	0.10
0.6 公克	0.17	0.13	0.09
0.7 公克	0.11	0.08	0.07



1. 不同種子重量側向力：種子重量與側向力的大小呈負相關。
 - (1) 在高風速下的側向力：種子重量 0.3 > 0.4 > 0.5 > 0.6 > 0.7 公克。
 - (2) 在中風速下的側向力：種子重量 0.3 > 0.5 > 0.4 > 0.6 > 0.7 公克。
 - (3) 在低風速下的側向力：種子重量 0.3 > 0.4 > 0.5 > 0.6 > 0.7 公克。
2. 不同風力下側向力：所有種子的側向力與風速大小都呈顯著的正相關，風速越大其側向力也越大。
3. 總和結果：風速越大以及種子重量越小，所產生的側向力越大，在風速 8.3 m/s 種子重量 0.3 公克其側向力最大為 0.49gw。

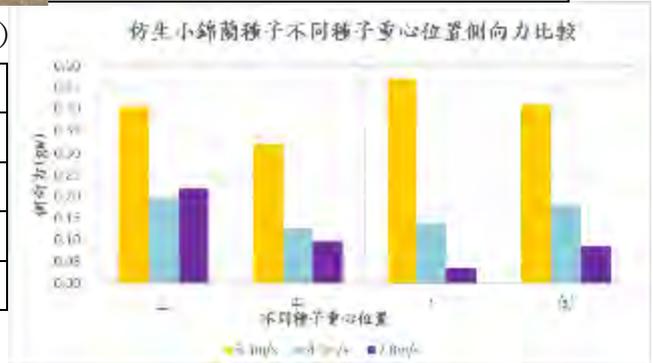
(四) 小錦蘭種子不同重心位置



1. 將迴紋針剪成小段並且使用天平測量重量
2. 並插入種子的上、中、下、側邊
3. 製成不同重心位置的種子

表十：不同仿生種子重心位置側向力(gw)

重心	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
上	0.41	0.20	0.22
中	0.32	0.13	0.10
下	0.47	0.14	0.04
側	0.41	0.18	0.08



1. 不同種子重心位置側向力：種子重心位置與側向力的大小呈正相關。

(1) 在高風速下的側向力：重心位置下 > 上 = 側 > 中。

(2) 在中風速下的側向力：重心位置上 > 側 > 下 > 中。

(3) 在低風速下的側向力：重心位置上 > 中 > 側 > 下。

2. 總和結果：風速越大以及重心位置在上及下方所產生的側向力越大，在風速

8.3 m/s 種子重心位置在下方其側向力最大為 0.47gw。

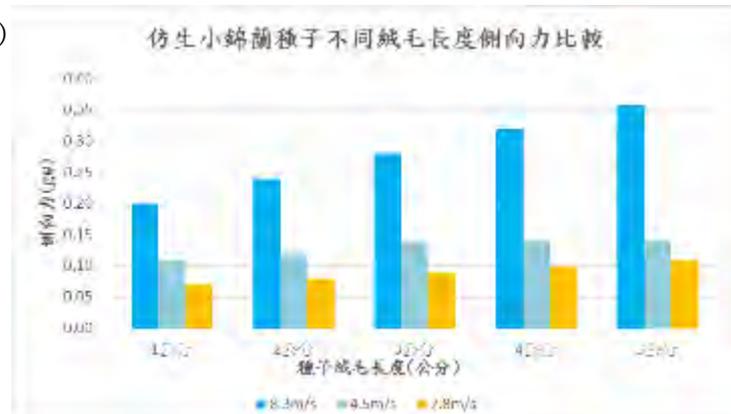
(五) 小錦蘭種子不同絨毛長度

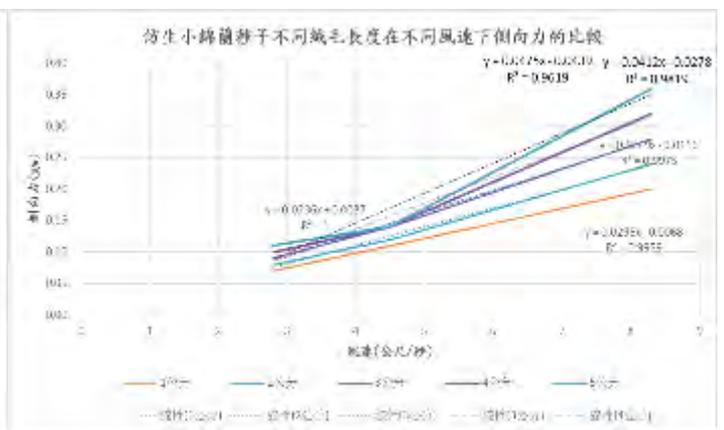
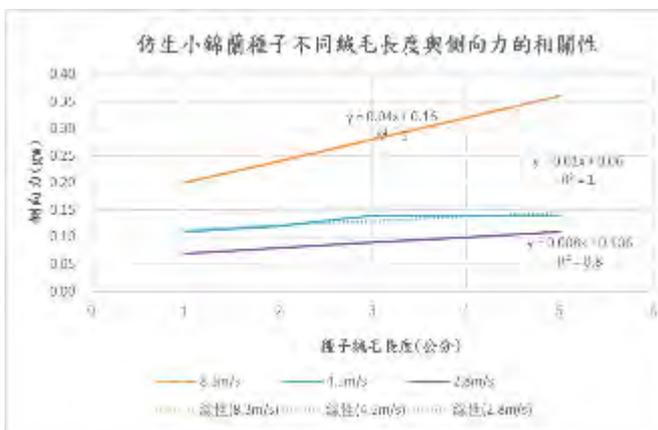


1. 分別將其絨毛長度剪成 1、2、3、4、5cm
2. 將不同長度絨毛與種子黏附
3. 製成不同絨毛長度的種子

表十一：不同仿生種子絨毛長度側向力(gw)

長度 cm	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
1 公分	0.20	0.11	0.07
2 公分	0.24	0.12	0.08
3 公分	0.28	0.14	0.09
4 公分	0.32	0.14	0.10
5 公分	0.36	0.14	0.11





1. 不同種子絨毛長度側向力：種子絨毛長度與側向力的大小呈正相關。

(1) 在高風速下的側向力：種子絨毛長度 5 > 4 > 3 > 2 > 1 公分。

(2) 在中風速下的側向力：種子絨毛長度 5 = 4 = 3 > 2 > 1 公分。

(3) 在低風速下的側向力：種子絨毛長度 5 > 4 > 3 > 2 > 1 公分。

2. 不同風力下側向力：所有種子的側向力與風速大小都呈顯著的正相關，風速越大其側向力也越大。

3. 總和結果：風速越大以及種子絨毛長度越長，所產生的側向力越大，在風速

8.3 m/s 下，種子絨毛長度 5 公分，其側向力最大為 0.36gw。

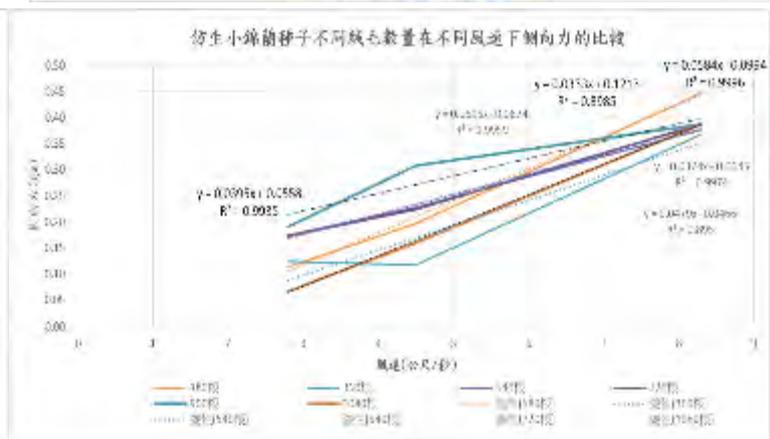
(六) 小錦蘭種子不同絨毛數量



1. 將種子分別黏接 180、360、540、720、900 以及 1080 根毛
2. 將不同數量的絨毛與種子黏附
3. 製成不同數量絨毛種子

表十二：不同仿生種子絨毛數量側向力(gw)

	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
180 根	0.45	0.20	0.11
360 根	0.37	0.12	0.12
540 根	0.38	0.23	0.17
720 根	0.39	0.22	0.17
900 根	0.39	0.31	0.19
1080 根	0.38	0.16	0.07



- 不同種子絨毛數量側向力：種子絨毛數量與側向力的大小相關性小。
 - (1)在高風速下的側向力：種子絨毛數量 $720=900>1080=540>180>360$ 根。
 - (2)在中風速下的側向力：種子絨毛數量 $900>540>720>180>1080>360$ 根。
 - (3)在低風速下的側向力：種子絨毛數量 $900>540=720>360>180>1080$ 根。
- 不同風力下側向力：所有種子的側向力與風速大小都呈顯著的正相關，風速越大其側向力也越大。
- 總和結果：風速越大，所產生的側向力越大；但絨毛數量並沒有與側向力大小呈正相關。在風速 8.3 m/s 下，種子絨毛數量 720 及 900 根，其側向力最大為 0.39gw。

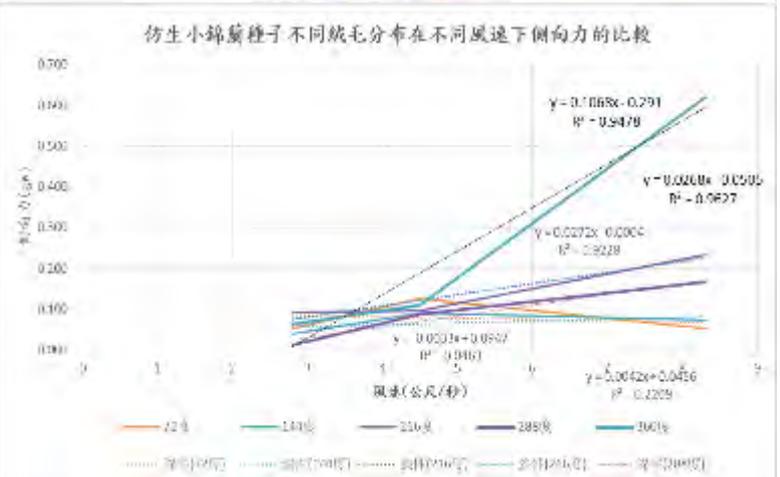
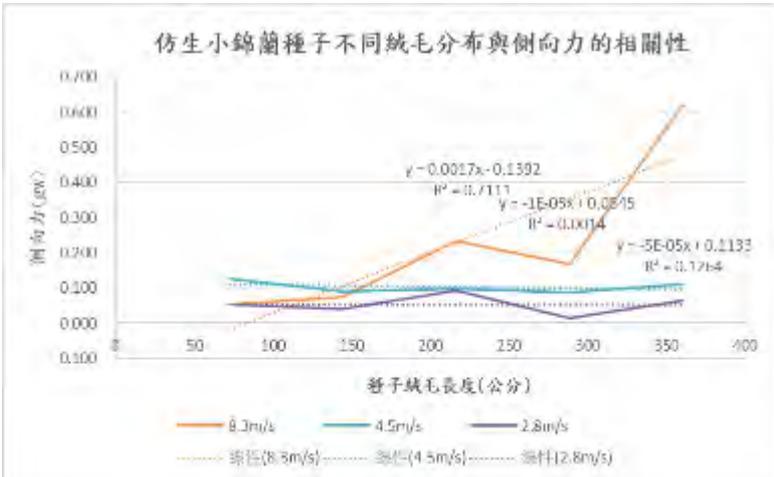
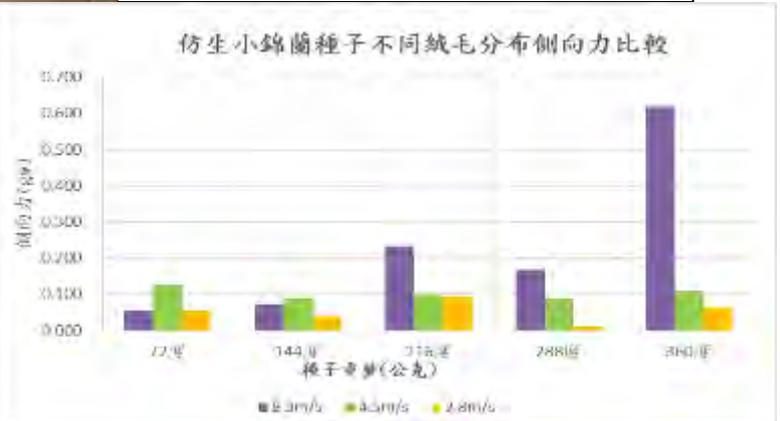
(七)小錦蘭種子不同絨毛分布



- 將絨毛黏分以 1/5 圓、2/5 圓、3/5 圓、4/5 圓以及全圓
- 與種子黏合
- 將絨毛以不同對稱方式與種子黏附
- 製成不同對稱狀況的絨毛種子

表十三：不同仿生種子絨毛分布側向力(gw)

	8.3m/s	4.5m/s	2.8m/s
180根	0.45	0.20	0.11
360根	0.37	0.12	0.12
540根	0.38	0.23	0.17
720根	0.39	0.22	0.17
900根	0.39	0.31	0.19
1080根	0.39	0.16	0.07



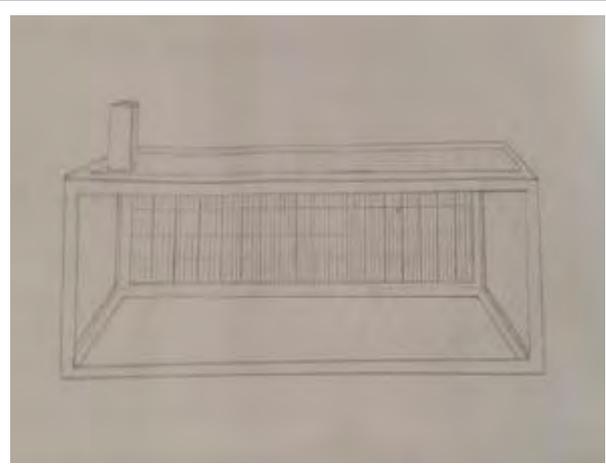
1. 不同種子絨毛分布側向力：種子絨毛分布角度越大與側向力的大小呈正相關。
 - (1) 在高風速下的側向力：種子絨毛分布 $360 > 216 > 288 > 144 > 72$ 度。
 - (2) 在中風速下的側向力：種子絨毛分布 $72 > 360 > 216 > 144 > 288$ 度。
 - (3) 在低風速下的側向力：種子絨毛分布 $216 > 360 > 72 > 144 > 288$ 度。
2. 不同風力下側向力：所有種子的側向力與風速大小都呈正相關，風速越大其側向力也越大。
3. 總和結果：風速越大以及種子絨毛分布 360 度，所產生的側向力越大，在風速 8.3 m/s 下，種子絨毛種子絨毛分布 360 度，其側向力最大為 0.62gw。

實驗四、探究仿生小錦蘭種子的飛行軌跡

目的：探討仿生種子在不同變因下的飛行軌跡(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

方法：(一)種子飛行軌跡儀器製作 **第一代飛行軌跡儀器製作**

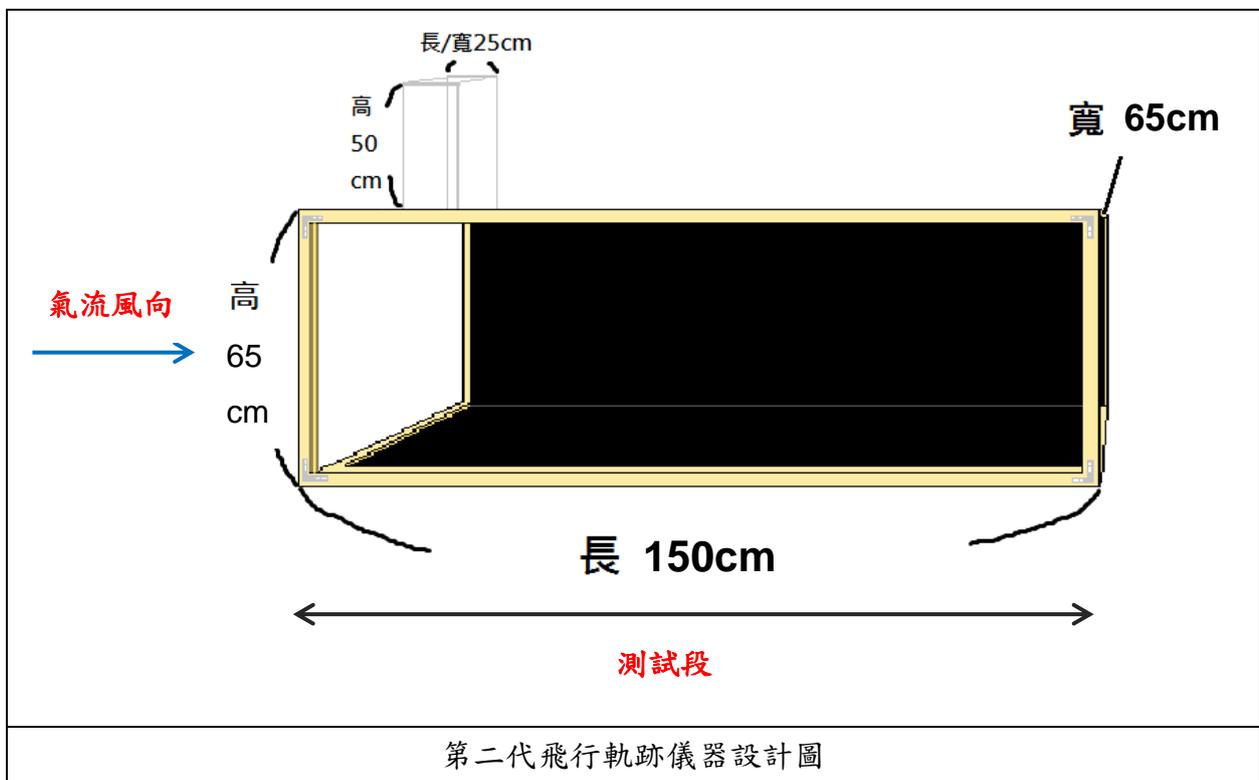
1. 動力：利用電風扇提供風力
2. 測試段：用瓦楞板製作外框再用透明塑膠片製作外壁
3. 風力提供：風速大小由距離測試儀器遠近控制(遠、中、近)並測量風速

		絨毛種子放置處
<p>第一代飛行軌跡儀器設計圖</p>	<p>第一代飛行軌跡儀器完成圖</p>	
		
<p>第一代飛行軌跡儀器動力</p>	<p>第一代飛行軌跡儀器測試</p>	

結果與討論：儀器完成後我們實際實驗，結果發現風的流向紊亂，導致種子飛行過程中軌跡左右搖晃；此外由於測試段的距離過短，種子有時會飛到測試段外面，而沒有辦法確實測量到種子的水平距離。經過討論後我們重新設計改造第一代儀器。

第二代飛行軌跡儀器製作

1. 動力：利用兩台工業用電風扇提供風力
2. 整流段：利用瓦楞板先製作外框，再將粗吸管將內部填滿，讓工業電扇吹出的風經過吸管整流
3. 測試箱：利用木條製作外框做為支撐，因為要阻擋外部的風及攝影，所以我們利用透明壓克力板當作外層
4. 絨毛種子放置處：利用四片壓克力板作為外壁用熱熔膠黏接一根管子，並將空的底部與測試箱黏接，做為放置絨毛種子的地方





第二代飛行軌跡儀器完成圖



整流段



工業扇提供動力



測試段



檢測氣流：
我們在完成動力段以及整流段後，將紙帶黏附在整流段後方，以確認風的流向是否平穩，以利之後實驗進行。

結果與討論：第二代儀器我們增加了整流段改善了氣流紊亂的問題，並且加長了測試段的長度，讓種子的飛行軌跡可以更清楚的觀察到，此外更加強了我們原本的動力段，可以讓種子飄散的更遠，可增加種子的滯空時間。

儀器改良過程

第一代儀器

缺點:沒有整流段風的流向紊亂,軌跡飄移;測試段的距離過短,種子會飛到外面



第二代儀器

增加了整流段改善了氣流紊亂的問題,並且加長了測試段的長度,讓種子的飛行軌跡可以更清楚的觀察到,此外更加强了我們原本的動力段,可以讓種子飄散的更遠

(二)飛行軌跡儀器風速測量

1. 我們將風洞劃分成九宮格,並使用風速計測量每一區塊的風速,測量後的數據如下表十四所示:

弱風			中風			強風		
1.2	1.7	2.0	3.0	2.7	2.5	4.3	5.0	4.8
2.2	2.8	2.2	4.0	4.5	4.0	6.8	8.3	6.8
2.2	2.3	2.2	3.8	4.3	3.8	4.8	5.8	5.3

2. 將來測試仿生種子飛行軌跡使用這三種風速進行實驗:弱風的風速 2.8m/s, 中風為風速 4.5m/s, 強風風速為 8.3m/s。

(三)種子飛行軌跡實驗過程

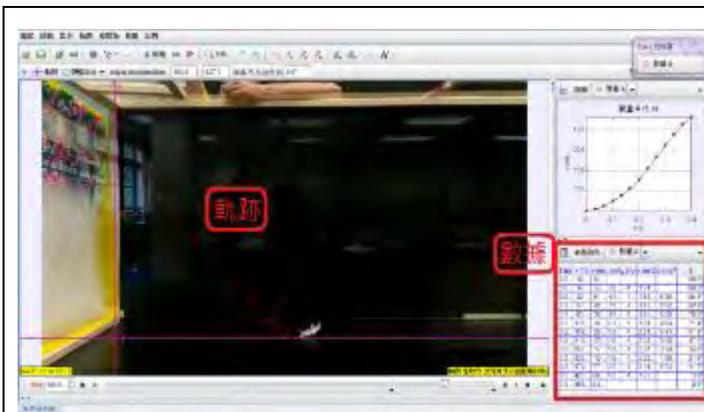
1. 將要測試的仿生種子放置於飛行軌跡儀器中
2. 使用數位相機攝影,每個變因測試三次
3. 攝影的影片使用軟體分析



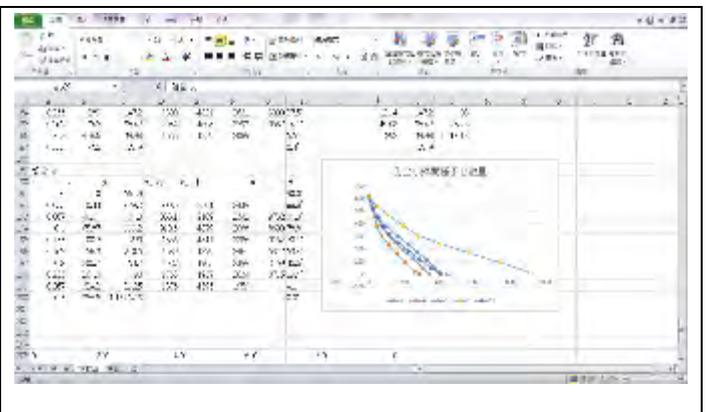
(四)實驗分析方法

實驗中我們使用 Tracker 軟體分析絨毛種子的飛行軌跡,並且使用軟體計算飛行時的數值。

放置絨毛種子後
攝影種子的軌跡影片



1. 利用程式 tracker 來分析軌跡



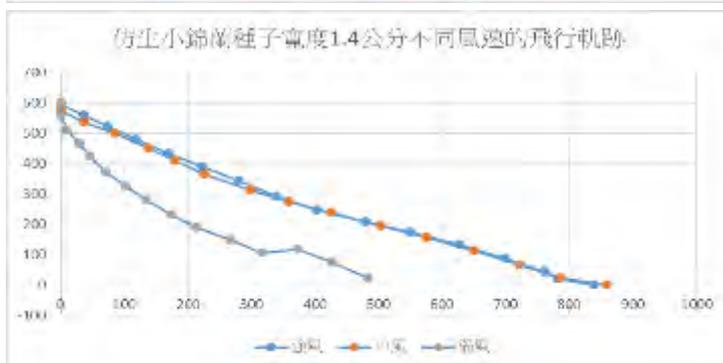
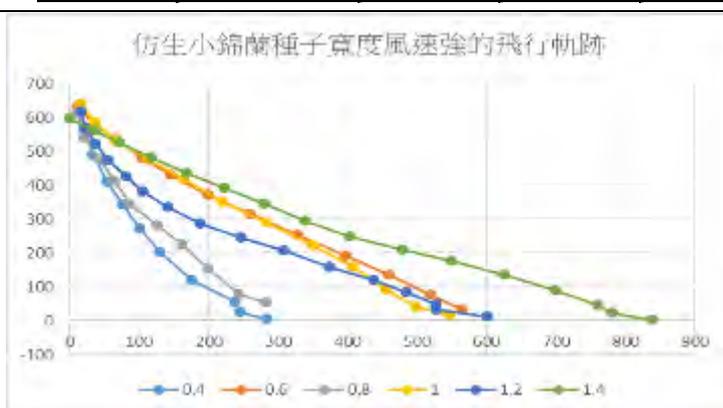
2. 用 excel 來計算並製作圖表

結果：

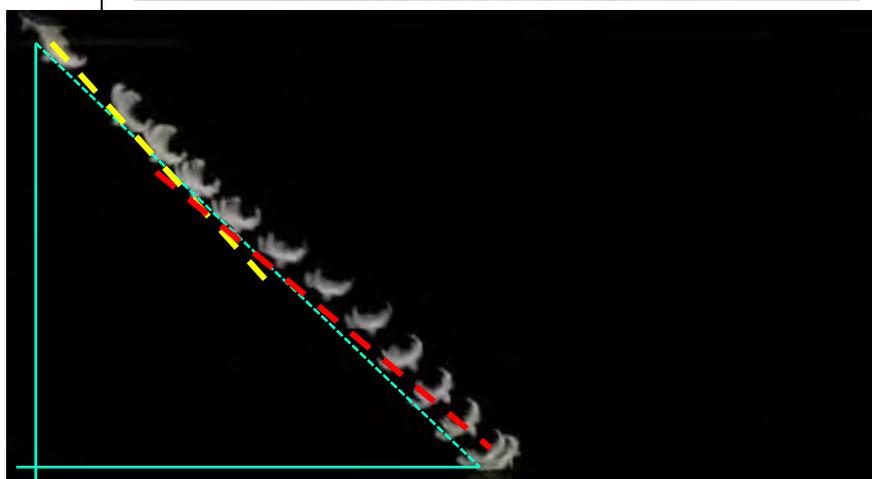
(一)仿生小錦蘭種子不同寬度的飛行軌跡

表十五、仿生種子不同種子寬度飛行軌跡

風速	種子寬度 (cm)	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行 距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	0.4	0.3	230.7	142.67	265.66	181.27	0.409
	0.6	0.4	190.23	141.77	581.6	126.77	0.895
	0.8	0.3	237.1	125.4	268.56	201.1	0.413
	1	0.36	198.97	126.07	506.44	137.63	0.779
	1.2	0.47	164.53	130.87	555.72	99.5	0.855
	1.4	0.47	244.3	199.73	839.7	140.23	1.410



1. 滯空時間為寬度 1.4 公分最久
2. 落地速率為寬度 0.8 公分最大
3. 水平速率為寬度 0.4 公分最大
4. 水平飛行距離為寬度 0.6 公分最遠
5. 垂直速率為寬度 0.8 公分最大
6. 滑空比為寬度 1.4 公分最大
7. 從飛行軌跡可以發現寬度 1.4 公分的種子可以飛行到最遠
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的寬度 1.4 公分的仿生種子為例，滑空比強風 1.41 大約與中風 1.49 相似，遠大於弱風 0.83。



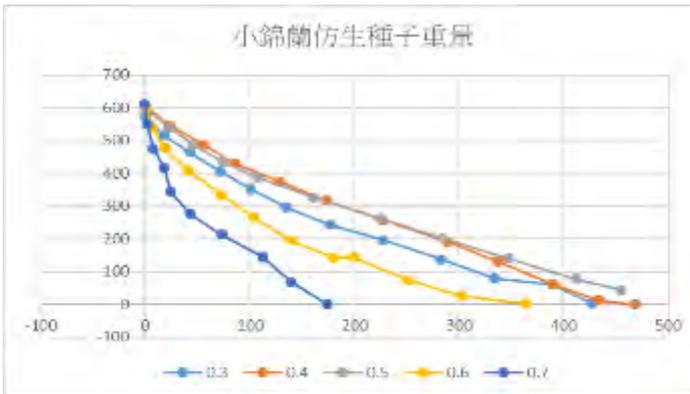
種子寬度 1.4 公分在強風下飛行軌跡

1. 種子寬度 1.4 公分在強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.88x + 588.97$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.5825x + 488.79$ 。從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

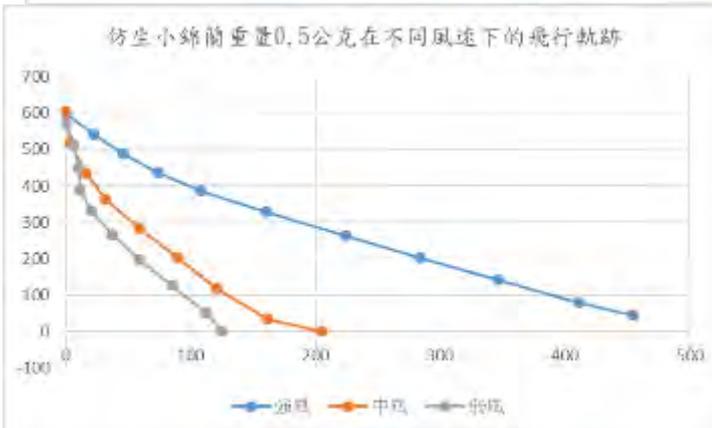
(二) 仿生小錦蘭種子不同重量的飛行軌跡

表十六、仿生種子不同種子重量飛行軌跡

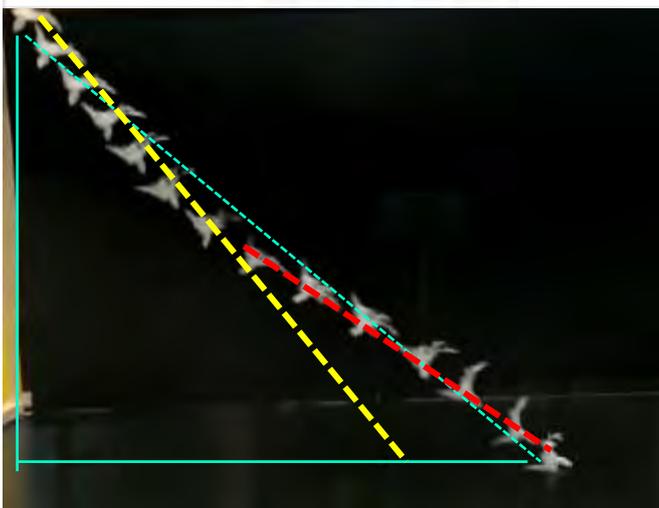
風速	種子重量 (gw)	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	0.3	0.35	215.76	127.27	457.03	172.77	0.75
	0.4	0.34	224.33	100.87	451.47	168.17	0.62
	0.5	0.35	226.37	157.9	490.42	160.73	0.99
	0.6	0.31	225.13	140.23	299.7	173.7	0.83
	0.7	0.3	226.97	95.94	174.74	217.43	0.44



1. 滯空時間為重量 0.3/0.5gw 最久
2. 落地速率為重量 0.7gw 最大
3. 水平速率為重量 0.5gw 最大
4. 水平飛行距離為重量 0.5gw 最遠
5. 垂直速率為重量 0.7gw 最大
6. 滑空比為重量 0.5gw 最大
7. 種子為 0.5gw 的種子可以飛行的最遠



8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的種子為 0.5gw 的仿生種子為例，滑空比強風 0.99 大於中風 0.34，遠大於弱風 0.22。



種子重量 0.5 公克在強風下飛行軌跡

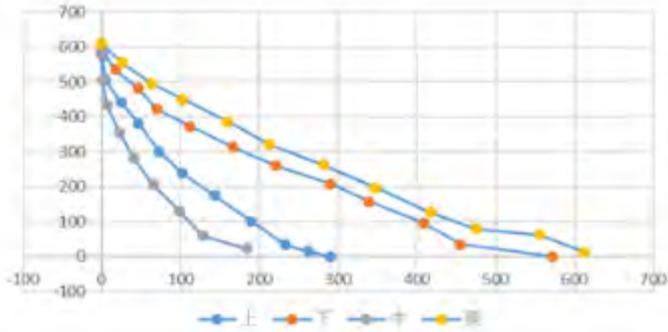
1. 種子重量 0.5 公克在強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.6665x + 576.14$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.9599x + 475.57$ 。從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

(三) 仿生小錦蘭不同重心位置的飛行軌跡

表十七、仿生種子不同重心位置種子飛行軌跡

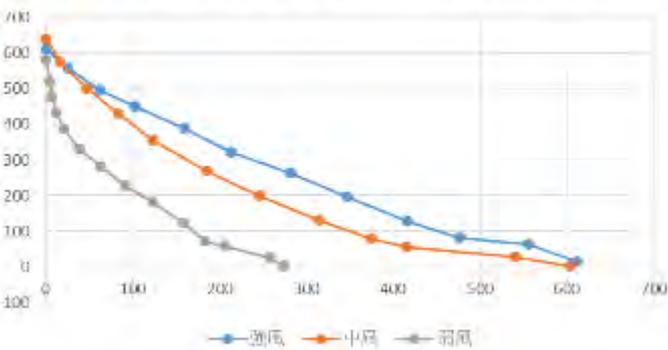
風速	重心	滯空時間	落地速率	水平速率	水平飛行	垂直速率	滑空比
		(s)	(cm/s)	(cm/s)	距離(mm)	(cm/s)	
強風	上	0.299	207	118.9	263.1	168.1	0.46
	中	0.27	238.53	108.69	169.1	210.87	0.29
	下	0.36	246.37	146.8	489.6	178.37	0.84
	側	0.35	234.73	169.07	567.2	161.63	0.94

仿生小錦蘭重心



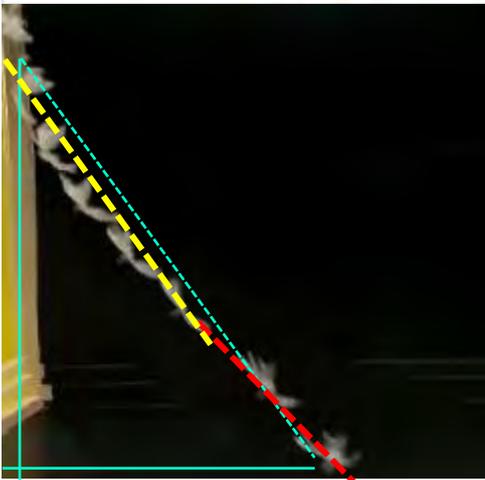
1. 滯空時間為重心在下最久
2. 落地速率為重心在下最大
3. 水平速率為重心在側最大
4. 水平飛行距離為重心在側最遠
5. 垂直速率為重心在中最大
6. 滑空比為重心在側邊最大
7. 種子重心在側邊可以飛行的最遠
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的重心在側邊的仿生種子為例，滑空比強風 0.94 大於中風 0.93，遠大於弱風 0.47。

仿生小錦蘭重心在側邊不同風速下的飛行軌跡



種子重心在側邊在強風下飛行軌跡

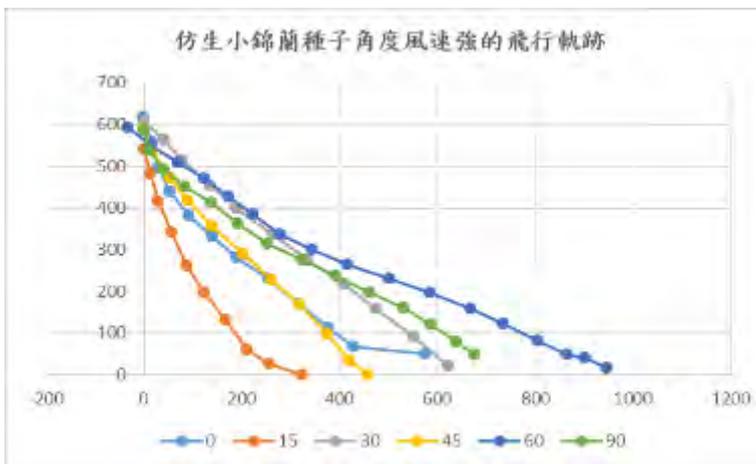
1. 種子重心在側邊強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.3061x + 593.11$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.7253x + 448.74$ 。從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩



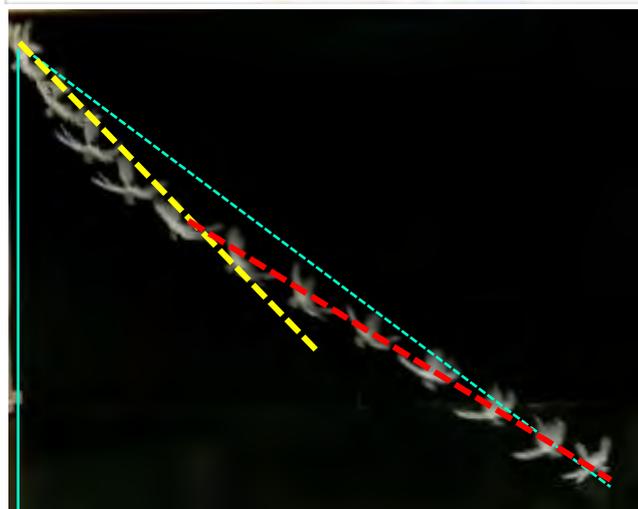
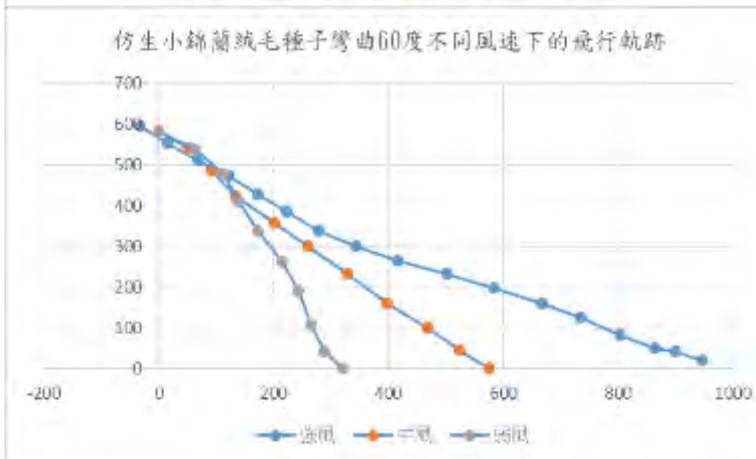
(四) 仿生小錦蘭種子不同彎曲角度的飛行軌跡

表十八、仿生種子不同彎曲角度的飛行軌跡

風速	彎曲角度 (度)	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行 距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	0	0.38	237.6	133.9	576.4	152.1	0.887
	15	0.27	203.1	130.2	323.1	237.6	0.497
	30	0.36	241	174.1	621.2	165	0.956
	45	0.33	196.8	140.4	457.5333	149	0.704
	60	0.43	208.8	144.7	1106	150.5	1.702
	90	0.48	159.8	128.3	676.8333	122.7	1.041



1. 滯空時間為 90° 最久
2. 落地速率為 30° 最大
3. 水平速率為 30° 最大
4. 水平飛行距離為 60° 最遠
5. 垂直速率為 15° 最大
6. 滑空比為 60° 最大
7. 種子彎曲角度 60 度可以飛行的最遠
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的彎曲 90 度在的仿生種子為例，滑空比強風 1.7 大於中風 0.99，遠大於弱風 0.55。



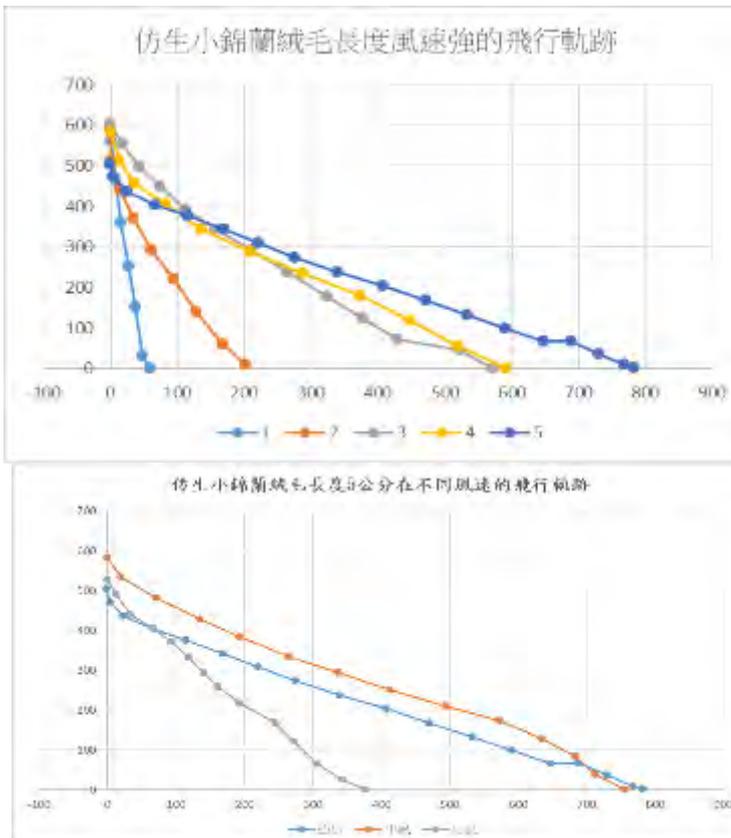
種子彎曲角度 60 度在強風下飛行軌跡

1. 種子彎曲 60 度強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.6834x + 549.4$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.5029x + 490.83$ 。
3. 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

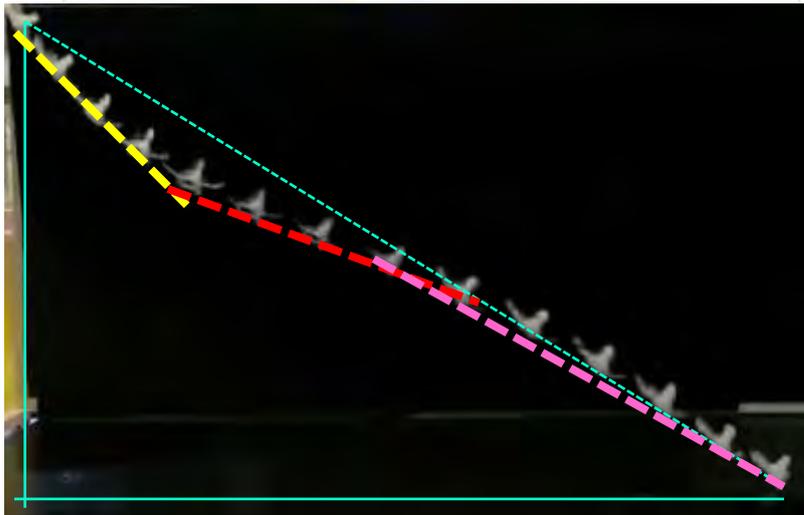
(五) 仿生小錦蘭不同絨毛長度的飛行軌跡

表十九、仿生種子不同絨毛長度的飛行軌跡

風速	絨毛長度 (cm)	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行 距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	1	0.19	278	40.9	59.12	274.93	0.091
	2	0.28	198.43	100.11	215.6	170.5	0.332
	3	0.38	204.43	140.13	571.7	140.13	0.880
	4	0.36	200.2	200.2	641.1	178.9	0.986
	5	0.51	154.24	124.48	782.9	91.05	1.204



1. 滯空時間為 5cm 最久
2. 落地速率為 1cm 最大
3. 水平速率為 4cm 最大
4. 水平飛行距離為 4cm 最遠
5. 垂直速率為 1cm 最大
6. 滑空比為 5cm 最大
7. 種子絨毛長度 5 公分飛行距離最遠
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠絨毛長度 5 公分為例，滑空比強 1.204 大於中風 1.16，遠大於弱風 0.77。



種子絨毛長度 5 公分在強風下飛行軌跡

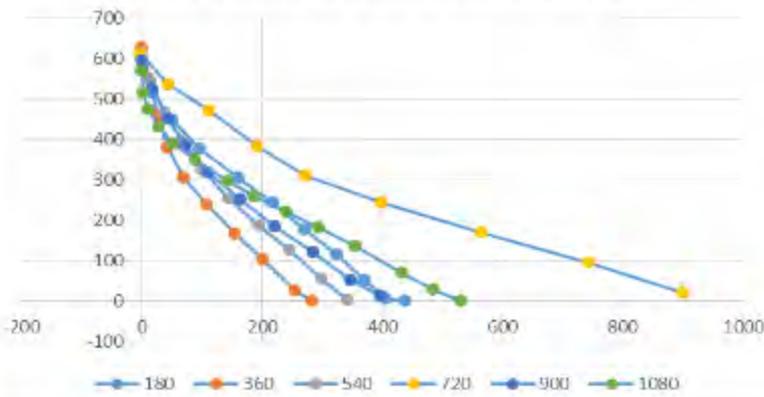
1. 飛行軌跡可以區分成三段，第一段軌跡為黃色，第二段軌跡為紅色，第三段軌跡為粉紅色
2. 第一段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.0132x + 468.58$ ；第二段軌跡為紅色線性關係為 $y = -0.5838x + 439.09$ ；第三段軌跡 $y = -0.504x + 400.02$
3. 從三個軌跡的斜率可以發現第一段軌跡斜率 > 第二段斜率 > 第三段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

(六) 仿生小錦蘭不同絨毛數量的飛行軌跡

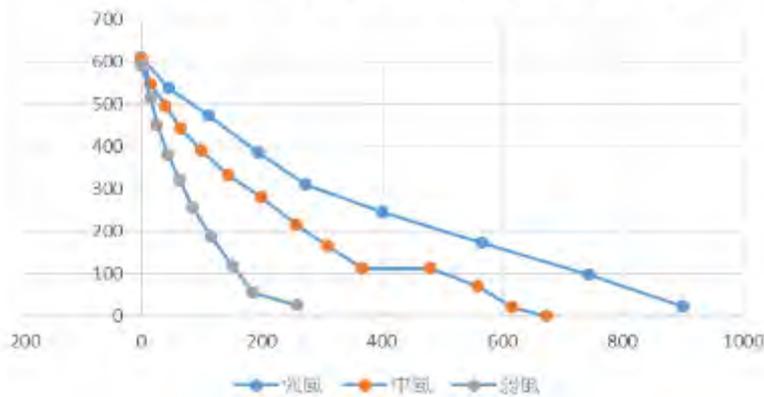
表二十、仿生種子不同絨毛數量的飛行軌跡

風速	絨毛數量 根	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行 距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	180	0.311	178.67	123.57	413.77	139.47	0.69
	360	0.289	245.13	154.37	287.63	189.23	0.46
	540	0.311	200.63	142.73	348.3	156.3	0.56
	720	0.278	274.23	168.57	905	215.7	1.53
	900	0.311	215.97	154.37	409.9	149.83	0.7
	1080	0.45	202.27	136.53	541.8	142.13	0.95

仿生小錦蘭絨毛數量風速強的飛行軌跡



仿生小錦蘭720根絨毛種子不同風速下的飛行軌跡



1. 滯空時間為 1080 根最久
2. 落地速率為 720 根最大
3. 水平速率為 720 根最大
4. 水平飛行距離為 720 根最遠
5. 垂直速率為 720 根最大
6. 滑空比為 720 根最大
7. 種子飛行距離最長的為絨毛數 720 根
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的重心在側邊的仿生種子為例，滑空比強風 1.53 大於中風 1.11 相似，遠大於弱風 0.44。



種子絨毛數量 720 根在強風下飛行軌跡

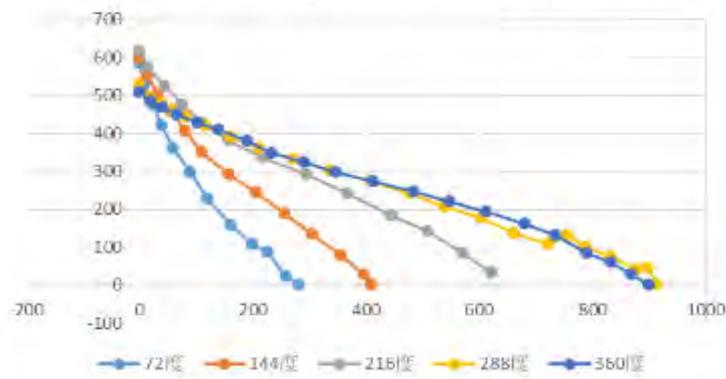
1. 飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.0018x + 582.05$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.4543x + 430.47$ 。
3. 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 $>$ 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

(七) 仿生小錦蘭不同絨毛分布的飛行軌跡

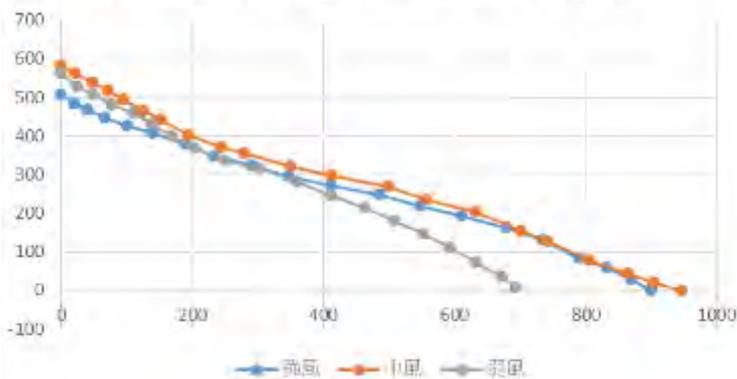
表二十一、仿生小錦蘭不同絨毛分布的飛行軌跡

風速	絨毛分布	滯空時間 (s)	落地速率 (cm/s)	水平速率 (cm/s)	水平飛行距離(mm)	垂直速率 (cm/s)	滑空比
強風	72度	0.32	197.6	98.48	260.7	170.9	0.44
	144度	0.39	186.43	118.9	419.2	143.03	0.7
	216度	0.42	232.1	162.56	650.8	165.37	1.05
	288度	0.61	182.33	131.91	853.2	119.83	1.62
	360度	0.633	99.23	61.31	912.2	78.03	1.83

仿生小錦蘭絨毛分布風速強的飛行軌跡



仿生小錦蘭絨毛分布360度在不同風速下的飛行軌跡



1. 滯空時間為絨毛分布 360 度最久
2. 落地速率為絨毛分布 72 度最大
3. 水平速率為絨毛分布 216 度最大
4. 水平飛行距離為絨毛分布 360 度最遠
5. 垂直速率為絨毛分布 72 度最大
6. 滑空比為絨毛分布 360 度最大
7. 種子飛行距離最長的為絨毛分布 360 度
8. 在不同風速下，風速越強，水平滑行的距離越遠，以滑空比最遠的絨毛分布 360 度種子為例，滑空比強風 1.83 大於中風 1.62，遠大於弱風 1.27。

種子絨毛分布 360 度在強風下飛行軌跡

1. 飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
2. 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.6457x + 498.01$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.4646x + 464.52$ 。
3. 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

(八)總和結果：

1. 實驗中最佳飄移的絨毛種子，如下表所示：
表二十二、實驗中七種變因最佳的絨毛種子

	滑空比	飛行斜率 吹風前	飛行斜率 吹風後	飛行斜率 斜率差
種子寬度1.4公分	1.410	-0.88	-0.58	0.3
絨毛數量720根	1.53	-1.67	-0.96	0.71
種子重量0.5公克重	0.99	-1.31	-0.72	0.59
彎曲角度60度	1.702	-0.68	-0.5	0.18
重心在側邊	0.94	-1.01	-0.58	0.43
絨毛長度5公分	1.204	-1	-0.45	0.55
絨毛分布360度	1.83	-0.64	-0.46	0.18

- (1) 實驗中不同變因的滑空比：絨毛分布 360 度 > 種子彎曲 60 度 > 絨毛數量 720 根 > 種子寬度 1.4 公分 > 絨毛長度 5 公分 > 種子重量 0.5 公克 > 重心在側邊
- (2) 若以飛行軌跡斜率差來看：絨毛數量 720 根的斜率比其他變因顯著的高，而絨毛 5 公分長度則是飛行軌跡斜率分成三段

陸、討論

一、種子相關數值對於飛行的影響

(一)研究所選擇的三種種子其基本型態上有些許不同，小錦蘭及繆絨花的絨毛長在種子的頂端，而芒草的絨毛長在種子底端；種子的體型以小錦蘭最大，芒草和繆絨花兩者的體型較相近。

(二)觀察真實種子自由落下的軌跡，會往左右偏移。比較三種種子自由落下的幾個數據後發現，滯空時間和水平位移都是繆絨花 > 芒草 > 小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 都是繆絨花 < 芒草 < 小錦蘭。進一步分析數據間的

線性關係發現結果如下表二十三：

變因	線性關係		
滯空時間與種子質量	$y = -0.0169x + 0.0546$	$R^2 = 0.5203$	負相關
水平位移與種子質量	$y = -0.0088x + 0.0673$	$R^2 = 0.9624$	負相關
平均速度與種子質量	$y = 0.0005x - 0.0246$	$R^2 = 0.8205$	正相關
水平位移與平均速度	$y = -14.79x + 162.41$	$R^2 = 0.9424$	負相關

顯示種子較輕較容易飄移，速度及加速度較慢，滯空時間較長，推測絨毛種子越輕越有利飄散，

然而越輕穩定性較差，推測有可能在飄移過程無法很穩定的飄散。此外，三種種子在落下過程因為有絨毛產生阻力，降落過程的加速度小錦蘭為 469.42cm/s^2 ，芒草為 134.127cm/s^2 ，而繆絨花為 28.039cm/s^2 ，遠小於自由落體加速度 980cm/s^2 ，顯示絨毛種子在空氣中因構造降低了自由落體的加速度，而延長在空中滯留的時間，以達到傳播種子到遠方的能力。

二、仿生種子的側向力

以強風的風速來看，實驗中最佳側向力種子如下表二十四：

最佳種子	寬度	彎曲度	重量	重心	絨毛長度	絨毛數量	絨毛分布
	1.2 公分	90 度	0.3 公克	在下	5 公分	720 及 900 根	360 度
側向力(gw)	0.7	0.39	0.49	0.47	0.36	0.39	0.62

顯示不論以種子本體或是絨毛為操作變因側向力都有顯著差異，寬度 1.2 公分並非最大或最小，推測種子受風面太大或太小都不利傳播；而重量越輕越容易散播；重心在下方推測穩定性較高，側向力較大；此外絨毛數量以 720 及 900 根所產生的側向力最大，並非是實驗中最多的絨毛數量，顯示並非數量多就較佳，而是有最合適的數量；而絨毛均勻分布且較長能夠造就較穩定及較大的降落傘的投影面積，也因此產生的側向力較大，顯示絨毛種子的絨毛對於側向力的大小有其顯著的影響，符合傳播時絨毛為傳播的主力。

三、種子傳播的飛行軌跡

1. 種子寬 1.4 公分飛行的距離較遠，因為受風面積比較大，所以飛的距離也較遠。
2. 重量實驗中 0.5 公克重的種子飛得最遠其餘重量越輕越飛得遠，我們推測是因

為太輕的沒有重心所以飛行時不穩定，容易偏移所以飛得不遠太重又增加落地速率，因此一下就掉落，也飛得不遠。3. 重心在側邊的種子滑空比最佳，推測是因為我們實驗中所附著的為迴紋針，在側邊相當於穩固整個種子，讓種子飛行的較遠。4. 種子彎曲角度以 60 度最佳，推測有彎曲度的種子能在受風過程飄移，而有較好的滑空比，在大自然中無此角度種子，可能在生長過程中不易發育。5. 在絨毛長度實驗中 5 公分的絨毛飛得最遠，因較長的絨毛有較大的翼載荷，投影面積也較大，在空氣中的阻力也較大所以飄得較遠。6. 絨毛數量以 720 根毛的滑空比最佳，比 900 及 1080 根毛來的好，推測絨毛越多翼載荷大，有利於飛行；但是絨毛越多重量越大，會影響飛行。7. 絨毛分布實驗中 5/5 圓(360 度)飛得最遠，滑空比大小依照分布 1/5~5/5 由小而大。顯示分布均勻飛行的距離也越遠，因為絨毛擠在一起，會重疊，重疊的絨毛不會增加對空氣的阻力。所以分布 5/5 圓的重疊絨毛數量較少所產生的翼載荷也大，飄的最遠。8. 我們試著在種子飛行的軌跡觀察受風影響前後的軌跡狀況，對照前後的線性軌跡，結果顯示仿生種子受風後都變平緩，顯示受風飛行可以增加滯空時間以及飄移距離。若以飛行軌跡斜率差來看：絨毛數量 720 根的斜率比其他變因顯著的高，而絨毛 5 公分長度則是飛行軌跡斜率分成三段，顯示絨毛對於種子飛行模式影響顯著。

三、未來展望

目前以種子結構及種子受風後的飛行模式為研究，我們希望可以用電子顯微鏡更清楚觀察三種絨毛種子絨毛部分的初級和次級纖維排列方式除此之外觀察絨毛種子在空氣通過絨毛間孔隙的流體情形，希望設計相關的渦流實驗，觀察種子絨毛的空氣流動狀態，找出能夠使種子飛得較遠的最佳因素。在應用方面，希望能藉由觀察絨毛孔隙率及滲透率，設計穩定的飛行和非常高效的降落傘速度。

柒、結論

一、真實種子滯空時間和水平位移都是繖絨花 > 芒草 > 小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 都是繖絨花 < 芒草 < 小錦蘭。三種種子在落下過程因為有絨毛產生阻力，降落過程的加速度遠小於自由落體加速度 980cm/s^2 。

二、仿生種子最佳的側向力：寬度 1.2 公分，彎曲度 90 度，重量 0.3 公克，重心在下，絨毛長度 5 公分，絨毛數量 720 及 900 根，絨毛分布 360 度。

三、最佳種子滑空比：絨毛分布 360 度，種子彎曲 60 度，絨毛數量 720 根，種子寬度 1.4 公分，絨毛長度 5 公分，種子重量 0.5 公克，重心在側邊。若以仿生種子受風前後，飛行軌跡斜率差來看：絨毛 720 根的斜率比其他變因顯著的高，而絨毛 5 公分則是飛行軌跡斜率分成三段，顯示絨毛對種子飛行模式影響顯著。

捌、參考文獻

一、中華民國第 57 屆中小學科展-斷尾球「生」-探討羽球羽毛對飛行的影響

二、Vincent Casseau, Guido De Croon, Dario Izzo(2015) Morphologic and Aerodynamic Considerations Regarding the Plumed Seeds of *Tragopogon pratensis* and Their Implications for Seed Dispersal. published 04 May 2015

PLOS ONE.

【評語】 030106

雖為常見研究題材，但樣品取材具新意，實驗結果撰寫有系統具學術價值。雖然考量複雜的流體力學，但還是能歸納出簡潔的科學規律，若能多在量測側向力與種子的水平距離上多做探討，則更具科學價值。

摘要

研究發現真實種子滯空時間和水平位移為繖絨花 > 芒草 > 小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 為繖絨花 < 芒草 < 小錦蘭。仿生種子最佳的側向力：寬度1.2公分，彎曲度90度，重量0.3公克，重心在下，絨毛長度5公分，絨毛數量720及900根，絨毛分布360度。最佳種子滑空比：絨毛分布360度，種子彎曲60度，絨毛數量720根，種子寬度1.4公分，絨毛長度5公分，種子重量0.5公克，重心在側邊。而在側向力與飛行模式實驗中，種子本身變因與其相關性較小，與絨毛相關性較大，顯示絨毛種子的絨毛對於種子的飛行模式具有高度的影響力。

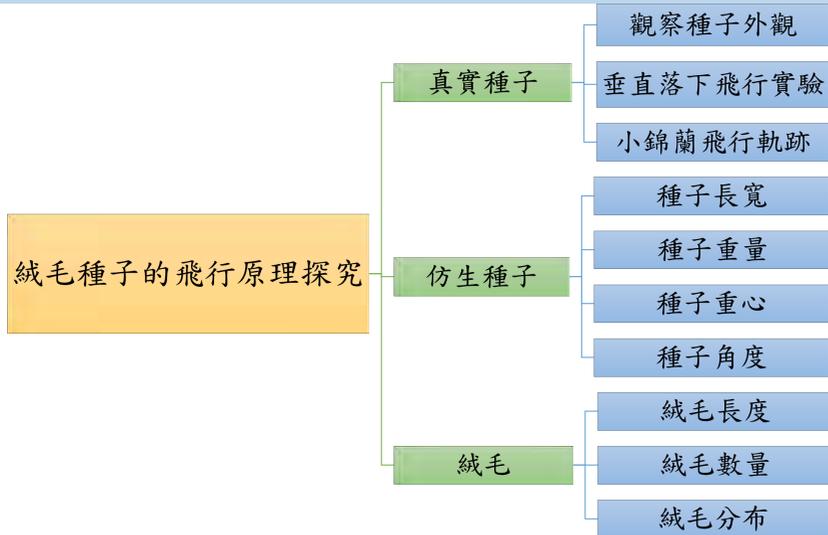
壹、研究動機

夏去秋來，涼爽的秋風吹起一地的落葉，常會沿途看見芒草滿天飛舞的景象，自從看到芒草隨風飄逸的景象後，那畫面就一直深深地烙印在我們的腦海裡，並讓我們產生許多疑惑和興趣，在學校路邊和校園中採集芒草、繖絨花和小錦蘭，希望能藉由研究絨毛種子，更深入了解這些具有冠毛降落傘的飛行模式。

貳、研究目的

- 一、觀察絨毛種子外觀以及探究真實絨毛種子自由落下軌跡模式
- 二、探究仿生小錦蘭種子在不同風速下對其產生側向力的影響 (包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)
- 三、探究仿生小錦蘭種子的飛行軌跡 (包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

參、研究架構圖



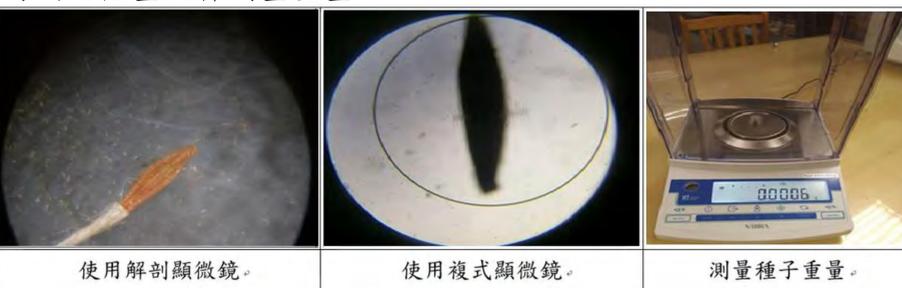
肆、研究器材設備及研究原理

實驗用。	風速計。	用來測量側向力裝置，和軌跡裝置的風速，單位為 m/s。
	微量天平。	用來測量側向力，準確度為小數點後四位，單位為 g。
分析用。	Tracker。	用來分析軌跡的電腦程式，並且可以算出速率。
	excel。	用來計算升力以及軌跡的數據。

伍、研究步驟及研究結果

實驗一、觀察絨毛種子的外觀

目的: 得知種子的外觀，比較種子特性，作為仿生種子的基本數據
方法: (一) 在路邊或校園中找到繖絨花、芒草和小錦蘭並帶回實驗室，使用解剖顯微鏡和複式顯微鏡觀察。
 (二) 觀察繖絨花、芒草和小錦蘭種子長寬、絨毛的長度、數量，再利用微量天秤測量重量。



表一、絨毛種子特徵比較

種類	測量後種子的數據	特徵
小錦蘭	冠毛數量：435.5 根 冠毛長度：3.21 cm 種子長：16.3 mm 種子寬：5.9 mm 種子重量：0.06019 g 種子面積：75.49 mm ²	小錦蘭的冠毛都附著在種子的頂端，是三種種子中最大的，種子外型較偏向菱形的橢圓形
繖絨花	冠毛數量：99.7 根 冠毛長度：1.54 cm 種子長：3 mm 種子寬：0.828 mm 種子重量：0.00025 g 種子面積：19.499 mm ²	繖絨花冠毛附著在種子的頂端，是三種種子中最小的，種子外型較偏向瘦長的橢圓形
芒草	冠毛數量：117.9 根 冠毛長度：0.66 cm 種子長：5 mm 種子寬：0.735 mm 種子重量：0.00031g 種子面積：28.848 mm ²	芒草種子的冠毛附著在種子底端。冠毛是所有種子最短的，種子外型為長型

絨毛種子的翼載荷

$$\text{絨毛種子翼載荷(wing loading)} = \frac{\text{種子質量(mass)}}{\text{絨毛投影面積(projected area)}}$$

表二、繖絨花、小錦蘭和芒草絨毛種子翼載荷

	種子質量(公克)	絨毛長度(公分)	絨毛投影面積(平方公分)	絨毛種子翼載荷
繖絨花	0.00025	0.82	2.11	1.1848*10 ⁻⁴
芒草	0.00031	0.66	1.37	2.2628*10 ⁻⁴
小錦蘭	0.06019	3.21	32.35	1.8606*10 ⁻³

結果：三種實驗的絨毛種子翼載荷：繖絨花 < 芒草 < 小錦蘭。

實驗二、探究真實絨毛種子自由落下軌跡模式

目的: 測量真實絨毛種子的加速度以及是否有飄移之現象

方法:

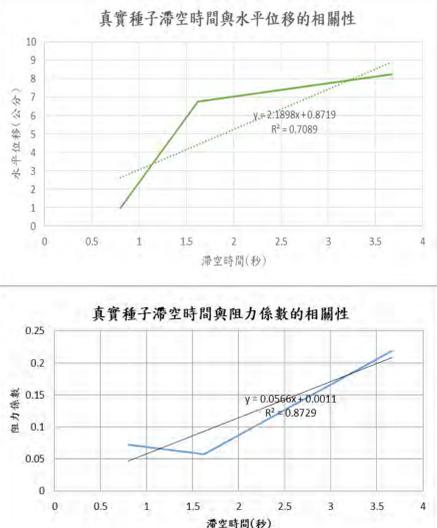
(一) 垂直自由落下實驗儀器製作

(二) 種子自由落下數值的計算方式



結果:

1. 真實種子在自由落下過程中，會向水平左右兩側飄移。
距離為：繖絨花 > 芒草 > 小錦蘭
2. 滯空時間：
繖絨花 > 芒草 > 小錦蘭
3. 落下速率：
小錦蘭 > 芒草 > 繖絨花
4. 向下加速度：
小錦蘭 > 芒草 > 繖絨花
5. 阻力大小：
小錦蘭 > 芒草 > 繖絨花
6. 阻力係數 C_D ：
繖絨花 > 小錦蘭 > 芒草



- (1) 種子滯空時間與水平位移呈正相關
- (2) 阻力係數與水平位移呈正相關
- (3) 阻力係數與種子滯空時間呈正相關
- (4) 從以上實驗結果顯示真實種子在自由落下過程中會有水平飄移現象

實驗三、探究仿生小錦蘭種子在不同風速下對其產生側向力的影響

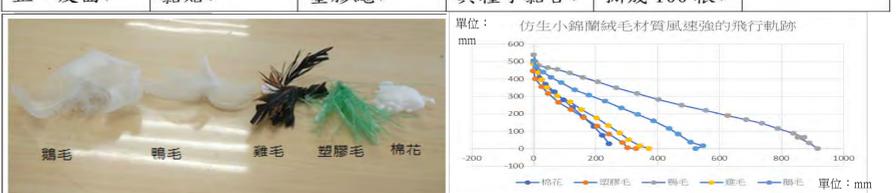
目的: 探討仿生種子在不同變因下的側向力數值(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量、種子絨毛長度、種子絨毛分布)

方法: (一) 仿生種子的製作(以小錦蘭種子為仿生對象)

第一代種子的製作方法



第二代種子的製作方法



	種子材質	絨毛材質	黏貼種子
修改前	使用塑膠片	塑膠繩	泡棉膠
修改後	使用珍珠板	羽絨枕頭中的鴨毛	三秒膠
修改後優點	珍珠板密度比塑膠片小，減輕重量	鴨毛比塑膠繩密度小，且為生物真實材質，更接近絨毛種子的絨毛材質	三秒膠比泡棉膠更容易黏著，且重量更輕

實驗結果：滑空比
 鴨毛 1.71 > 繖絨毛 1.039 > 雞毛 0.765 > 塑膠毛 0.66 > 棉花 0.53

第三代種子製作方法



仿生種子改良過程

第一代種子

缺點:我們利用塑膠片層層堆疊,但是結果不會飄,因為塑膠片疊太多,密度太大

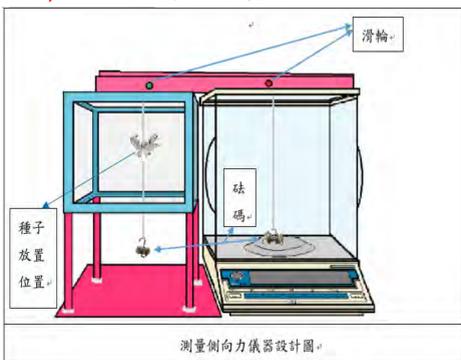
第二代種子

缺點:我們將種子內部改為泡棉膠以取代很多的塑膠片,這樣重量就減少很多,但還是不會飄,因為毛太軟,沒有足夠的支撐力所以還是失敗

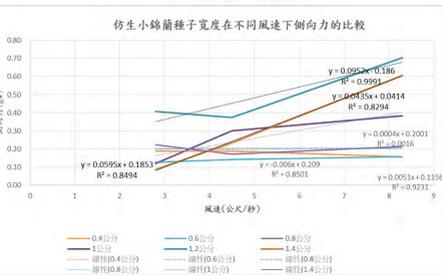
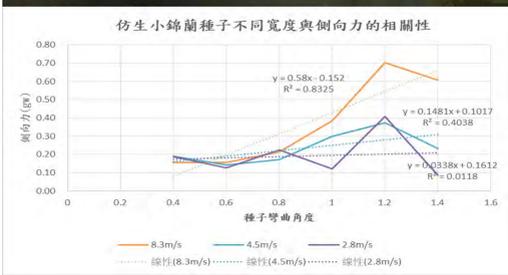
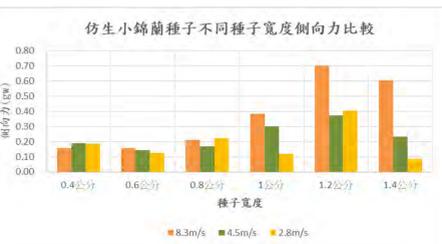
第三代種子

我們將種子材料改為珍珠板,密度又更小,將絨毛部分改為鴨毛,鴨毛比塑膠輕夠堅固,所以有飄的感覺

(二)側向力儀器的製作

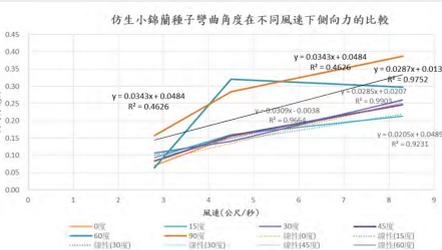
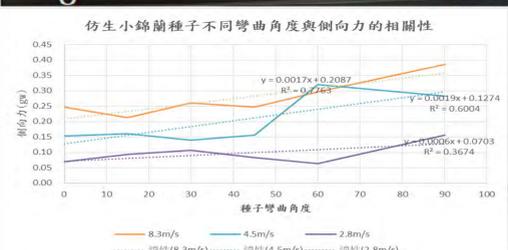
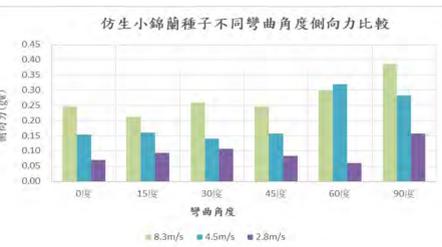


實驗結果 (一) 小錦蘭種子寬度



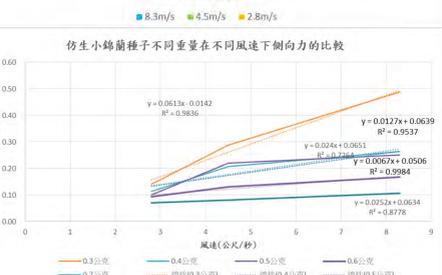
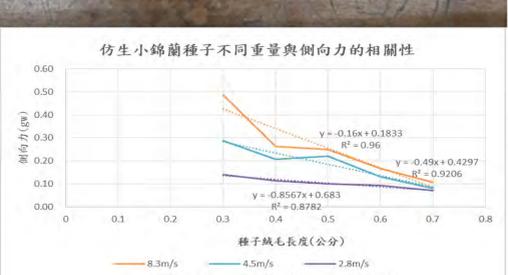
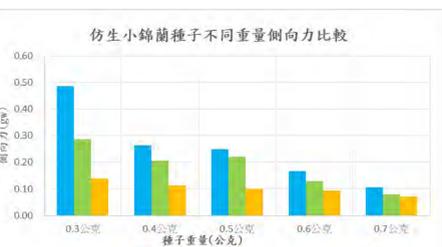
總和結果:風速越大以及種子寬度1.2公分,所產生的側向力越大,在風速8.3 m/s種子寬度為1.2公分其側向力最大為0.7gw。

實驗結果 (二) 小錦蘭種子彎曲角度



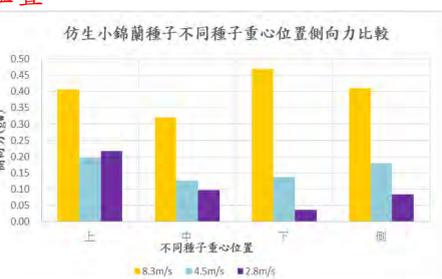
總和結果:風速越大以及種子彎曲角度越大,所產生的側向力越大,在風速8.3 m/s種子彎曲角度為90度,其側向力最大為0.39gw。

實驗結果 (三) 小錦蘭種子不同重量



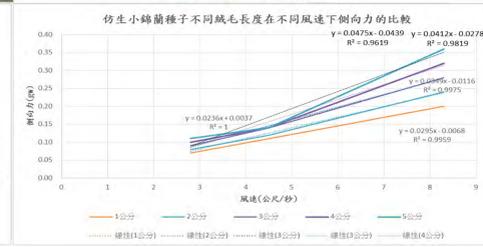
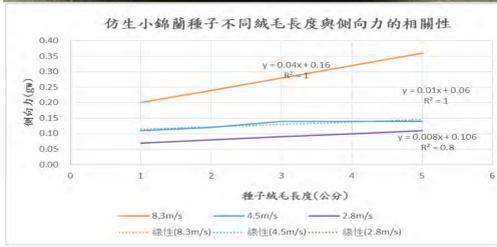
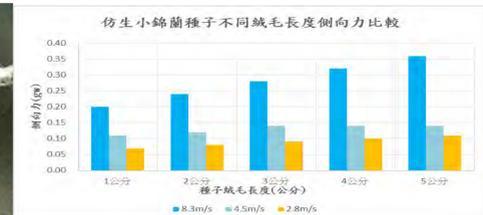
總和結果:風速越大以及種子重量越小,所產生的側向力越大,在風速8.3 m/s種子重量0.3公克,其側向力最大為0.49gw。

實驗結果 (四) 小錦蘭種子不同重心位置



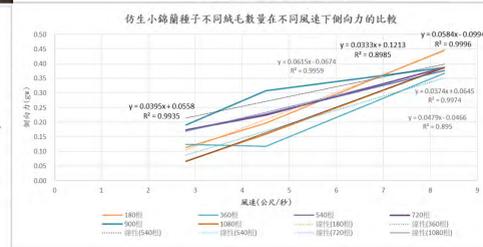
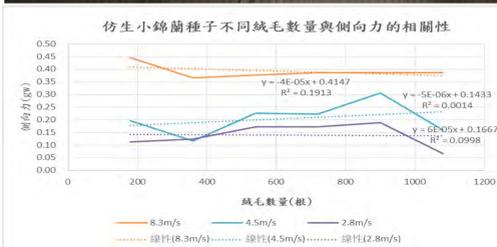
總和結果:風速越大以及重心位置在上及下方所產生的側向力越大,在風速8.3 m/s種子重心位置在下方其側向力最大為0.47gw。

實驗結果 (五) 小錦蘭種子不同絨毛長度



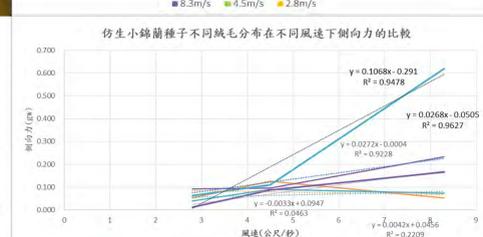
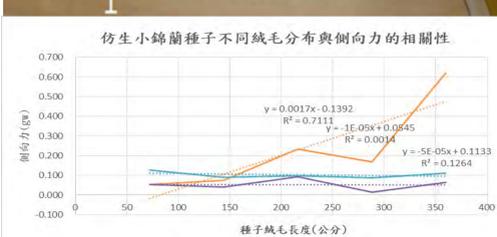
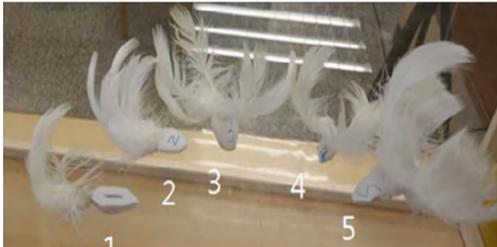
總和結果:風速越大以及種子絨毛長度越長,所產生的側向力越大,在風速8.3 m/s下,種子絨毛長度5公分,其側向力最大為0.36gw。

實驗結果 (六) 小錦蘭種子不同絨毛數量



總和結果:風速越大,所產生的側向力越大;但絨毛數量並沒有與側向力大小呈正相關。在風速8.3 m/s下,種子絨毛數量720及900根,其側向力最大為0.39gw。

實驗結果 (七) 小錦蘭種子不同絨毛分布



總和結果:風速越大以及種子絨毛分布360度,所產生的側向力越大;在風速8.3 m/s下,種子絨毛種子絨毛分布360度,其側向力最大為0.62gw。

實驗四、探究仿生小錦蘭種子的飛行軌跡

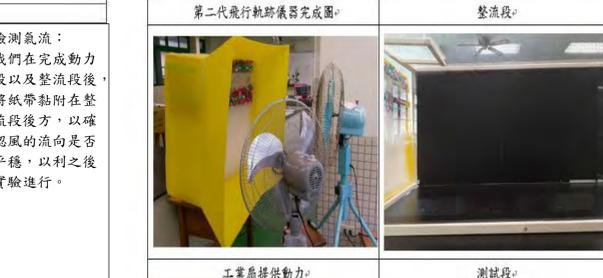
目的:探討仿生種子在不同變因下的飛行軌跡(包含種子寬度、種子彎曲角度、種子重量、種子不同重心位置、種子絨毛數量/長度/分布)

方法:(一)種子飛行軌跡儀器製作

第一代飛行軌跡儀器製作



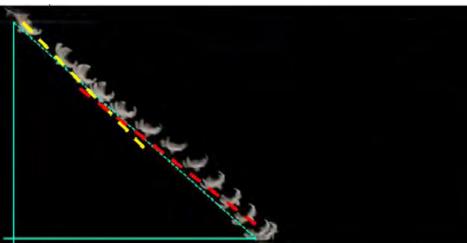
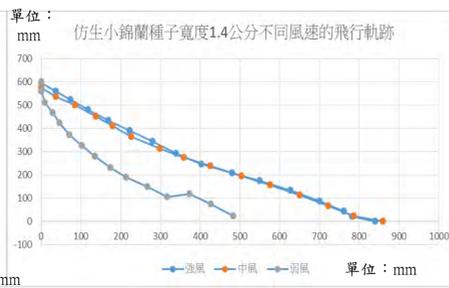
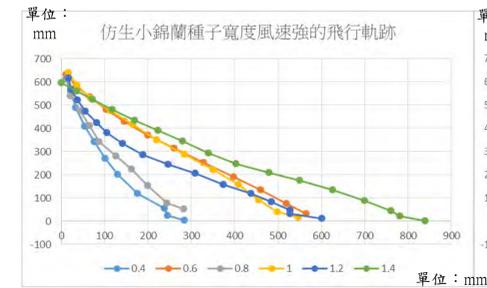
第二代飛行軌跡儀器製作



第一代儀器
缺點:沒有整流段風的流向紊亂,軌跡飄移;測試段的距離過短,種子會飛到外面

第二代儀器
增加了整流段改善了氣流紊亂的問題,並且加長了測試段的長度,讓種子的飛行軌跡可以更清楚的觀察到,此外更加强了我們原本的動力段,可以讓種子飄散的更遠

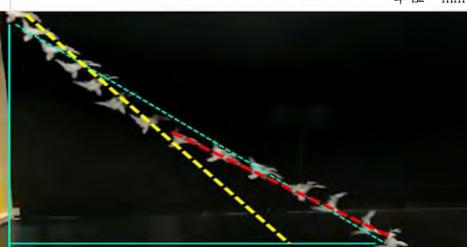
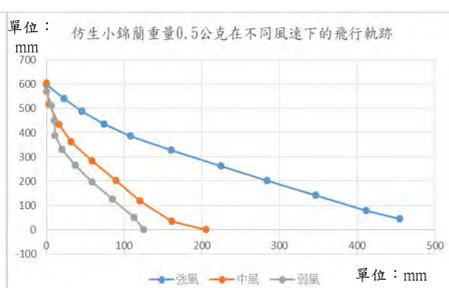
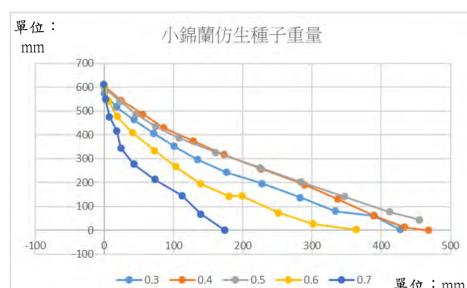
(一) 仿生小錦蘭種子不同寬度的飛行軌跡



種子寬度1.4公分在強風下飛行軌跡

- 種子寬度1.4公分在強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.88x + 588.97$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.5825x + 488.79$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

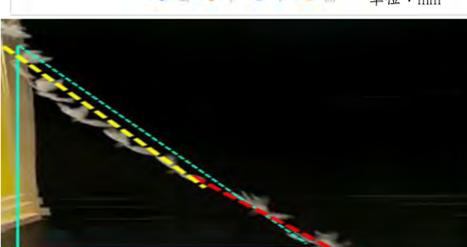
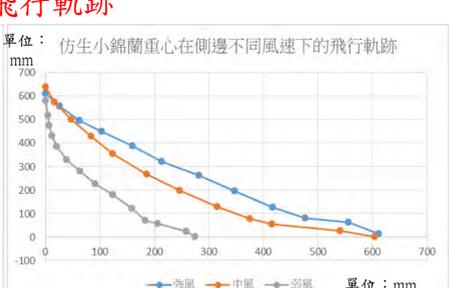
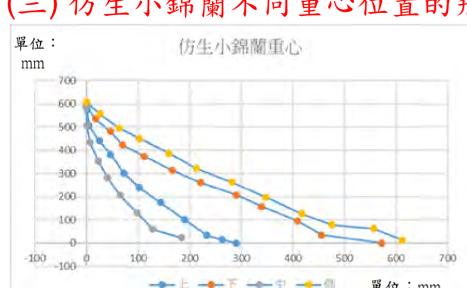
(二) 仿生小錦蘭種子不同重量的飛行軌跡



種子重量0.5公克在強風下飛行軌跡

- 種子重量0.5公克在強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.6665x + 576.14$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.9599x + 475.57$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

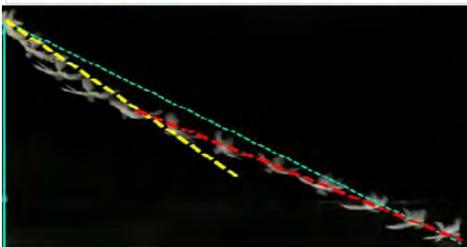
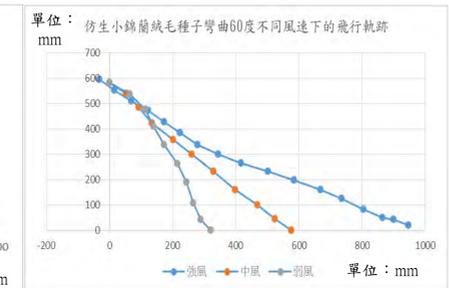
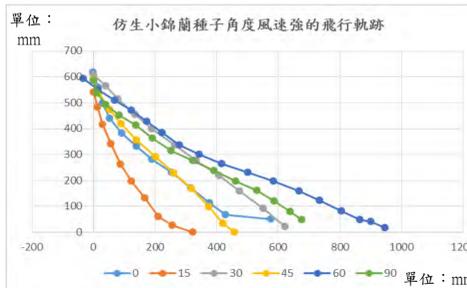
(三) 仿生小錦蘭不同重心位置的飛行軌跡



種子重心在側邊在強風下飛行軌跡

- 種子重心在側邊強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.3061x + 593.11$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.7253x + 448.74$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

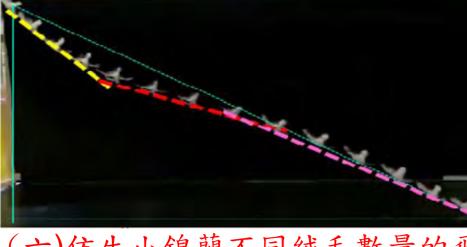
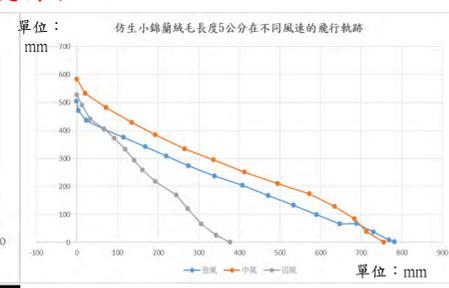
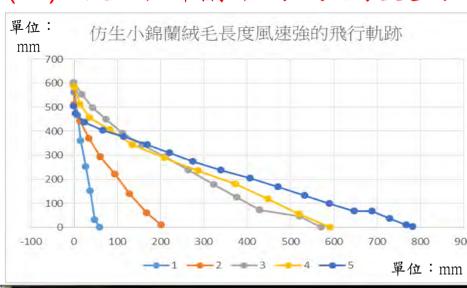
(四) 仿生小錦蘭種子不同彎曲角度的飛行軌跡



種子彎曲角度60度在強風下飛行軌跡

- 種子彎曲60度強風下飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.6834x + 549.4$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.5029x + 490.83$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

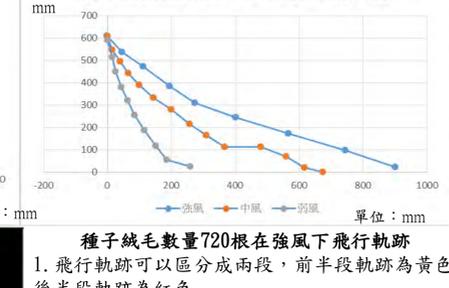
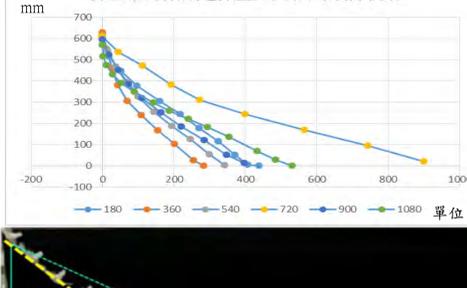
(五) 仿生小錦蘭不同絨毛長度的飛行軌跡



種子絨毛長度5公分在強風下飛行軌跡

- 飛行軌跡可以區分成三段，第一段軌跡為黃色，第二段軌跡為紅色，第三段軌跡為粉紅色
- 第一段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.0132x + 468.58$ ；第二段軌跡為紅色線性關係為 $y = -0.5838x + 439.09$ ；第三段軌跡 $y = -0.504x + 400.02$
- 從三個軌跡的斜率可以發現第一段軌跡斜率 > 第二段斜率 > 第三段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

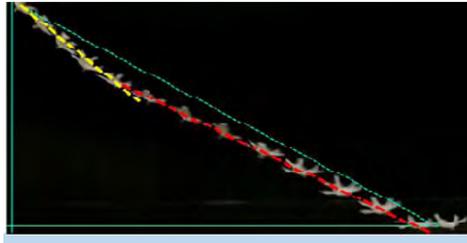
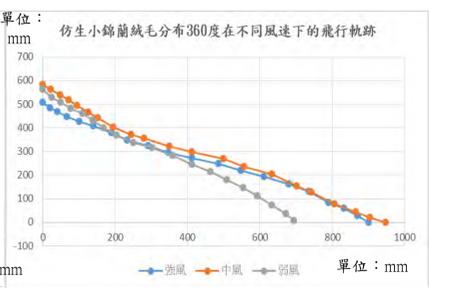
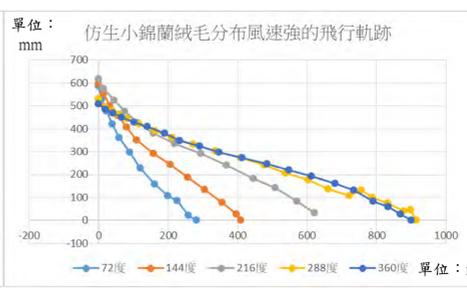
(六) 仿生小錦蘭不同絨毛數量的飛行軌跡



種子絨毛數量720根在強風下飛行軌跡

- 飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -1.0018x + 582.05$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.4543x + 430.47$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

(七) 仿生小錦蘭不同絨毛分布的飛行軌跡



種子絨毛分布360度在強風下飛行軌跡

- 飛行軌跡可以區分成兩段，前半段軌跡為黃色，後半段軌跡為紅色
- 前半段軌跡為黃色其相關線性關係為 $y = -0.6457x + 498.01$ ；後半段軌跡為紅色其線性關係為 $y = -0.4646x + 464.52$ 。
- 從兩個軌跡的斜率可以發現前半段軌跡斜率 > 後半段斜率，顯示後半的種子飛行軌跡平緩

陸、討論

一、種子相關數值對於飛行的影響

(一) 研究所選擇的三種種子其基本型態上有些許不同，小錦蘭及繆絨花的絨毛長在種子的頂端，而芒草的絨毛長在種子底端；種子的體型以小錦蘭最大，芒草和繆絨花兩者的體型較相近。

(二) 觀察真實種子自由落下的軌跡，會往左右偏移。比較三種種子自由落下的幾個數據後發現，滯空時間和水平位移都是繆絨花 > 芒草 > 小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 都是繆絨花 < 芒草 < 小錦蘭。進一步分析數據間的線性關係發現結果如下表三：

變因	線性關係		
滯空時間與種子質量	$y = -0.0169x + 0.0546$	$R^2 = 0.5203$	負相關
水平位移與種子質量	$y = -0.0088x + 0.0673$	$R^2 = 0.9624$	負相關
平均速度與種子質量	$y = 0.0005x - 0.0246$	$R^2 = 0.8205$	正相關
水平位移與平均速度	$y = -14.79x + 162.41$	$R^2 = 0.9424$	負相關

種子較輕較容易飄移，速度及加速度較慢，滯空時間較長，推測絨毛種子越輕越有利飄散，然而越輕穩定性較差，推測在飄移過程無法很穩定的飄散此外，三種種子在落下過程因為有絨毛產生阻力，降落過程的加速度小錦蘭為 469.42 cm/s^2 ，芒草為 134.127 cm/s^2 ，繆絨花為 28.039 cm/s^2 ，遠小於自由落體加速度 980 cm/s^2 ，顯示絨毛種子在空氣中因構造降低了自由落體的加速度，而延長在空中滯留的時間，以達到傳播種子到遠方的能力。

二、仿生種子的側向力

以強風的風速來看，實驗中最佳側向力種子如下表四：

最佳種子	寬度 1.2公分	彎曲度 90度	重量 0.3公克	重心 在下	絨毛長度 5公分	絨毛數量 720及900根	絨毛分布 360度
側向力(gw)	0.7	0.39	0.49	0.47	0.36	0.39	0.62

不論以種子本體或絨毛為操作變因側向力都有顯著差異，寬度1.2公分並非最大或最小，推測種子受風面太大或太小都不利傳播；而重量越輕越容易散播；重心在下方推測穩定性較高，側向力較大；此外絨毛數量以720及900根所產生的側向力最大，並非是實驗中最多的絨毛數量，顯示並非數量多就較佳，而是有最合適的數量；而絨毛均勻分布且較長能造就較穩定及較大的降落傘的投影面積，也因此產生的側向力較大，顯示絨毛種子的絨毛對於側向力的大小有顯著的影響，符合傳播時絨毛為傳播的主力。

三、種子傳播的飛行軌跡

- 種子寬1.4cm飛的距離較遠，因受風面積較大，飛的距離較遠
- 重量實驗中0.5公克重的種子飛得最遠其餘重量越輕越飛得遠，我們推測是因為太輕的沒有重心所以飛行時不穩定，容易偏移所以飛得不遠太重又增加落地速率，因此一下就掉落，也飛得不遠。
- 重心在側邊的種子滑空比最佳，推測是因我們實驗中使用迴紋針，在側邊相當於穩固整個種子，讓種子飛較遠。
- 種子彎曲角度以60°最佳，推測有彎曲度的種子能在受風過程飄移而有較好的滑空比，大自然中無此角度種子，可能不易生長
- 在絨毛長度實驗中5cm的絨毛飛得最遠，因較長的絨毛有較大的翼載荷和投影面積，在空氣中的阻力也較大，所以飄得較遠。
- 絨毛數量以720根毛的滑空比最佳，比900及1080根毛好，推測絨毛越多翼載荷大，利於飛行；絨毛越多重量越大，影響飛行
- 絨毛分布實驗中5/5圓(360度)飛得最遠，滑空比大小依照分布1/5~5/5由小而大。顯示分布均勻飛的也越遠，因為絨毛擠在一起會重疊，重疊的絨毛不會增加對空氣的阻力。所以分布5/5圓的重疊絨毛數量較少所產生的翼載荷也大，飄的最遠。
- 我們試著在種子飛行的軌跡觀察受風影響前後的軌跡狀況，對照前後的線性軌跡，結果顯示仿生種子受風後都變平緩，受風飛行可以增加滯空時間以及飄移距離。若以飛行軌跡斜率差來看：絨毛數量720根的斜率比其他變因顯著的高，而絨毛5公分長度則是飛行軌跡斜率分成三段，顯示絨毛對於種子飛行模式影響顯著。

柒、結論

- 真實種子滯空時間和水平位移都是繆絨花 > 芒草 > 小錦蘭；種子的質量、平均速度、平均加速度以及 C_D 都是繆絨花 < 芒草 < 小錦蘭。三種種子在落下過程因為有絨毛產生阻力，降落過程的加速度遠小於自由落體加速度 980 cm/s^2 。
- 仿生種子最佳的側向力：寬度1.2公分/彎曲度90度/重量0.3g/重心在下/絨毛長度5公分/絨毛數量720及900根/絨毛分布360度。
- 最佳種子滑空比：絨毛分布360度，種子彎曲60度，絨毛數量720根，種子寬度1.4公分，絨毛長度5公分，種子重量0.5公克，重心在側邊。若以仿生種子受風前後，飛行軌跡斜率差來看：絨毛720根的斜率比其他變因顯著的高，而絨毛5公分則是飛行軌跡斜率分成三段，顯示絨毛對種子飛行模式影響顯著。

捌、參考文獻

- 中華民國第57屆中小學科展-斷尾球「生」-探討羽球羽毛對飛行的影響
- Vincent Casseau, Guido De Croon, Dario Izzo (2015) Morphologic and Aerodynamic Considerations Regarding the Plumed Seeds of *Tragopogon pratensis* and Their Implications for Seed Dispersal. published 04 May 2015 PLOS ONE.