中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　物理與天文學科

最佳(鄉土)教材獎

051815

槭動心旋—槭樹翅果飛行模式之研究

學校名稱：臺中市立臺中女子高級中等學校

作者：	指導老師：
高二 朱家慧	邱雅雯
高二 賴彥臻	徐敏益

關鍵詞：槭樹

摘要

槭樹翅果的長、寬、重皆呈常態分布。果實展弦比可分成最常見三群，分別為 2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50。利用 Tracker 軟體追蹤果實掉落軌跡，槭樹翅果飛行有一定的規律性，且各型態翅果飛行皆具有相似性。翅果的落下過程可依速度分為自由落體期、減速期、緩飛期，翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度（0.44m/s±0.94）落下，而達到緩降效果。翅果上的肋痕會造成流速差使壓力不同，產生旋轉力而使翅果開始旋轉。旋轉時，轉動動能增加，移動動能減少，會造成翅果減速，而達到緩飛的效果。翅果除了自轉，也會繞著翅果外的一個軸公轉，公轉半徑約為翅長一倍到兩倍。緩飛期的公轉較明顯。

壹、研究動機

國中時曾研究過槭樹翅果在生物方面的特性及觀察其大略的飛行時的情形，但並未歸納出一個模式。由於當時所學知識並不多，我們懷疑是不是仍有許多問題是當時能力所不能及、尚未發現的，也看到一些針對大葉桃花心木等具翅種子飛行原理、模式等的研究，如不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析（蔡亞婷，2012）。我們好奇槭樹翅果的飛行是否因為結構比例等差異而有不同的模式，並且想要研究其物理的原理及特性。因此希望在高中能夠運用更多知識及精良的器材，更加深入探討槭樹翅果的飛行。

貳、研究目的

一、分析槭樹翅果各結構型態分類

二、探討槭樹翅果在垂直方向的飛行狀況

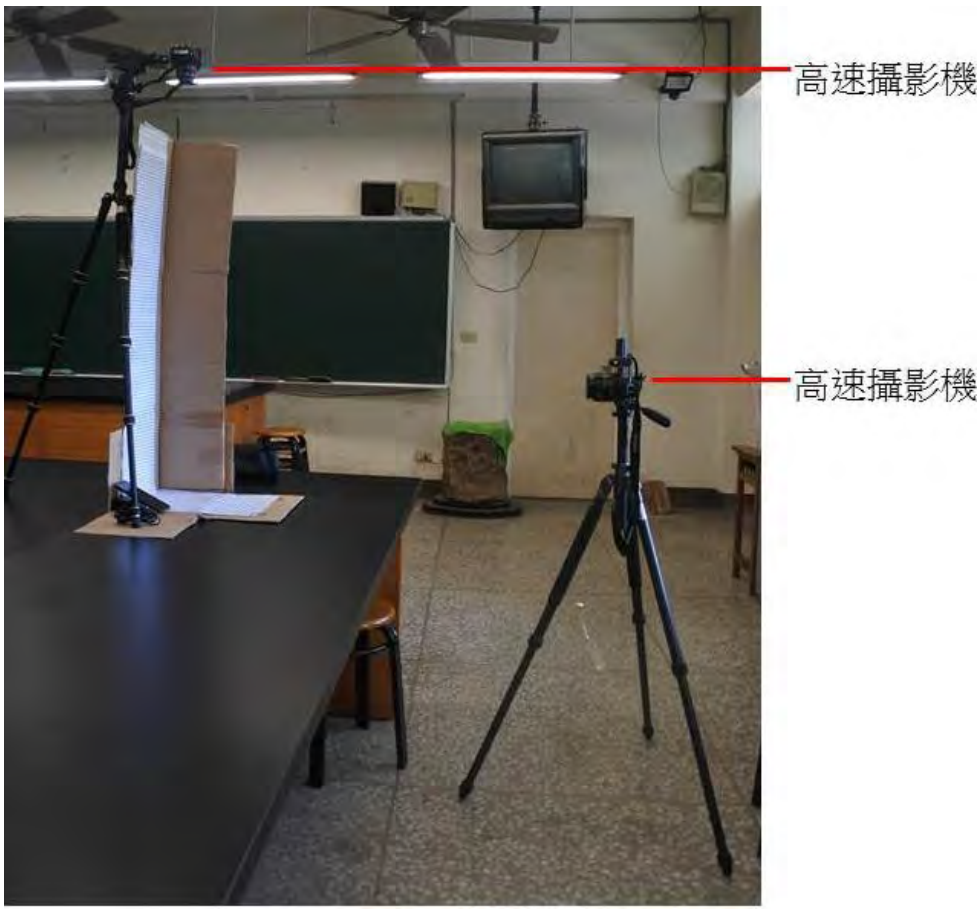
三、探討槭樹翅果在水平方向的飛行狀況

四、探討槭樹翅果飛行時的旋轉特性

參、研究設備及器材

一、研究設備及器材

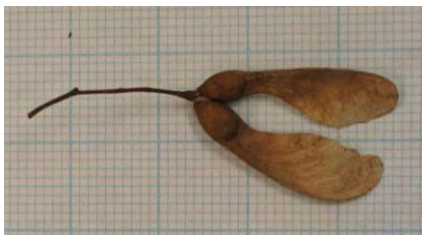
300 個成熟槭樹果實、0 號夾鏈袋、乾燥箱、螺旋測微器、游標尺、電子天平（sartorius BSA224S-CW）、標籤紙、紙箱、方格紙、直尺、高速攝影機（Nikon J1、Nikon J5、Nikon V1、Sony DSC-RX10M2）、膠帶、電腦、軌跡追蹤軟體（Tracker）、角度測量軟體（PicPick）、統計軟體（SPSS 22.0 版）、數學繪圖軟體（GeoGebra）、相片編輯軟體（PotoshopCS6）、手機碼錶、擷取影片畫面工具（Free Video to JPG Converter）。



圖一、實驗器材架設示意圖

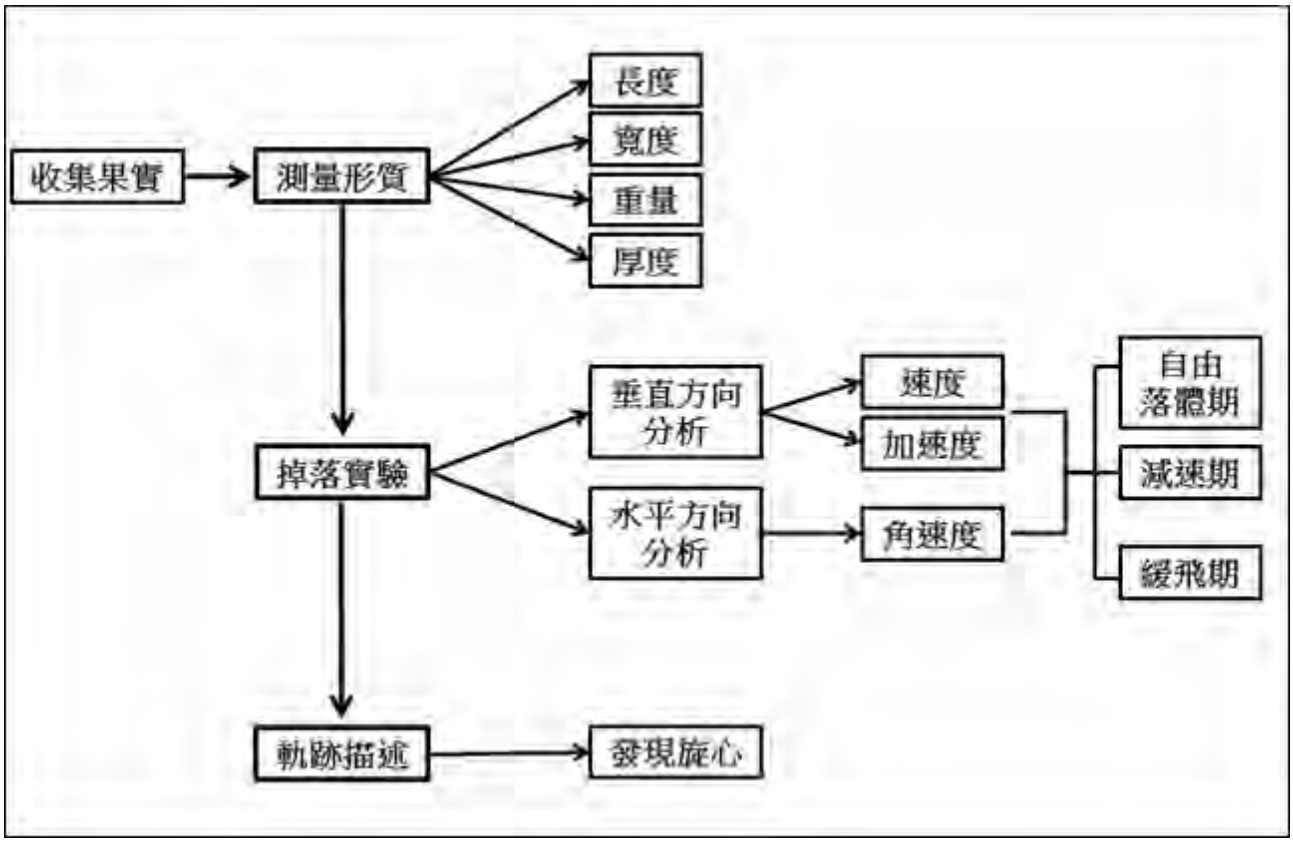
二、槭樹翅果介紹

槭樹為雙子葉植物綱，無患子目，槭樹科。在臺灣同屬於槭樹科槭屬的共有六種，其中青楓是最廣為人知的一種。葉的型態為掌狀，大部分為五個深裂，為單葉對生，無托葉；花為白綠色，有五瓣，約於 3、4 月開花。果實周邊產生了由果皮發育而成，形似翅膀的扁平狀附屬物，且乾果不開裂，槭樹為單翅翅果，在樹上生長型態為種子部分在上，翅膀在下，兩顆果實相對著接在同一樹枝，像是一個「人」字狀；約在 10 月果實成熟後，果實便隨風飛起，藉由風，可將果實滑翔至較遠處。



圖二、一對槭樹翅果

肆、研究過程及方法



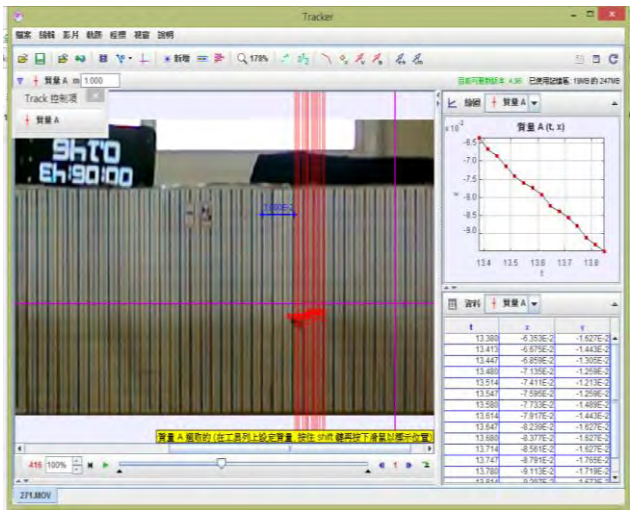
圖三、研究流程圖

一、實驗一 果實結構測量與分析

挑選 300 顆完整無缺損的成熟翅果，用游標尺測量果實的展（長）、弦（寬）；用螺旋測微器測量種子部分、肋（肋前、肋中、肋後）及翅膀的厚度；使用電子天平測量果實總重量、種子與翅膀（含肋）部分分別的重量，整理成圖表。並利用果實展弦比分別從 2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50 分群中各挑選三個果實，共計九顆，完成接下來的實驗。

二、實驗二 飛行軌跡追蹤分析

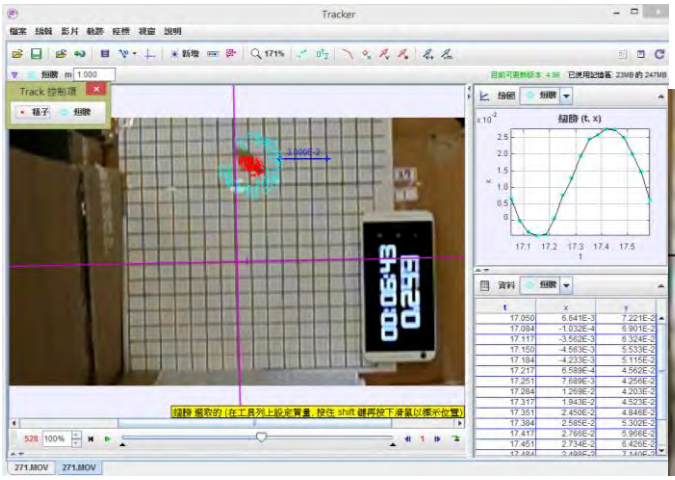
拍攝方法為二人分別於方格紙上方及側面架設高速攝影機，另一人翻轉尺使果實掉落，以高速攝影機(Nikon J1 或 Sony DSC-RX10M2)從側面拍攝翅果自由落下之影片，共取 9 顆果實，每顆共計至少拍攝 8 次，並以軌跡追蹤軟體 Tracker 追蹤其種子部分垂直方向掉落軌跡，計算其速度及加速度，分析翅果自由落下之速度變化及趨勢。



圖四、使用軌跡追蹤軟體 Tracker 追蹤果實垂直方向掉落軌跡

三、實驗三 水平方向的轉動分析

拍攝方法同實驗二，每顆果實自由落地時皆從上方及側面同時拍攝，因此每部影片皆有其相對應方向的影片，事後再進行對時等工作。以高速攝影機(Nikon J5 或 Nikon V1)從上方拍攝翅果自由落下之影片，並以軌跡追蹤軟體 Tracker 追蹤其種子部分水平方向飛行軌跡及翅膀末端部分位置變化。再以 PicPick 測量其轉動之角度，分析其轉動。

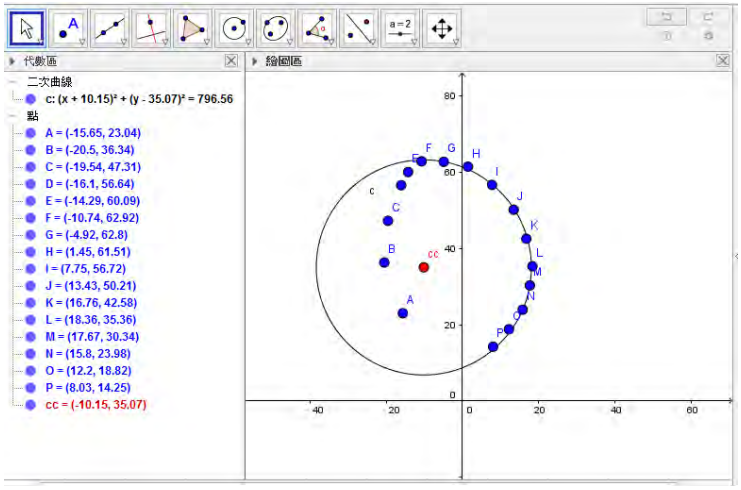


圖五、使用 Tracker 軟體追蹤種子及翅膀位置變化　　圖六、以 PicPick 測量角度

四、實驗四 槭樹翅果飛行時的旋轉特性

使用與實驗二和實驗三相同之高速攝影機(Nikon J5 或 Nikon V1)從上方拍攝翅果自由落下的影片，利用 Free Video to JPG Converter 軟體將影片轉為圖片，再由 PhotoshopCS6 進行疊圖。並以軌跡追蹤軟體 Tracker 追蹤其種子部分水平方向飛行軌跡，經過 Excel 整理數據後，再使用數學繪圖軟體 GeoGebra 繪製成圖並找到旋心大約所在的

位置，然後以 PicPick 測量其轉動之角度，分析翅果公轉。



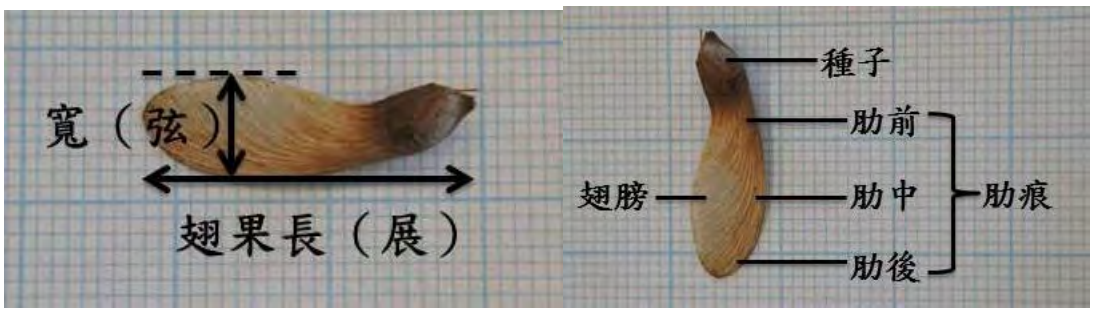
圖七、使用數學繪圖軟體 GeoGebra 求旋心位置

伍、研究結果

一、果實結構分析

（一）各項結構測量

結構：翅果長為種子末端到翅頂端的長度，寬為翅膀最寬的部分；再將果實分為翅及種子部分，翅又分為翅膀及肋痕，肋痕部分從種子到翅膀頂端依序為肋前、肋中、肋後。



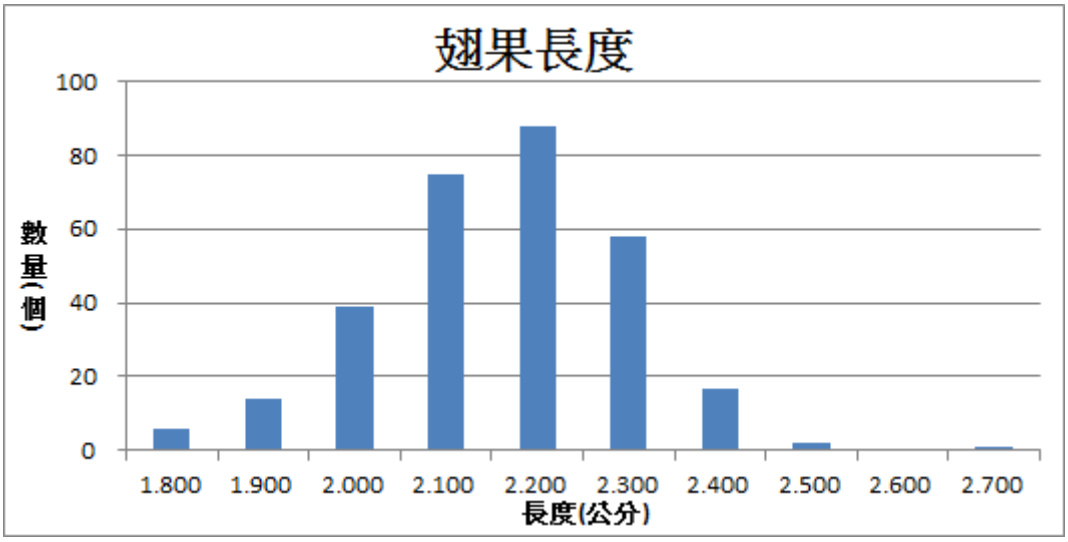
圖八、翅果結構示意圖

表一、 翅果各結構測量結果平均（N=300）

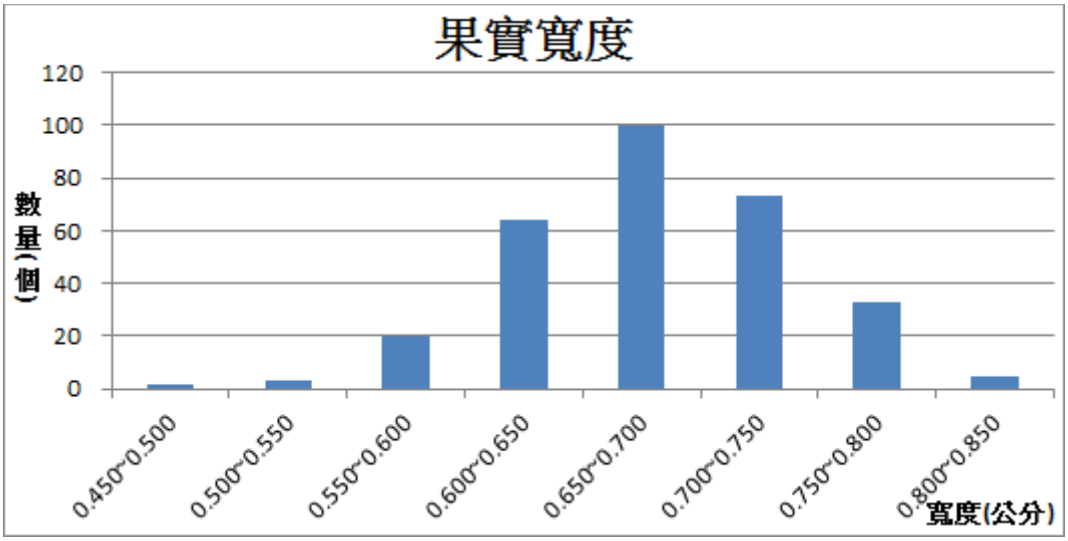
	長(cm)	寬(cm)	肋前厚 (mm)	肋中厚 (mm)	肋後厚 (mm)	種子厚 (mm)	翅膀厚 (mm)	果實總重(g)	種子重(g)	翅膀重(含肋)(g)
平均	2.210	0.681	0.510	0.304	0.179	3.082	0.098	0.0276	0.0225	0.0044

翅果長度分布於 1.865 公分到 2.705 公分之間，其中以 2.240 公分最為常見（圖九），平

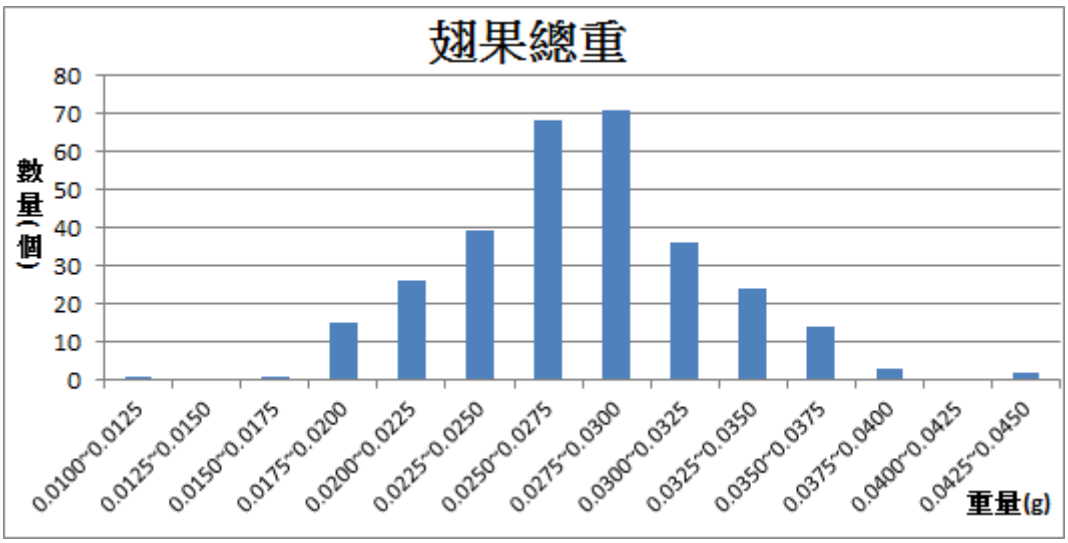
均為 2.210 公分，使用 Shapiro-Wilk 常態性檢定，Kolmogorov-Smirnov=0.040，p>0.05，呈常態分布。翅果寬度分布於 0.500 公分到 0.830 公分之間，其中以 0.670 公分最為常見（圖十），平均為 0.681 公分，使用 Shapiro-Wilk 常態性檢定，Kolmogorov-Smirnov=0.035，p>0.05，呈常態分布。翅果總重量分布於 0.0120 公克到 0.0433 公克之間，其中以 0.0285 最為常見（圖十一），平均為 0.0225 公克重，使用 Shapiro-Wilk 常態性檢定，Kolmogorov-Smirnov=0.047，p>0.05，呈常態分布。果實展弦比（長／寬）平均約為 3.26（圖十二），又以介於 3.00 到 3.25 最為常見，分成種子部分及翅膀部分（含肋），種子重約為翅膀重的 5 倍。翅膀部分有肋，厚度從種子部分往翅膀頂端（肋前到肋後）遞減。



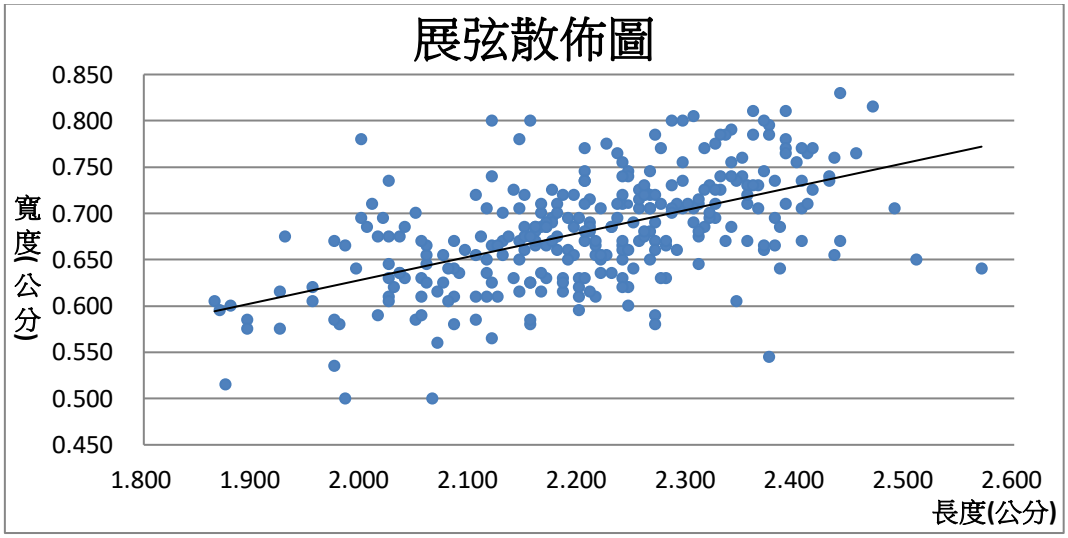
圖九、翅果各長度數量統計圖（N=300）



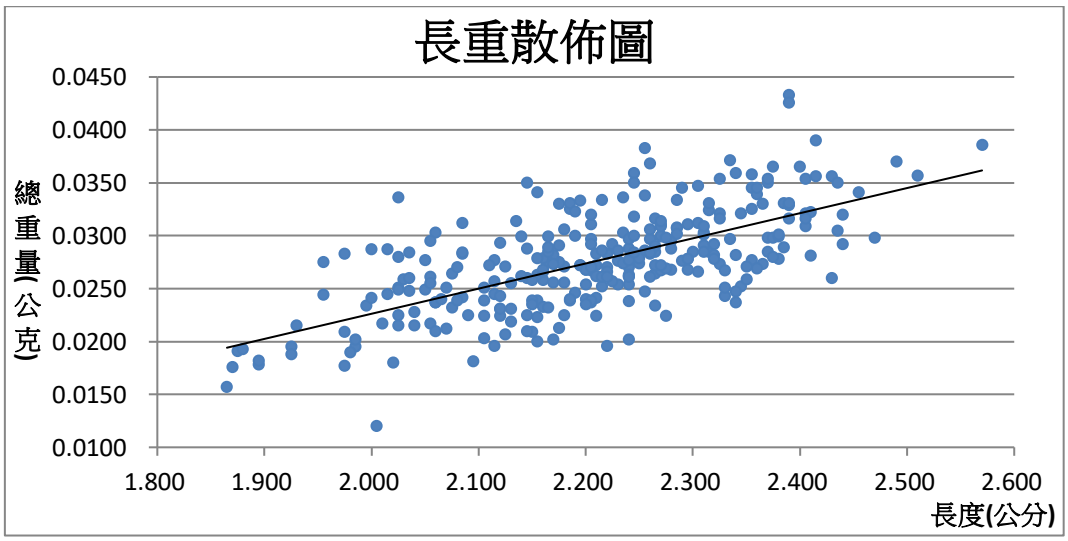
圖十、翅果各寬度數量統計圖（N=300）



圖十一、翅果各總重量數量統計圖（N=300）



圖十二、翅果展弦散佈圖（N=300）



圖十三、翅果長重散佈圖（N=300）

二、翅果自由落下的移動速率及軌跡分析

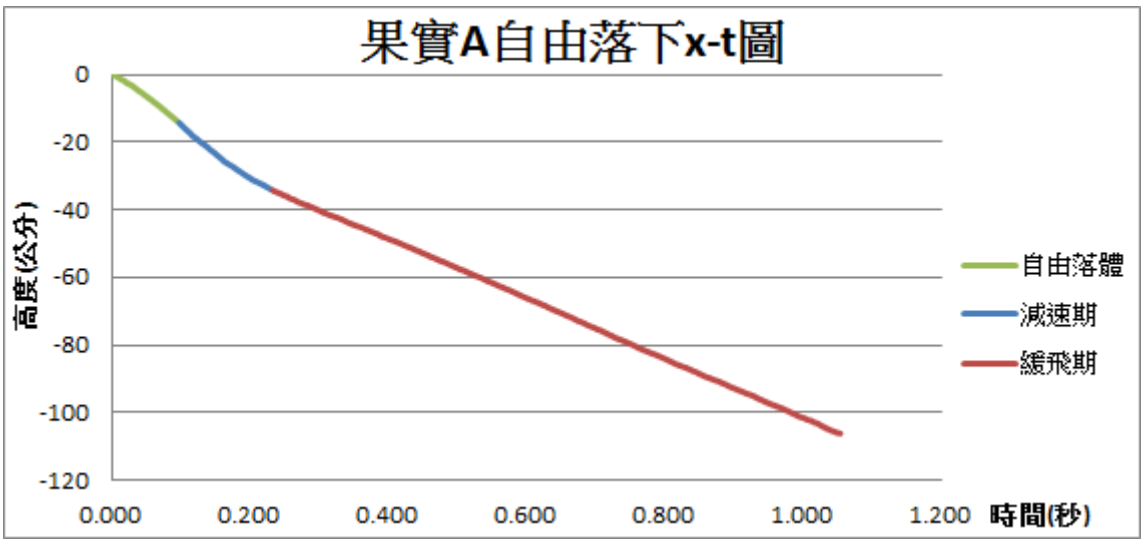
依果實展弦比分別從 2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50 中各挑選三個果實，以高速攝影機（４９６ｆ／ｓ）進行拍攝自由落下的影片，並以 Tracker 追蹤其運動軌跡，向上為正，做成ｘ－ｔ圖及ｖ－ｔ圖。根據圖形將落下時間依速度變化分為三期，分別為自由落體期、減速期、緩飛期（分別用綠色、藍色、紅色表示）又因原始數據雜訊過大不易觀察其趨勢，故取窗口等於 9 的移動平均線（圖中以黑色線表示）。取三群中各一顆果實分別為編號 A、B、C 果實，又因展弦比以 3.00～3.25 最為常見，再任取一顆進行比較（D 果實），詳細資料如表 ，拍攝結果製成圖十四～圖二十一進行說明如下：

表二、 A、B、C、D 果實長、寬、重比較圖

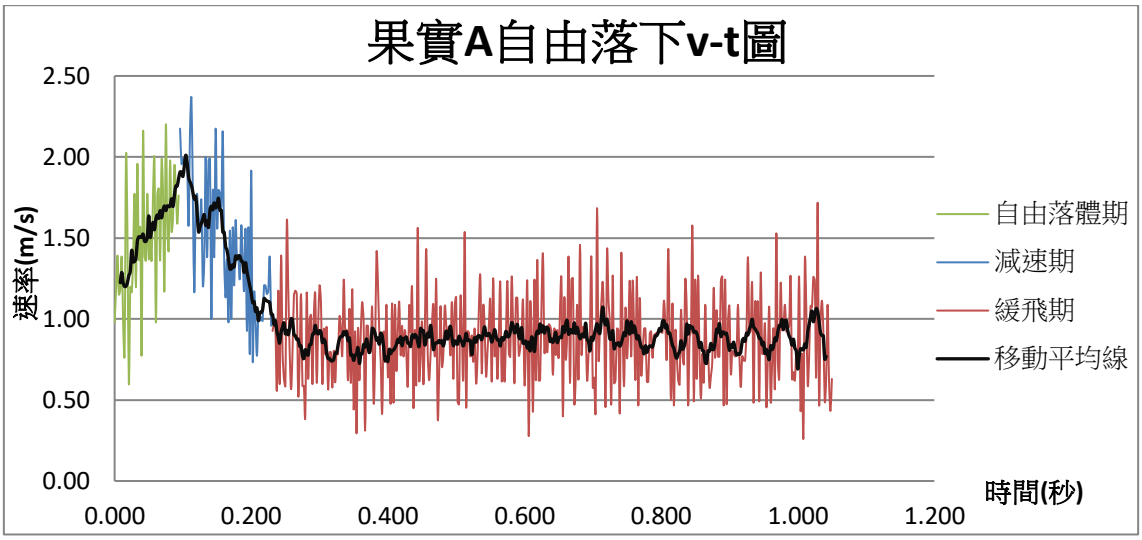
果實編號	A	B	C	D
長(公分)	2.120	2.470	2.305	2.290
寬(公分)	0.740	0.815	0.705	0.710
重(公克)	0.0231	0.0298	0.0347	0.0345
展弦比	2.86	3.03	3.27	3.23

（一）果實 A 的鉛直落下

根據圖十四及圖十五，自由落體期在 0.000 秒至 0.093 秒之間，共移動約 13.915 公分，向上為正，平均速率為 1.48m/s，平均加速度為-8.35m/s²，此時期果實無明顯旋轉，落下速度較快。減速期在 0.093 秒至 0.229 秒之間，共移動約 19.814 公分，平均速率為 1.49m/s，平均加速度 9.13m/s²，此時期果實旋轉較快，落下速度較自由落體期緩和。0.229 秒後為果實的緩飛期，直到落地為止，共移動約 72.133 公分，平均速率為 0.88m/s，平均加速度為 0.40m/s²，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪，緩飛期占果實飛行大部分時間。下墜 106 公分耗時 1.053 秒，共轉動 22.4739 圈。



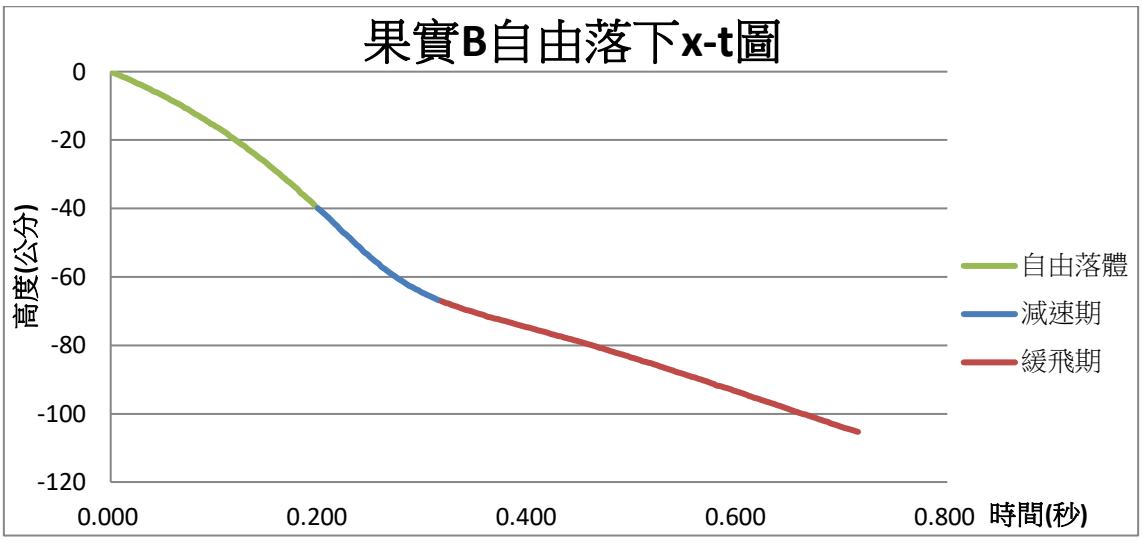
圖十四、果實 A 自由落下 x-t 圖



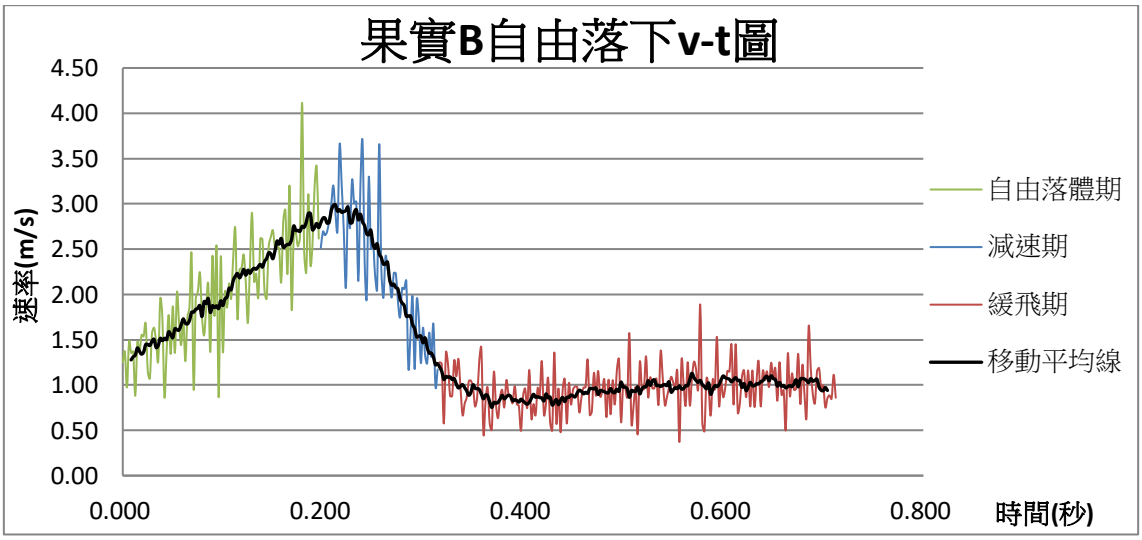
圖十五、果實 A 自由落下 v-t 圖

（二）果實 B 的鉛直落下

根據圖十六及圖十七，自由落體期在 0.000 秒至 0.198 秒之間，共移動約 39.911 公分，向上為正，平均速率為 2.02m/s，平均加速度為-6.40m/s^2，此時期果實無明顯旋轉，落下速度較快。減速期在 0.198 秒至 0.315 秒之間，共移動約 27.006 公分，平均速率為 2.31m/s，平均加速度為 11.517m/s^2，此時期果實旋轉較快，速度較自由落體期緩和。0.315 秒後為果實的緩飛期，直到落地為止，共移動約 38.407 公分，平均速率為 0.96m/s，平均加速度為 0.78m/s^2，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪，緩飛期占果實飛行大部分時間。下墜 105 公分耗時 0.715 秒，共轉動 15.2223 圈。



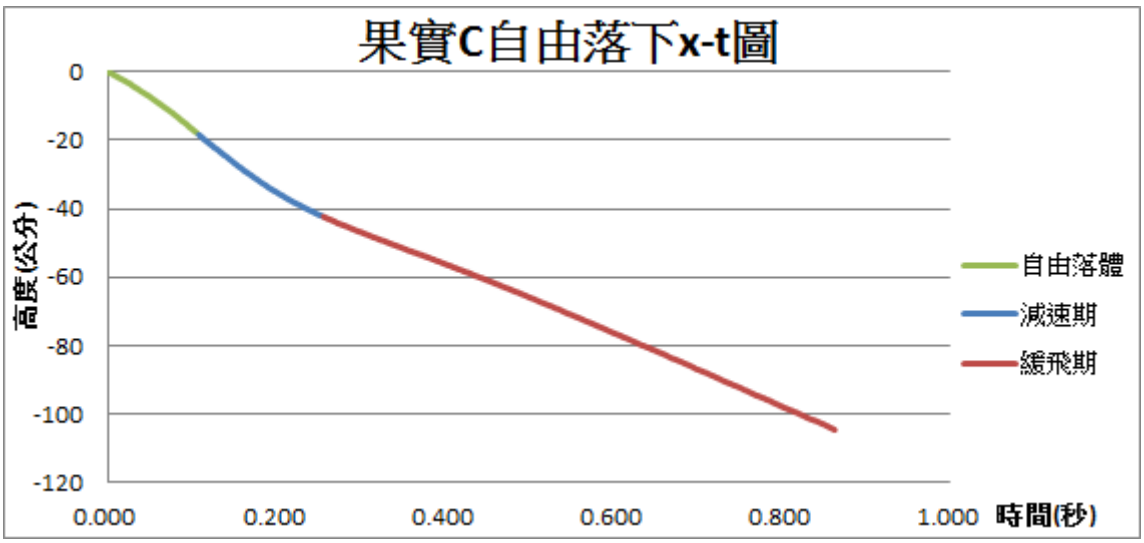
圖十六、果實 B 自由落下 x-t 圖



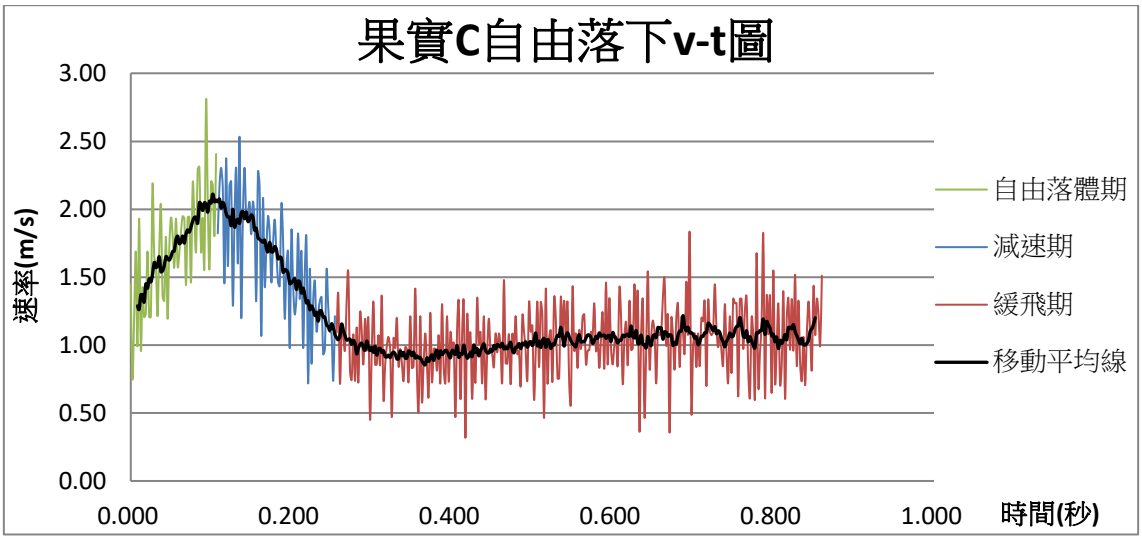
圖十七、果實 B 自由落下 v-t 圖

（三）果實 C 的鉛直落下

根據圖十八及圖十九，自由落體期在 0.000 秒至 0.108 秒之間，共移動約 18.398 公分，向上為正，平均速率為 1.70m/s，平均加速度為-3.46m/s^2，此時期果實無明顯旋轉，落下速度較快。減速期在 0.108 秒至 0.255 秒之間，共移動約 23.645 公分，平均速率為 1.62m/s，平均加速度為 4.18m/s^2，此時期果實旋轉較快，落下速度較自由落體期緩和。0.255 秒後為果實的緩飛期，直至落地，共移動約 62.507 公分，平均速率為 1.03m/s，平均加速度為-0.49m/s^2，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪，緩飛期占果實飛行大部分時間。下墜 106 公分耗時 0.863 秒，共轉動 23.9715 圈。



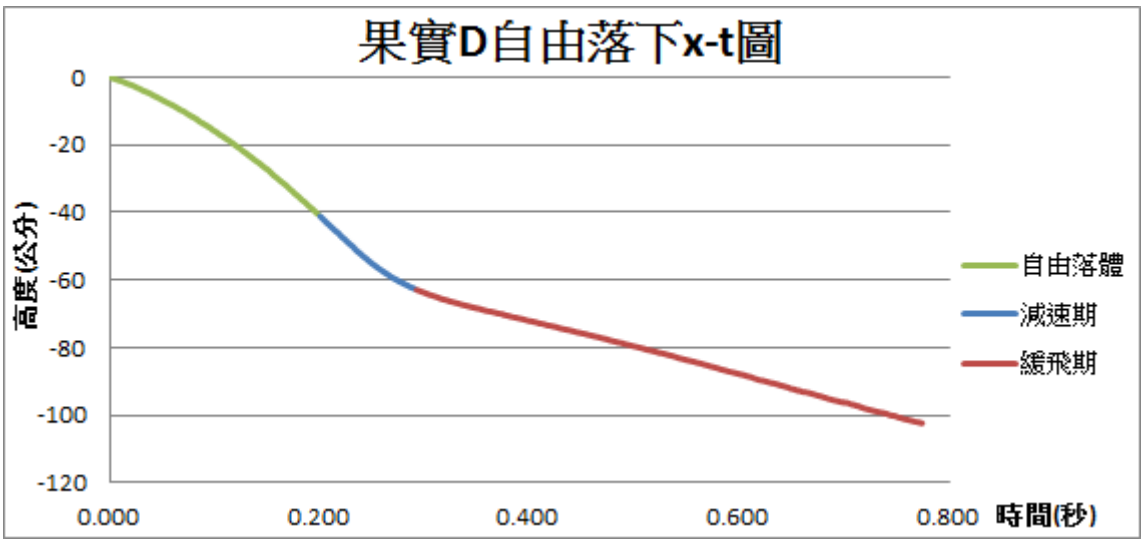
圖十八、果實 C 自由落下 x-t 圖



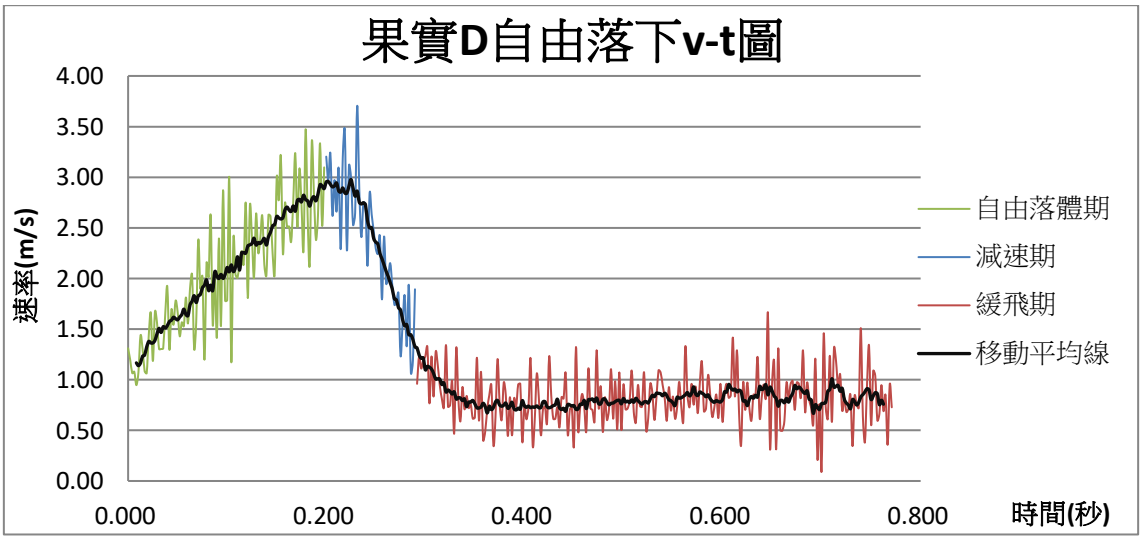
圖十九、果實 C 自由落下 v-t 圖

（四）果實 D 的鉛直落下

根據圖二十及圖二十一，自由落體期在 0.000 秒至 0.200 秒之間，共移動約 41.188 公分，向上為正，平均速率為 2.06m/s，平均加速度為-9.47m/s^2，此時期果實無明顯旋轉，落下速度較快。減速期在 0.200 秒至 0.290 秒之間，共移動約 21.363 公分，平均速率為 2.38m/s，平均加速度為 14.63m/s^2，此時期果實旋轉較快，速度明顯減緩。0.290 秒後為果實的緩飛期，直至落地，共移動約 39.832 公分，平均速率為 0.82m/s，平均加速度為 2.42m/s^2，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪，緩飛期占果實飛行大部分時間。下墜 102 公分耗時 0.773 秒，共轉動 18.1891 圈。



圖二十、果實 D 自由落下 x-t 圖



圖二十一、果實 C 自由落下 v-t 圖

（五）四顆果實鉛直落下總結

根據影片軌跡分析：軌跡分為三個時期，由圖十五、圖十七、圖十九及圖二十一果實自由落下 v-t 圖可將飛行軌跡分為：自由落體、減速期、緩飛期。根據表三自由落體期時間約占整體飛行時間 19%，此時期旋轉較不明顯，降落速度也較快；減速期占 14%，此時期為果實開始旋轉的時期，掉落速度明顯減慢，在 v-t 圖上可清楚分別，掉落過程中旋轉的圈數也增多，因此我們稱它為減速期；緩飛期則占飛行大部分時間約 67%，由圖十五、圖十七、圖十九及圖二十一可發現，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪。由於實驗上的困難，果實落下時最初的位置會被尺擋住攝影機視線，也就是在自由落體期時無法從靜止開始拍攝，因此圖表中初速不為零。經由翅果自由落下的移動速率及軌跡分析實驗，為了進一

步了解每個時期果實的飛行變化，於是進行水平方向的轉動分析實驗，探討角速度與自由落下各時期的關係。

表三、四顆果實落下分期比較圖（向上為正）

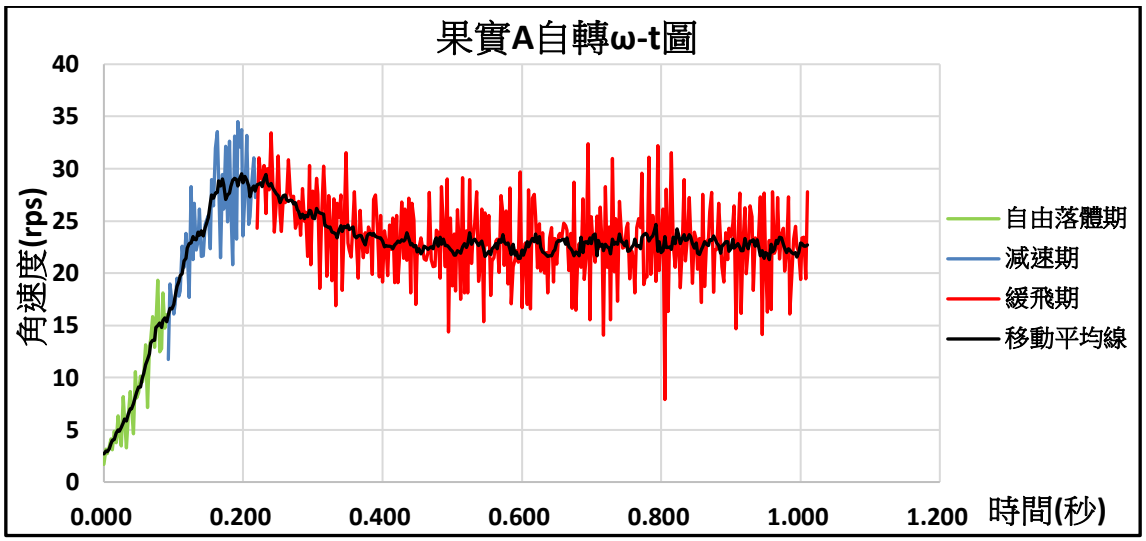
分期	自由落體期	減速期	緩飛期
飛行時間(秒)	0.150±0.057	0.122±0.025	0.579±0.185
平均落下速率(m/s)	約為 1.82m/s	約為 1.95m/s	約為 0.44m/s
平均加速度(m/s^2)	約為-6.92m/s^2	約為 9.86m/s^2	約為 0.78m/s^2
飛行狀況	此時期降落速率快，果實無明顯旋轉。	平均速率與前時期差不多，因加速度改變方向，明顯減速。	果實的運動呈現穩定，前期有稍微減速再加速的現象，後期呈週期性震盪。

三、水平方向的轉動分析

以高速攝影機（４００ｆ／ｓ）從正上方拍攝果實自由落下，拍攝結果以 PicPick 測量角度後算出角速度，做成 ω－ｔ圖，使用同實驗二之 A、B、C、D 果實進行說明，分別為圖二十二～圖二十五，並將垂直落下的分期同步對應至圖上。

（一）果實 A 的旋轉

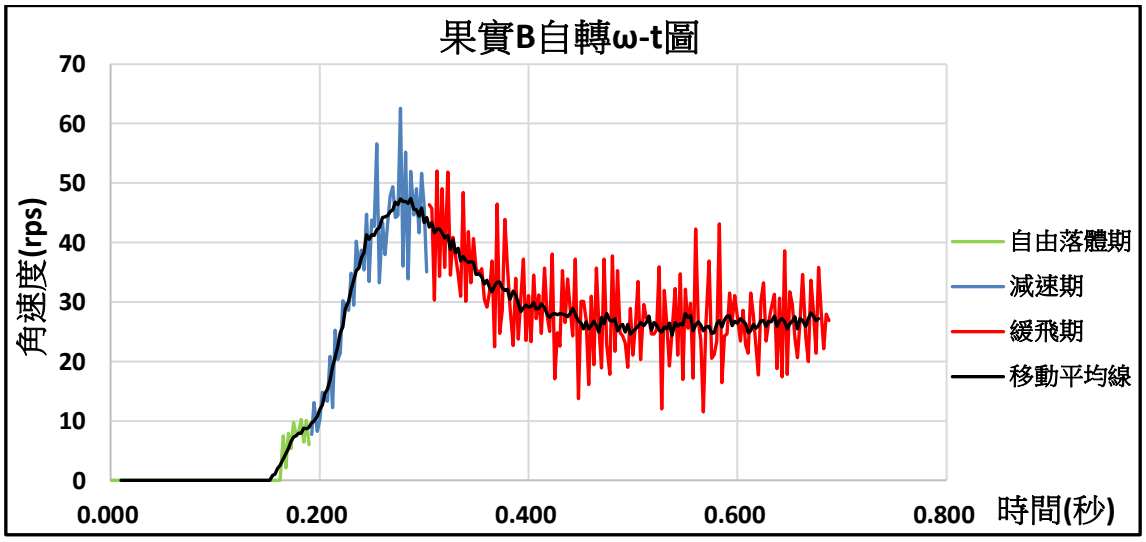
根據圖二十二，自由落體期為 0.000 秒至 0.093 秒之間，共轉過 237.28°。減速期為 0.093 秒至 0.230 秒之間，共轉過 1213.82°，平均角速度 23.94r.p.s。緩飛期為 0.230 秒至 1.053 秒之間，共轉過 6863.82°，平均角速度 24.22r.p.s。



圖二十二、果實 A 自轉 ω－ t 圖

（二）果實 B 的旋轉

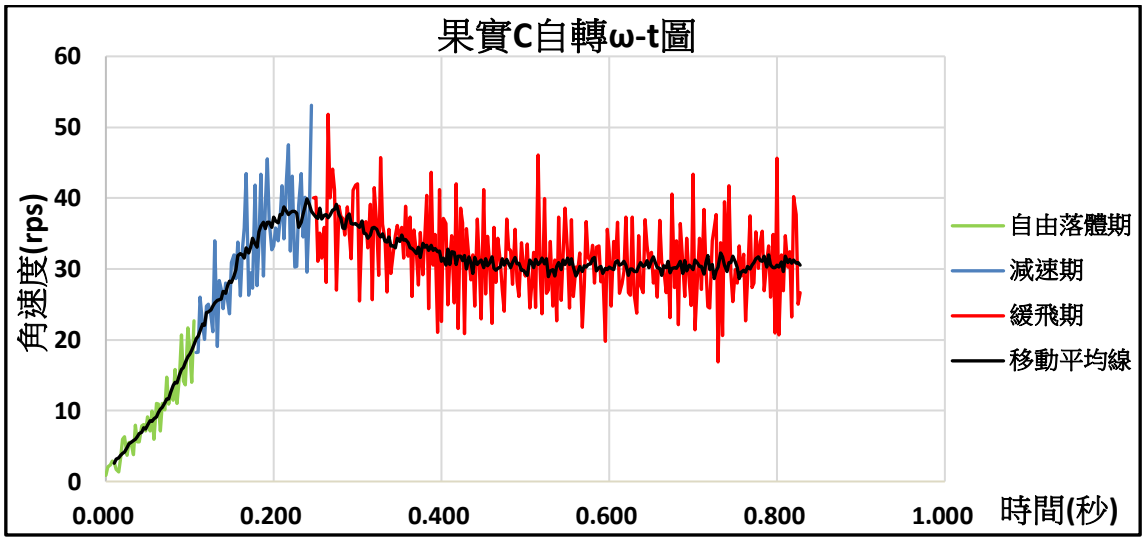
根據圖二十三，自由落體期為 0.000 秒到 0.198 秒之間，共轉過 58.59˚。減速期為 0.198 秒到 0.315 秒之間，共轉過 1457.07˚，平均角速度 33.73r.p.s。緩飛期為 0.315 秒到 0.715 秒之間，共轉過 4101.96˚，平均角速度 28.66r.p.s。



圖二十三、果實 B 自轉 ω－ t 圖

（三）果實 C 的旋轉

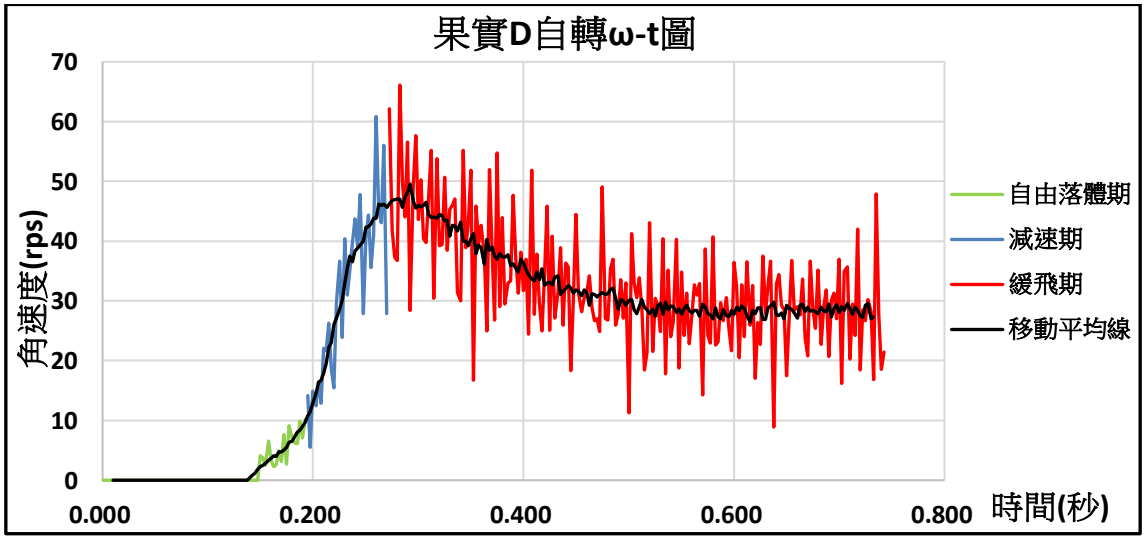
根據圖二十四，自由落體期為 0.000 秒到 0.108 秒之間，共轉過 285.67˚。減速期為 0.108 秒到 0.255 秒之間，共轉過 1694.84˚，平均角速度 30.73r.p.s。緩飛期為 0.255 秒到 0.863 秒之間，共轉過 6907.31˚，平均角速度 31.83r.p.s。



圖二十四、果實 C 自轉 ω－ t 圖

（四）果實 D 的旋轉

根據圖二十五，自由落體期為 0.000 到 0.200 秒之間，共轉過 80.13˚。減速期為 0.200 秒到 0.290 秒之間，共轉過 1101.82˚，平均角速度 31.49r.p.s。緩飛期為 0.290 秒到 0.773 秒之間，共轉過 5573.74˚，平均角速度 32.43r.p.s。



圖二十五、果實 D 自轉 ω－ t 圖

（五）四顆果實旋轉總結

根據表四，自由落體時期由於果實無明顯旋轉，而是以翻轉為主，無法量其角度，因此在 ω－ t 圖上會發現角速度等於零的情況。減速期翅果持續加速旋轉。緩飛期前期角速度會逐漸慢下來，最後幾乎等速旋轉。整合實驗二及實驗三的研究結果，由上方及側方同時拍攝果實掉落情形，可更方便我們比較在不同時間點果實飛行的變化，但是無論是屬於哪一個分群的果實，飛行模式皆有相似性，就生物方面來說，皆是為了達到緩飛的效果，因此從實驗二之結果圖十五、圖十七、圖十九及圖二十一和圖二十二到圖二十五中發現，緩飛期果實皆有落下速度幾乎等速、相較前兩個時期速度減慢及角速度幾乎呈現等速的現象。

表四、翅果落下分期比較

分期	自由落體期	減速期	緩飛期
總圈數	0.46±0.31	3.80±0.73	16.28±3.7
平均角速度(r.p.s)	4.11±3.63	29.97±4.22	29.29±3.76
旋轉情形	果實在此期並無明顯旋轉，而是以翻轉為主，果實與水平面夾角較大。	此期翅果開始有明顯旋轉，果實與水平面夾角漸小，且角速度逐漸增大，最大角速度約出現在此期	此期角速度漸緩，並逐漸穩定，果實與水平面夾角大致固定。

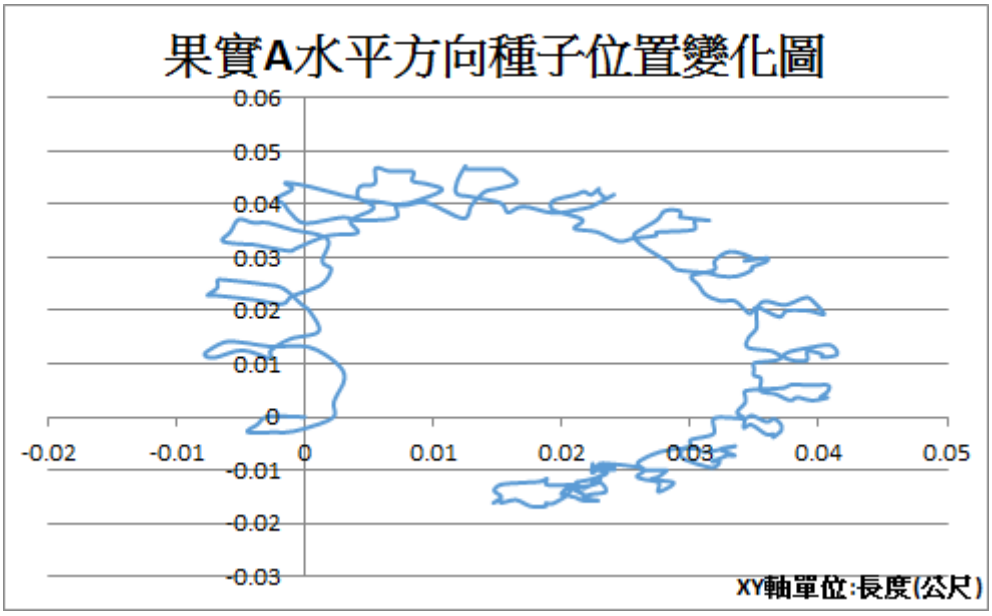
四、探討槭樹翅果飛行時的旋轉特性

藉由以上實驗，由於每個果實的落下實驗皆有上方及側面的高速攝影機同時拍攝，在整理數據的同時發現槭樹翅果在飛行時，會一邊繞著自身重心自轉，一邊繞著一個軸公轉，且公轉方向始終與自轉方向相反，尤其在緩飛期最容易觀察到。以下是俯拍各分群果實進行重複實驗，經過篩選後選取 A、B、C 兩顆果實最為清楚以利觀察的公轉，利用 Free Video to JPG Converter 軟體將高速攝影機拍攝的影片轉為圖片，由 PhotoshopCS6 疊圖製成圖二十六、圖二十九及圖三十二，再由 Tracker 軟體追蹤其種子中心繪製成圖二十七、圖三十及圖三十三，並計算其公轉角速度製成圖二十八、圖三十一及圖三十四。

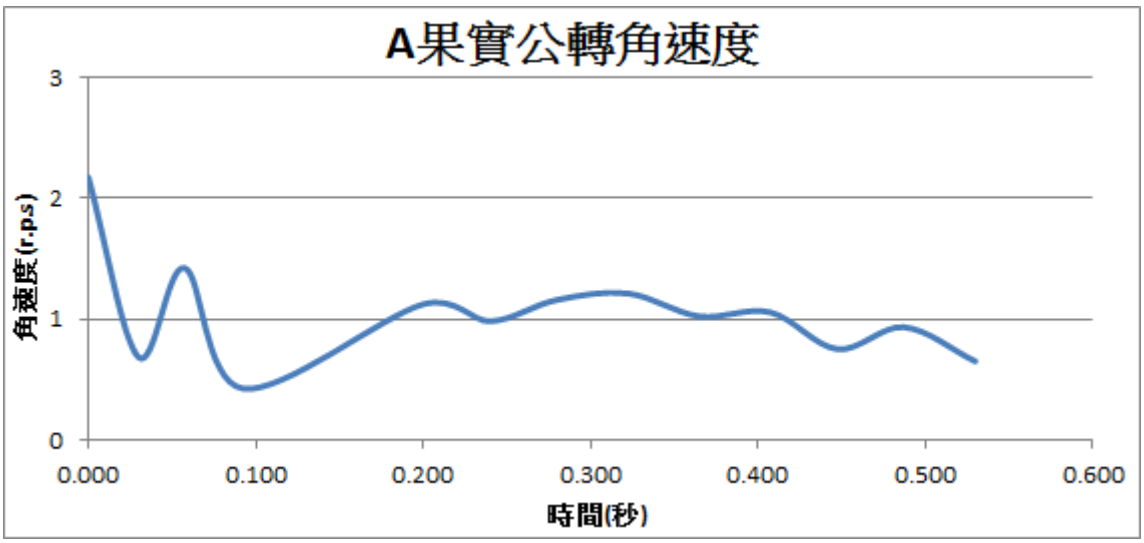
（一）果實 A 的公轉觀察

由圖二十六可以發現槭樹翅果在緩飛期時除了自轉外還有公轉的現象，且公轉的中心不在果實本身。由圖二十七，能看見果實在此時期有大圈（繞旋心公轉）與小圈（繞重心自轉）的差別。接著計算其公轉角速度如圖二十八，由圖可發現角速度有逐漸減緩的趨勢。

圖二十六、果實 A 公轉軌跡疊圖結果



圖二十七、果實 A 水平方向種子位置變化圖

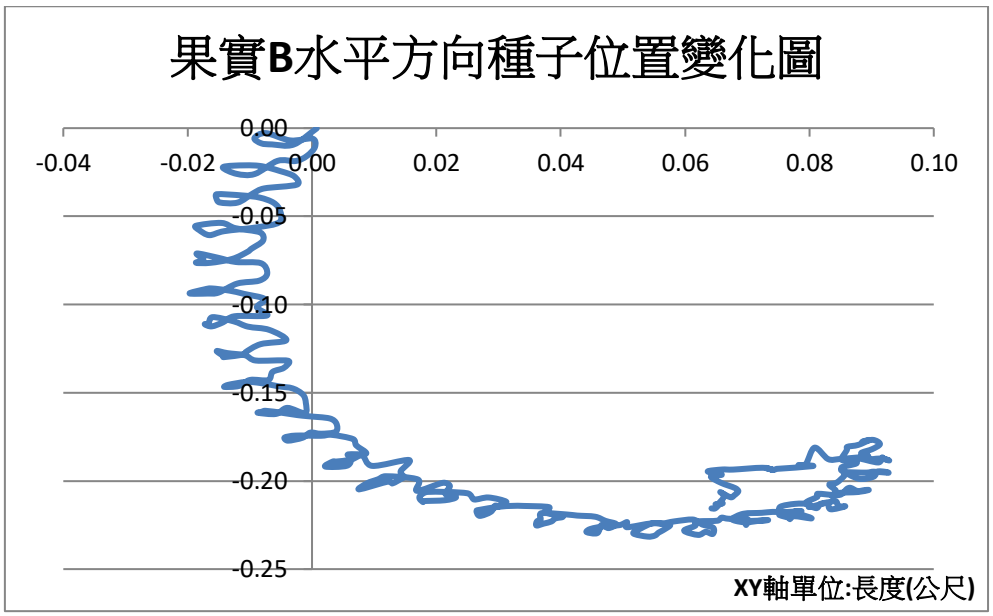


圖二十八、果實 A 公轉角速度隨時間變化圖

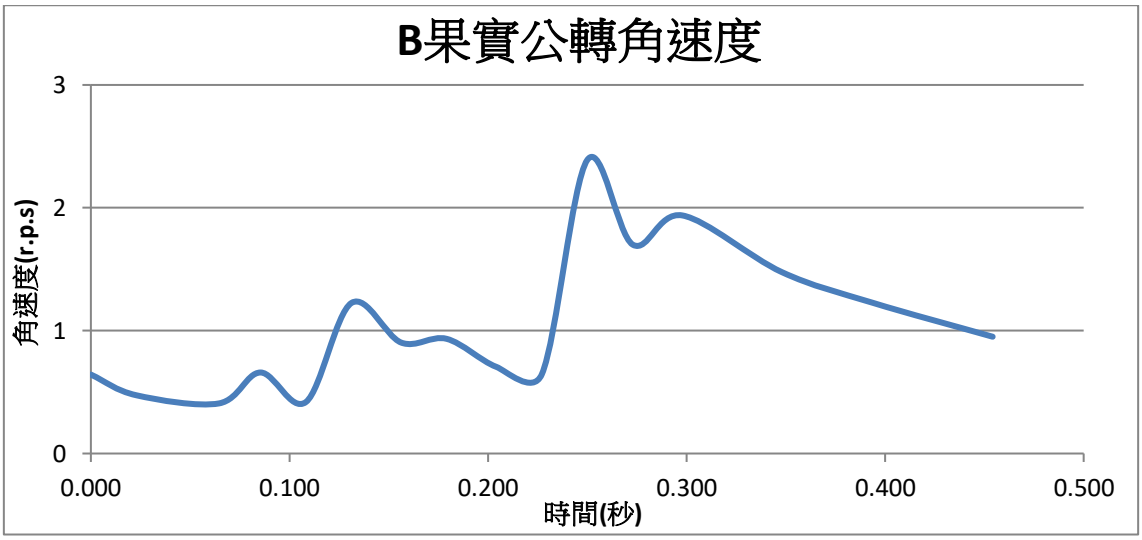
（二）果實 B 的公轉觀察

由圖二十九可以發現翅果在緩飛期時除了自轉外還會有公轉的現象，且公轉的中心不在果實本身，但並不是很清楚。由圖三十，我們可以觀察到翅果在緩飛期時有繞旋心公轉與繞重心自轉的現象。接著計算 B 果實公轉角速度如圖三十一。

圖二十九、果實 B 公轉軌跡疊圖結果



圖三十、果實 B 水平方向種子位置變化圖

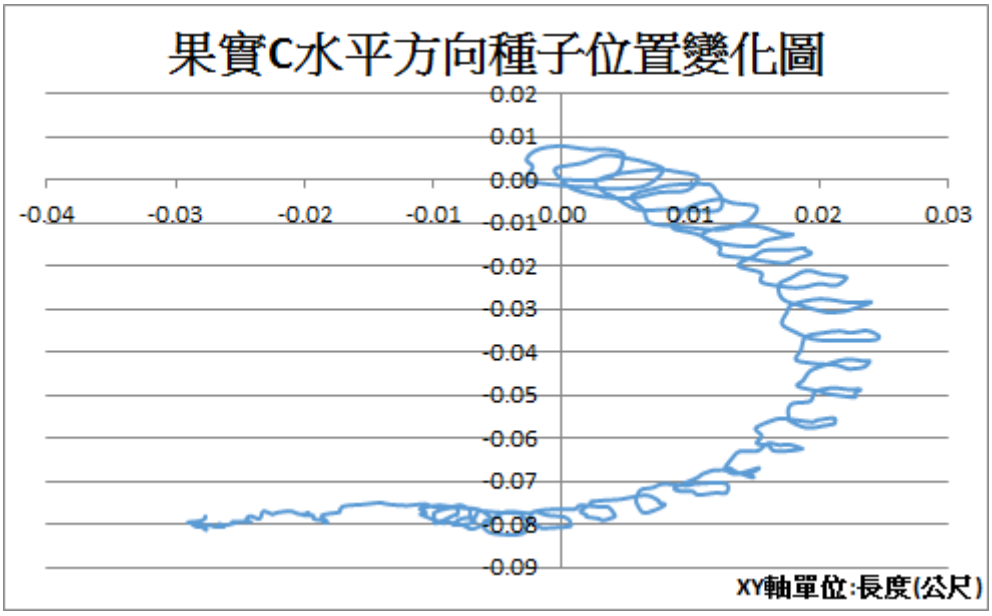


圖三十一、B 果實公轉角速度隨時間變化圖

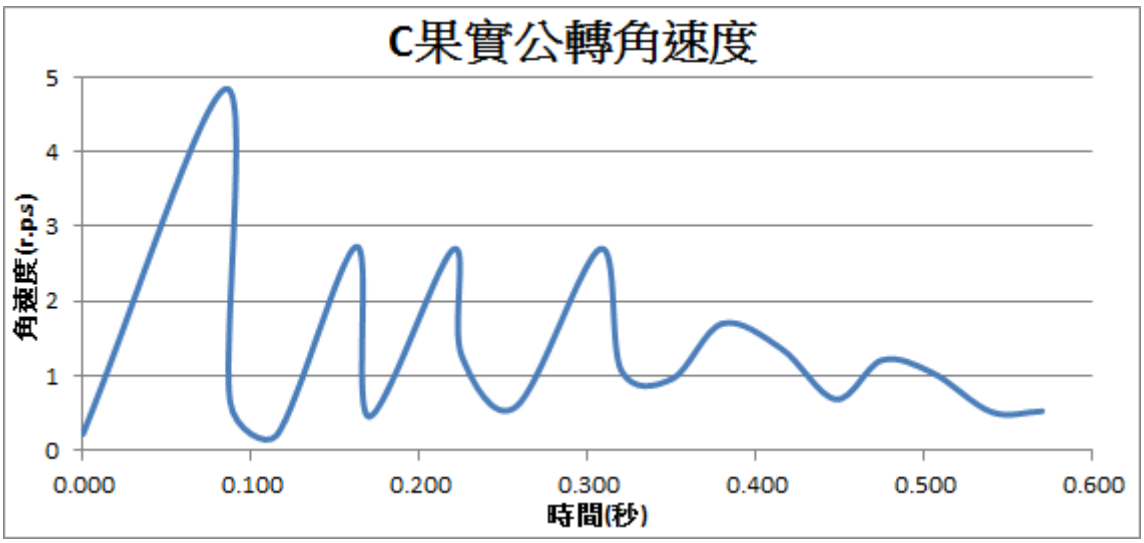
（三）果實 C 的公轉觀察

由圖三十二可以發現槭樹翅果在緩飛期時除了自轉外還會有公轉的現象，且公轉的中心不在果實本身。由圖三十三我們可以觀察到翅果在緩飛期時會有繞旋心公轉與繞重心自轉的現象。接著計算其公轉角速度如圖三十四，可發現角速度有逐漸減緩的趨勢。

圖三十二、果實 C 公轉軌跡疊圖結果



圖三十三、果實 C 水平方向種子位置變化圖



圖三十四、C 果實公轉角速度隨時間變化圖

（四）公轉觀察的綜合整理

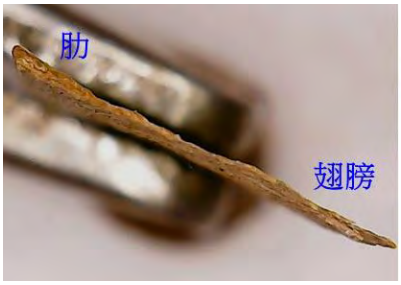
因為在使用 Tracker 時，我們將質點點在種子中心以方便追蹤，因此在圖中才會有大圈（繞旋心公轉）與小圈（繞重心自轉）的差別。由以上結果顯示，緩飛期的公轉較明顯，槭樹翅果除了本身重心的自轉之外，亦繞著一個旋心（旋心會隨著果實掉落而向下移動，軌跡如軸般，因此也能說槭樹果實繞著一個軸公轉）公轉，且與自轉方向相反。

陸、討論

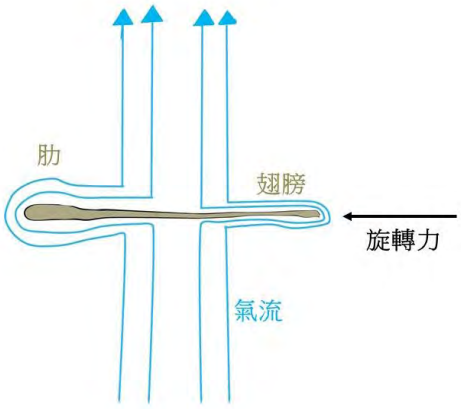
槭樹科植物的果實大多有翅膀，落下時以旋轉方式來飄散到遠處，例如青楓、樟葉槭等。大葉桃花心木也和槭樹翅果相似，為單翅構造。紫薇、九芎的種子是小小的半月形，也是以旋轉方式飄落。火焰木、風鈴木有非常薄的種子，翅膀長在兩邊。其他如黃杞、猿尾藤翅果有三翅，柳安樹翅果有二～五翅，都是靠風力傳播。

種子旋轉的目的是為了延長停留在空中的時間，藉由旋轉延長落地時間，能增加種子藉由風吹拂飄到遠處之機率。槭樹翅果的結構果實周邊所發育出來的翅狀物，有增加其表面積的功能，就像飛機之機翼有助於飛行，機翼面積加大對飛行時增加升力有幫助，這和大葉桃花心木（蔡，2012）的具翅種子有類似的構造。主要重量集中在種子部份，翅膀部分（含肋）只占總重量的$\frac{1}{5}$，翅膀厚度約只有肋的$\frac{1}{3}$倍，這些特徵皆有助於槭樹翅果飛行與散播。且翅果各結構的數據皆成常態分布（$p>0.05$），無論是何種比例所構成的翅果，皆是為了達到緩飛的目。

我們可以將翅膀視為一個個縱切面（圖三十五），當氣流由下往上經過翅膀時，肋痕部分較厚，氣流需流過的距離較長；翅膀部分較薄，氣流需流過的距離較短。肋痕一端的相對氣流速度較快，因此壓力較小；翅膀一端的相對氣流速度較慢，因此壓力較大。兩側的壓力差產生一個往肋方向的旋轉力，對質心造成力矩，使翅果旋轉（如圖三十六）。



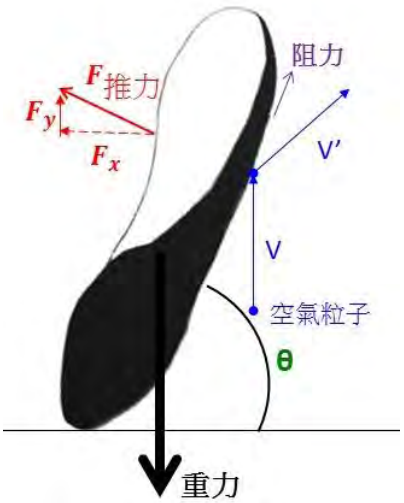
圖三十五、顯微鏡下翅的縱切面



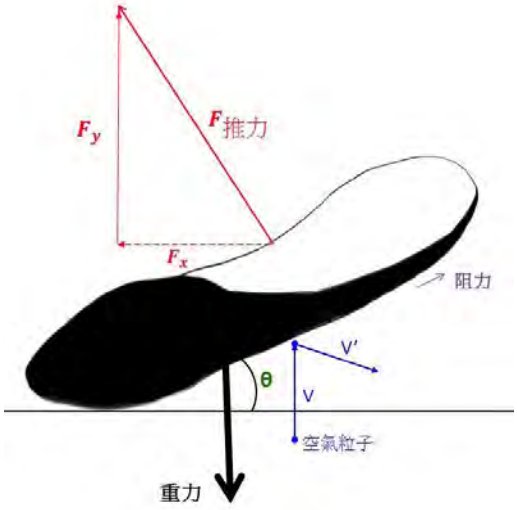
圖三十六、肋造成旋轉力

我們可將空氣分子所造成的作用力分解為翅果與空氣力子碰撞產生的推力$F_{推力}$（垂直於接觸面）和翅果與空氣的摩擦力 f（平行於接觸面）。如圖三十七，自由落體期時，空氣分子碰撞翅果的速度較快，但因翅果與水平面的夾角θ較大，碰撞造成空氣粒子的動量變化較小，因此$F_{推力}$較小，其鉛直分量$F_y = F_{推力} \times \sin\theta$也較小，$F_y$與重力的合力向下，果實加速落下。如圖三十八，在自由落體期及減速期的交界時，落下速度漸大，θ逐漸變小，碰撞造成

空氣粒子的動量變化較大，因此$F_{推力}$漸大，F_y也漸大，與重力的向下合力漸小，甚至產生向上的合力，使翅果減速掉落。而當翅果掉落速度漸減，$F_{推力}$因此漸小，F_y也漸小，向上的合力逐漸變小，最終F_y與重力平衡，使掉落速度達到穩定。（見圖十九）。

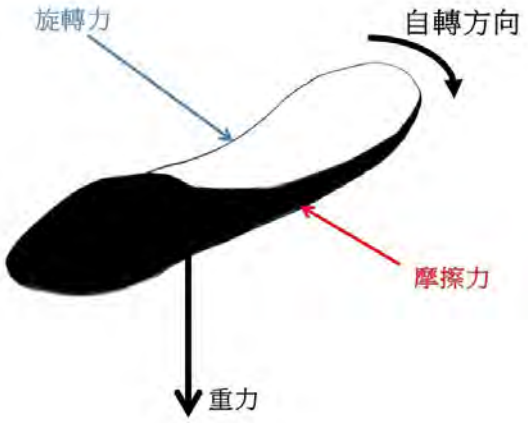


圖三十七、自由落體期空氣對翅果的作用力



圖三十八、減速期之後空氣對翅果的作用力

如圖三十九，翅果開始旋轉時，根據低速時的空氣阻力公式：F=kAv（其中k＝阻力係數，A＝截面積，v＝速度），空氣阻力（摩擦力）和速度成正比，因此當轉速增加，摩擦力也同時增加，合力矩漸小且與原旋轉方向相反，使翅果稍微減速旋轉；減速後摩擦力漸小，最後與壓力差產生的旋轉力達平衡，合力矩接近零，自轉轉速穩定，達到穩定旋轉。（見圖二十二）。



圖三十九、旋轉力及摩擦力對翅果的作用

如果從能量的角度來看，假設能量只牽涉位能跟動能的互換。那麼當果實自由落下後，減少的位能就轉變成動能，其中我們又將動能分成移動動能與轉動動能。加速期時，移動動

能增加的同時，自轉的轉動動能也增加，但位能主要轉變成移動動能，轉動動能增加較少。而減速期時，翅果旋轉逐漸加速，此時較多的能量轉變為轉動動能，因此移動動能變小，而減緩了下落的速度，造成緩降及延長滯空時間的效果。最後在緩飛期時，翅果的鉛直移動速度及自轉角速度幾乎沒有變動，公轉角速度則是漸小，也就是移動動能跟轉動動能幾乎維持不變。若只考慮位能與移動動能及轉動動能間的互換，將無法解釋以上情形，所以一定有牽涉到別的能量的變化。我們推測是因為與空氣摩擦產生熱能而散失。

我們也觀察到翅果會有公轉的現象，翅果會繞著果實外的一個軸一邊公轉，一邊自轉掉落，且公轉方向永遠和自轉方向相反。從實驗二和實驗四的研究結果雖然可以發現緩飛期除了大致上呈等速外，整體上來說是有稍微加速的（如圖十五、圖十七、圖十九及圖二十一），而在緩飛期公轉角速度則沒有一定的趨勢（如圖三十四），如果要探討彼此之間是否互相影響或是要找出造成公轉的向心力，則必須更精確地分析各作用力之間的大小及合力方向，是我們將來能夠繼續深入研究的方向。

槭樹翅果因自身的構造及氣流作用，從高處落下時會旋轉並減速，有很好的緩降效果；其翅膀輕且薄，占整顆果實的重量比例小，且其容錯率高，即使翅膀破裂也能繼續旋轉。如果能利用翅果旋轉減速的原理，模擬其構造做出在落下時有類似行為的載具，跟降落傘等載具相比可能僅需要較少的材料，或許可以成為另一種空投物資或緊急逃生的新方法，也是未來可以研究的方向。

柒、結論

一、槭樹翅果的長、寬、重皆呈常態分布。果實展弦比可分成最常見三群，分別為 2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50。

二、槭樹翅果飛行有一定的規律性，且各型態翅果飛行皆具有相似性。翅果的落下過程可依速度分為自由落體期、減速期、緩飛期，因空氣作用力使翅果與水平面的夾角漸小，翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度（0.44±0.94m/s）落下，達到緩降效果。

三、翅果上的肋痕會造成流速差使壓力不同，產生旋轉力而使翅果開始旋轉。旋轉時移動動能減少時，轉動動能增加，造成翅果減速，達到緩飛的效果。

四、翅果除了自轉，也會繞著翅果外的一個軸公轉，且公轉半徑約為翅長一倍到兩倍。緩飛期的公轉較明顯。

捌、參考資料及其他

一、朱家慧、曾麟雅。2013。天空的舞者—探討槭樹種子的飛行模式　第 53 屆中小學科學展覽會作品說明書。

二、蔡亞婷。2012。不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析 2012 年台灣國際科學展覽會優勝作品專輯。

三、陳昱雯、林于真、董懿萱。2010。看你飛多久－火焰木種子滯空的奧秘 第 50 屆中小學科學展覽會作品說明書。

四、劉又瑄、蔡亞婷、駱宥辰。2011。 飄飄何所似—以單翅種子飛行原理進行飛播造林的研究 第 51 屆中小學科學展覽會作品說明書。

五、朱達勇、谷天心、徐植蔚、鄭宜男（譯）。2007。普通物理學（上冊）（原作者：Harris Benson）。新北市：學銘圖書。

【評語】051815

作品為延伸性研究，但是能夠增加不同的討論面向，並增加實驗研究方法，提升實驗精確度。並且能針對生活中常見的翅果進行飛行模式研究，提供對翅果的飛行空氣動力學瞭解的機會。不同實際翅果的分析比較會有很多實際翅果的狀況變因，可以利用標準模型進行後續研究。最後緩飛期的能量轉換可以考慮被排開的空氣動力能量，而不是只有考慮轉換成翅果的熱能。

作品海報

摘要

槭樹翅果的長、寬、重皆呈常態分布。果實展弦比可分成最常見三群，分別為2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50。利用Tracker軟體追蹤果實掉落軌跡，槭樹翅果飛行有一定的規律性，且各型態翅果飛行皆具有相似性。翅果的落下過程可依速度分為自由落體期、減速期、緩飛期，翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度（0.44m/s±0.94）落下，而達到緩降效果。翅果上的肋痕會造成流速差使壓力不同，產生旋轉力而使翅果開始旋轉。旋轉時，轉動動能增加，移動動能減少，會造成翅果減速，而達到緩飛的效果。翅果除了自轉，也會繞著翅果外的一個軸公轉，公轉半徑約為翅長一倍到兩倍。緩飛期的公轉較明顯。

壹、研究動機

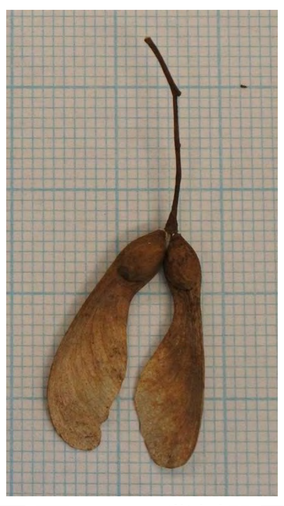
國中曾研究槭樹翅果在生物方面的特性，也看到一些針對單翅翅果飛行模式的研究，如不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析（蔡亞婷，2012）。希望在高中能更深入探討槭樹翅果的飛行原理及特性。

貳、研究目的

一、分析槭樹翅果各結構型態分類
二、探討槭樹翅果在垂直方向的飛行狀況
三、探討槭樹翅果在水平方向的飛行狀況
四、探討槭樹翅果飛行時的旋轉特性

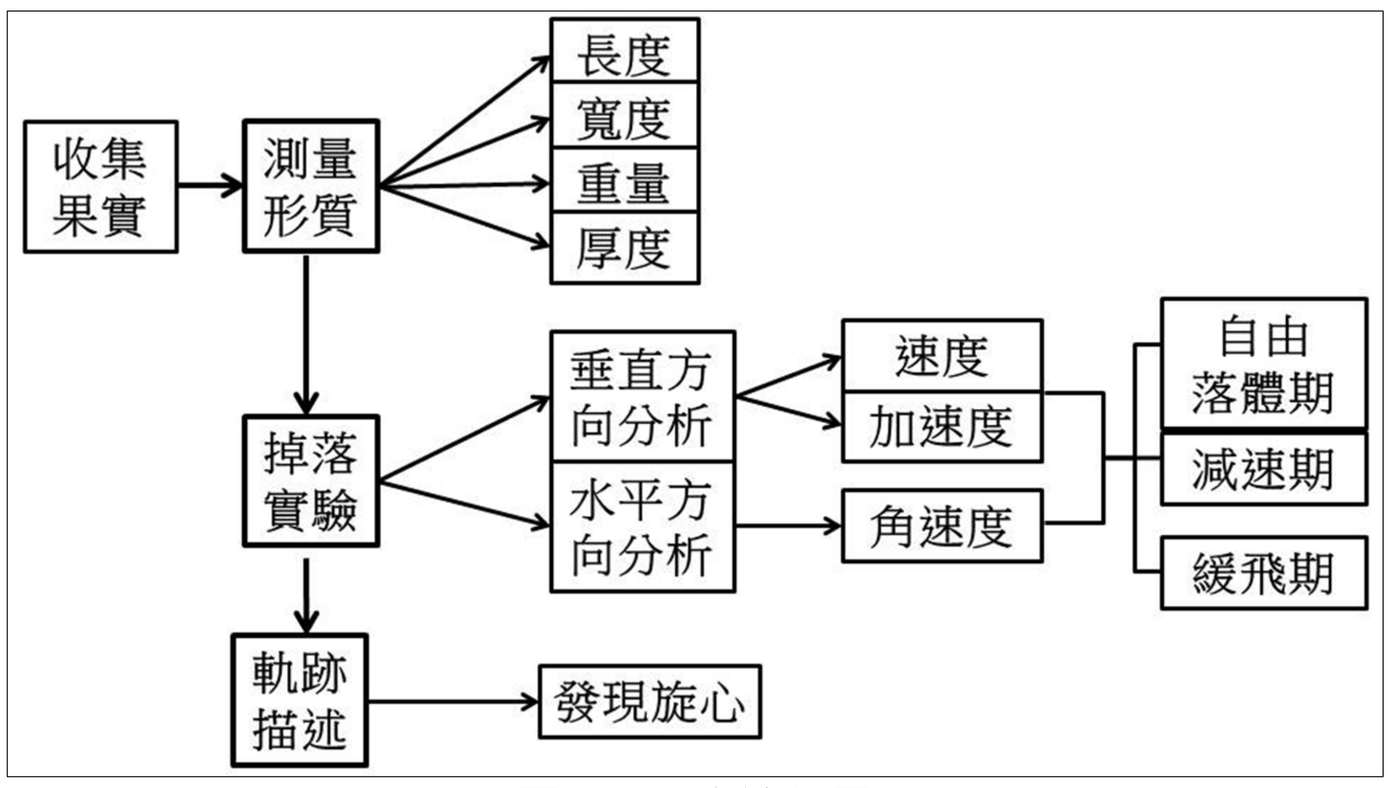
參、研究設備及器材

圖一、實驗器材架設

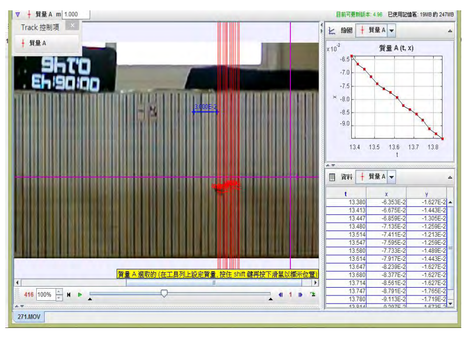


圖二、一對翅果

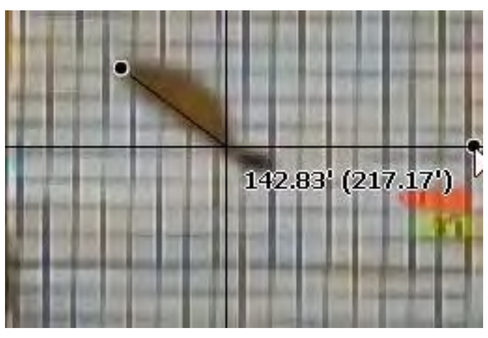
肆、研究過程及方法



圖三、研究流程圖



圖四、軌跡追蹤軟體Tracker

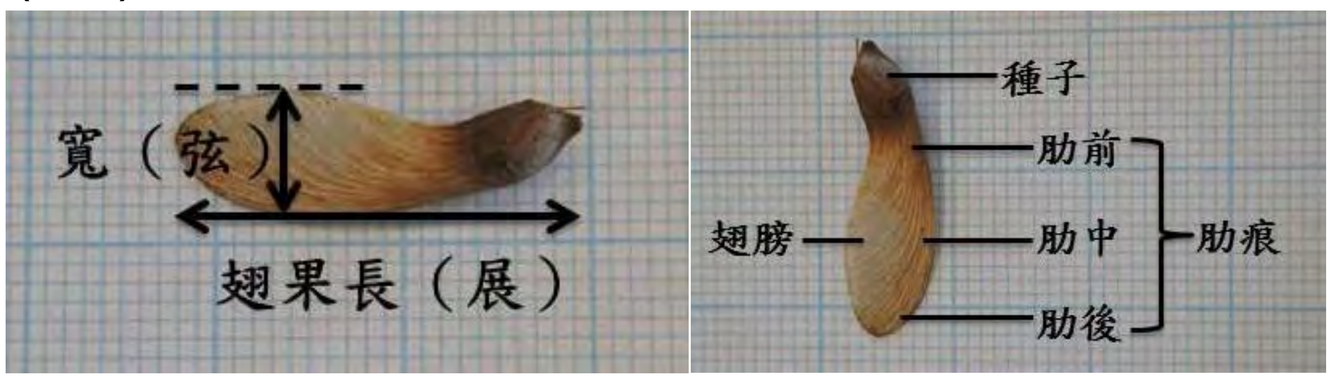


圖五、以PicPick測量角度

伍、研究結果

一、果實結構分析

（一）結構測量：測量翅果長、寬、重，及翅膀與肋的厚度。



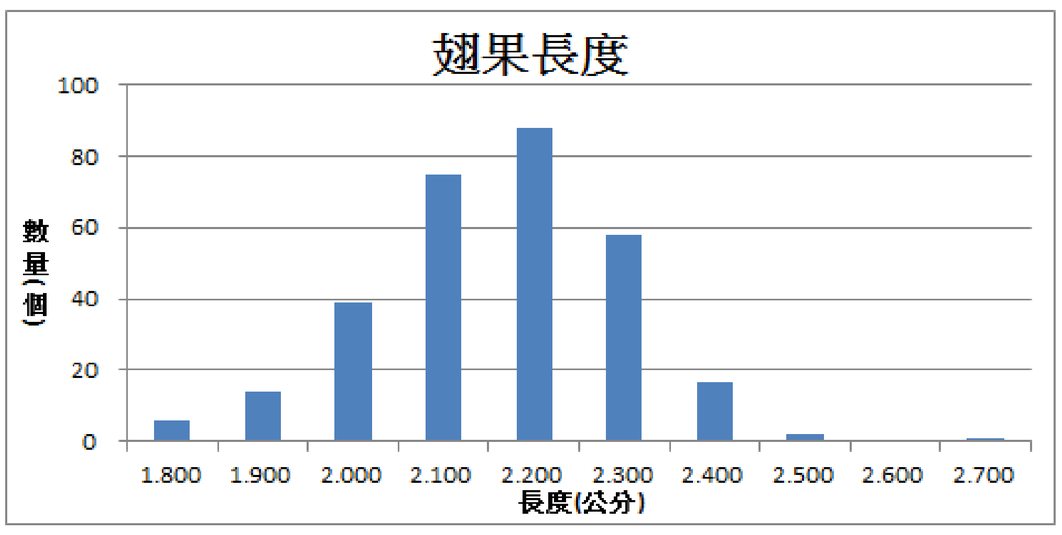
圖六、翅果結構示意圖

表一、 翅果各結構測量結果平均（N=300）

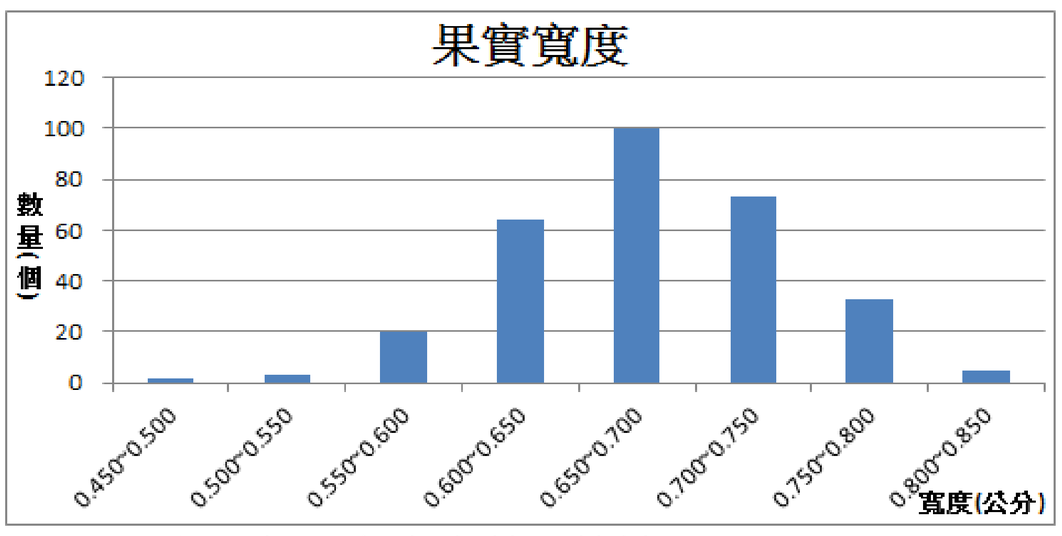
	長	寬	肋前厚	肋中厚	肋後厚
平均	2.210(cm)	0.681(cm)	0.510(mm)	0.304(mm)	0.179(mm)

	種子厚	翅膀厚	果實總重	種子重	翅重(含肋)
平均	3.082(mm)	0.098(mm)	0.0276(g)	0.0225(g)	0.0044(g)

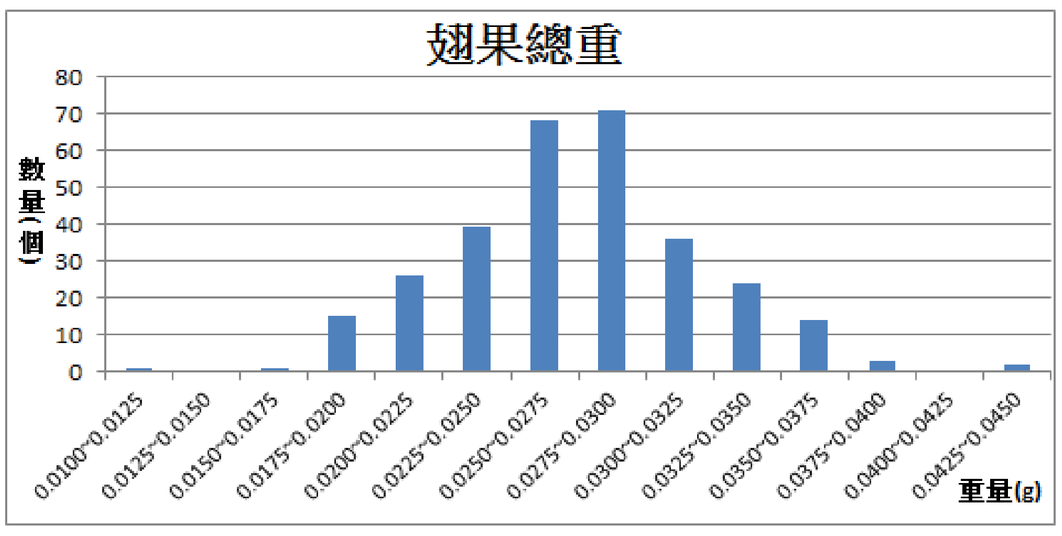
翅果長度以2.240公分最為常見（圖七）；寬度以0.670公分最為常見（圖八）；總重量以0.0285公克重最為常見（圖九），翅果長、寬、總重皆呈常態分布。果實展弦比平均約為3.26（圖十），又以介於3.00到3.25最為常見。



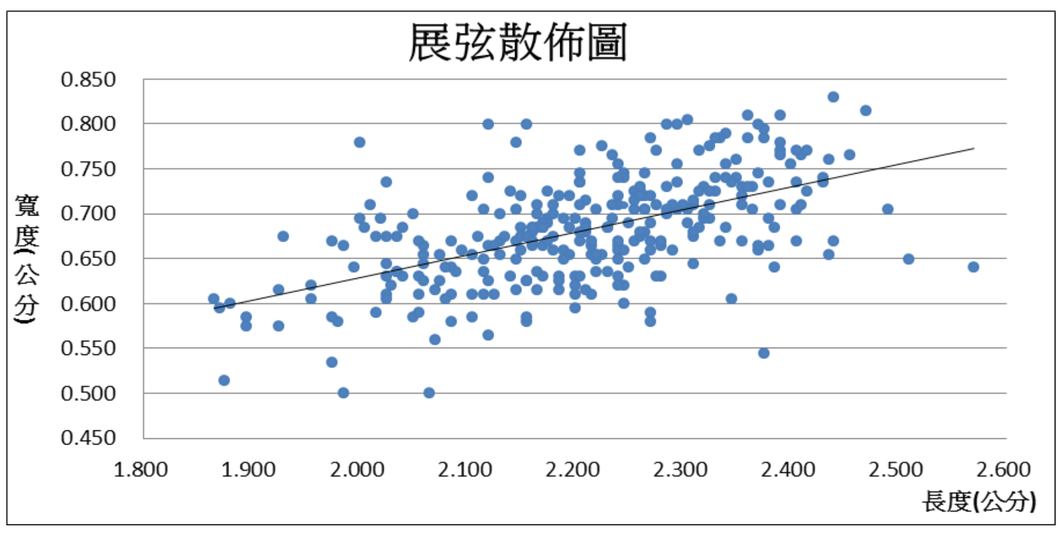
圖七、翅果各長度數量統計圖（N=300）



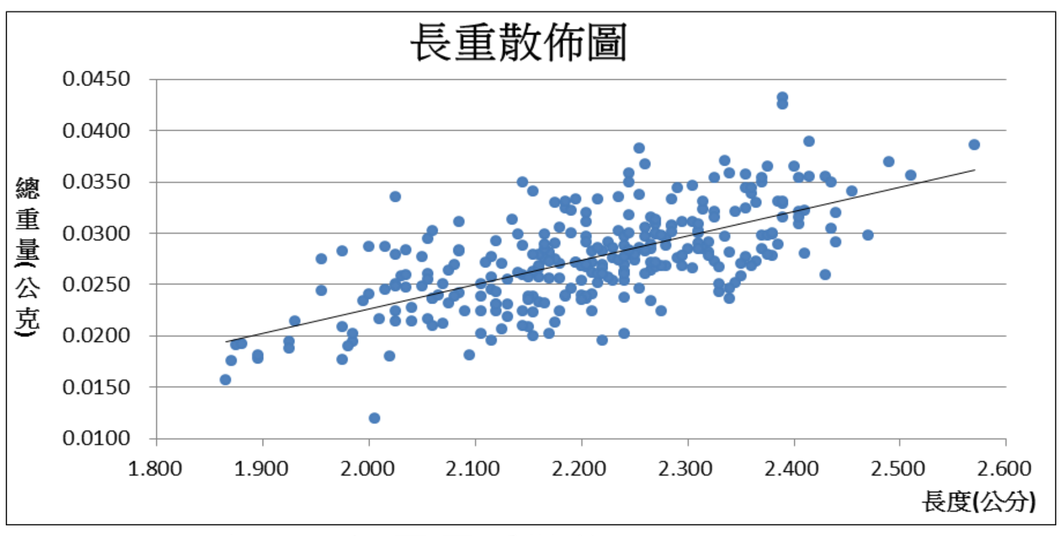
圖八、翅果各寬度數量統計圖（N=300）



圖九、翅果各總重量數量統計圖（N=300）



圖十、翅果展弦散佈圖（N=300）



圖十一、翅果長重散佈圖（N=300）

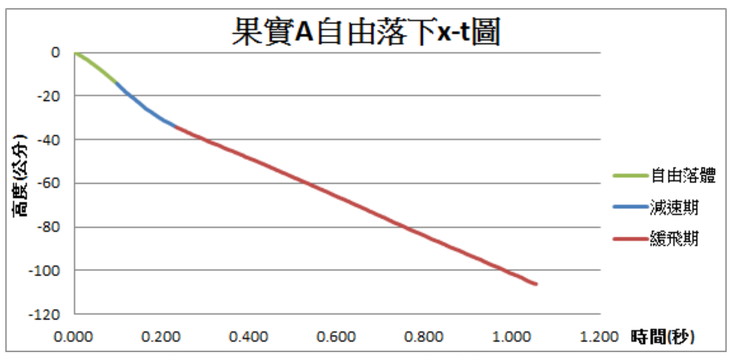
二、翅果自由落下的移動速率及軌跡分析

依果實展弦比分別從2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50中各挑選三個果實，以高速攝影機（496f/s）拍攝自由落下的影片，並以Tracker追蹤其運動軌跡，向上為正，製成 x - t 圖及 v - t 圖。取三群中各一顆果實編號為A、B、C果實，又因展弦比以3.00～3.25最為常見，再取D果實進行比較，詳細資料如表二：

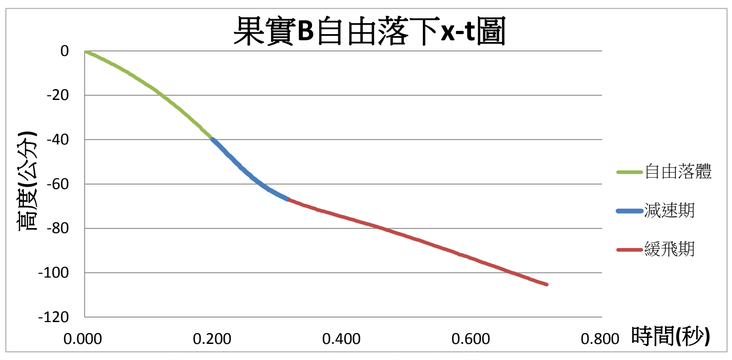
表二、 A、B、C、D果實長、寬、重比較圖

果實編號	A	B	C	D
長(公分)	2.120	2.470	2.305	2.290
寬(公分)	0.740	0.815	0.705	0.710
重(公克)	0.0231	0.0298	0.0347	0.0345
展弦比	2.86	3.03	3.27	3.23

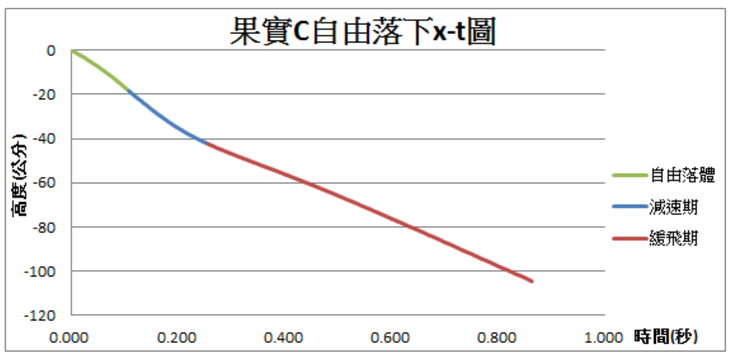
（一）翅果鉛直落下位置對時間關係圖



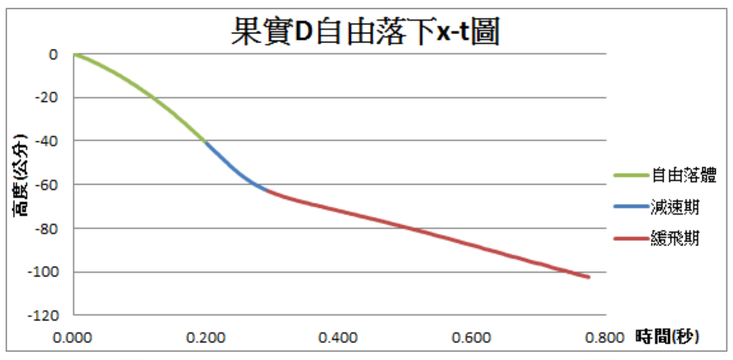
圖十二、果實A自由落下x-t圖



圖十三、果實B自由落下x-t圖

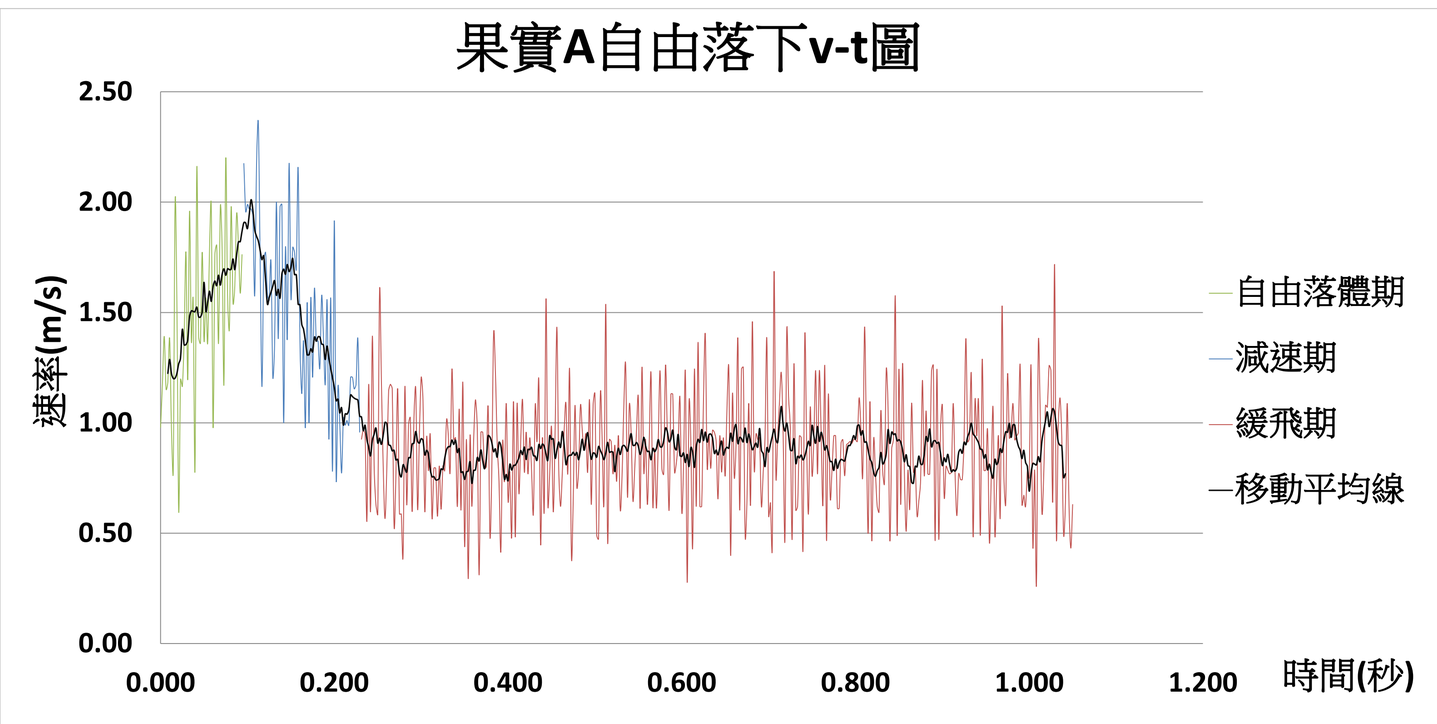


圖十四、果實C自由落下x-t圖

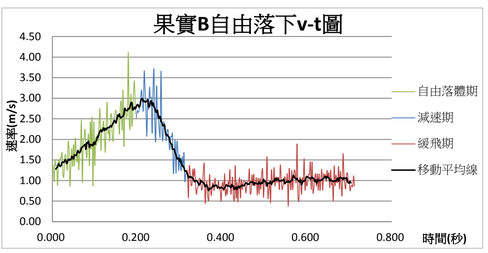


圖十五、果實D自由落下x-t圖

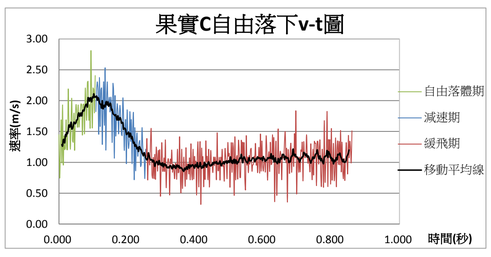
（二）翅果鉛直落下速度對時間關係圖



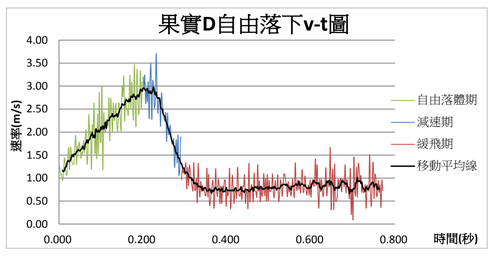
圖十六、果實A落下v-t圖



圖十七、果實B落下v-t圖



圖十八、果實C落下v-t圖



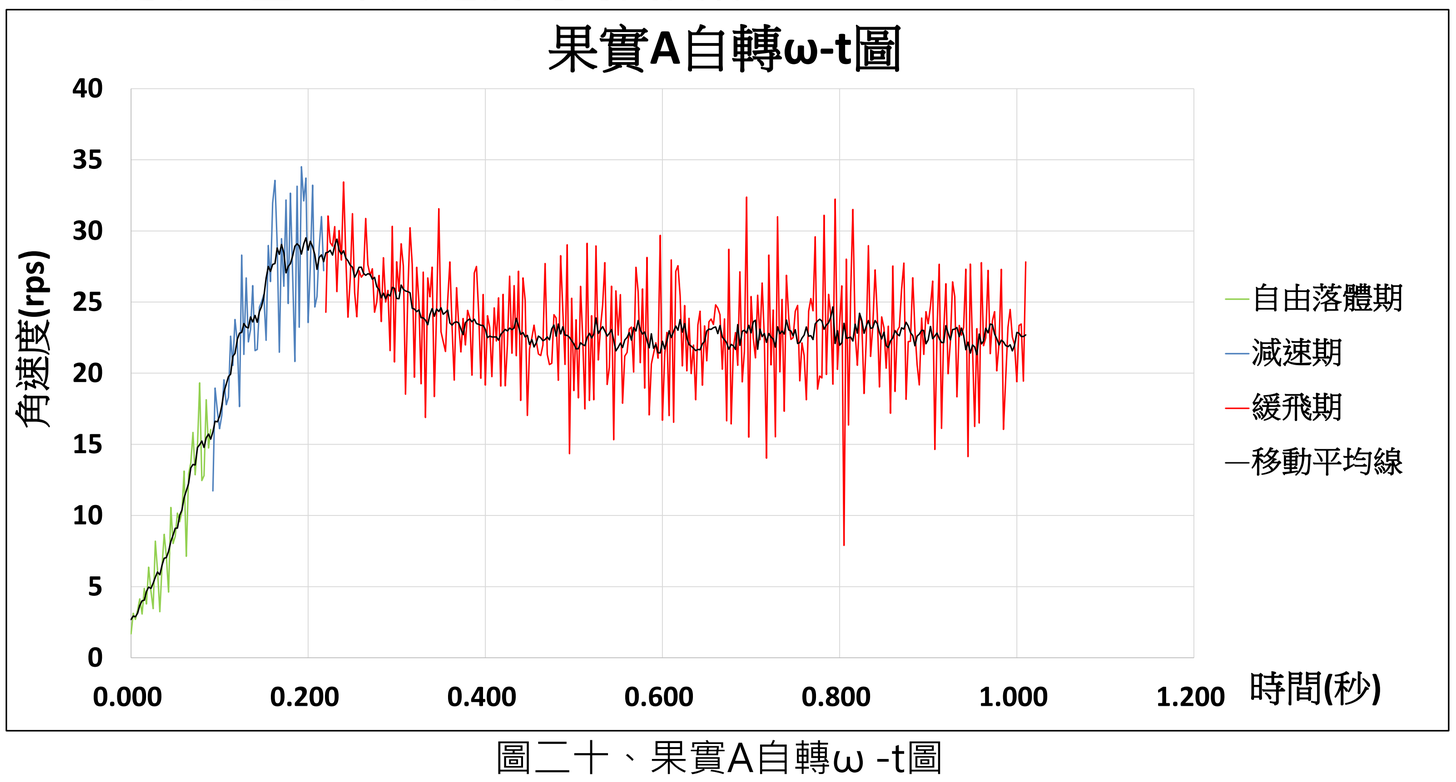
圖十九、果實D落下v-t圖

由v-t圖可將飛行軌跡分為：自由落體、減速期、緩飛期。自由落體期時間約占整體飛行時間19%；減速期約占14%，果實開始旋轉，掉落速度減慢；緩飛期約占67%，由v-t圖來看，可發現果實掉落開始有規律變化。

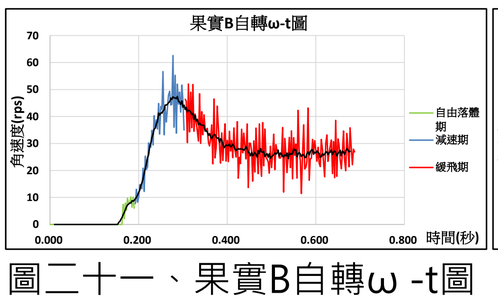
表三、翅果落下分期比較

分期	自由落體期	減速期	緩飛期
飛行時間(秒)	0.150±0.057	0.122±0.025	0.579±0.185
平均落下速率	約為1.82m/s	約為1.95m/s	約為0.44m/s
平均加速度	約為-6.92m/s²	約為9.86m/s²	約為0.78m/s²
飛行狀況	翅果加速落下，無明顯旋轉	因加速度改變方向，明顯減速	前期稍微減速再加速，後期呈週期性震盪

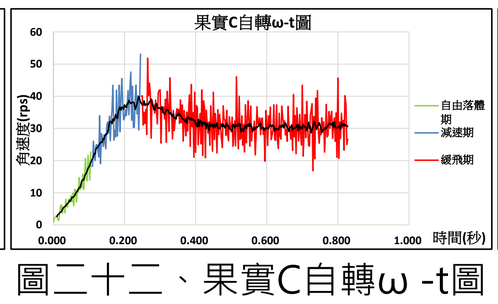
三、翅果鉛直落下角速度對時間關係圖



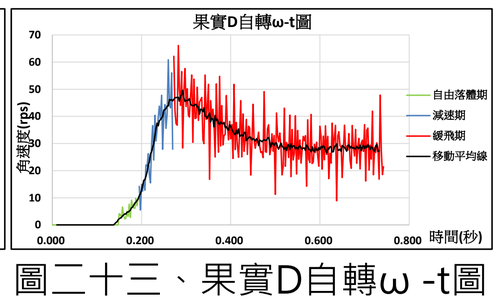
圖二十、果實A自轉ω -t圖



圖二十一、果實B自轉ω -t圖



圖二十二、果實C自轉ω -t圖



圖二十三、果實D自轉ω -t圖

自由落體期果實以翻轉為主，無法測量角度，故ω- t 圖有角速度等於零的情況；減速期加速旋轉；緩飛前期角速度漸減，後期幾乎等速旋轉。無論哪個分群的果實，飛行模式皆有相似性

表四、翅果落下分期比較

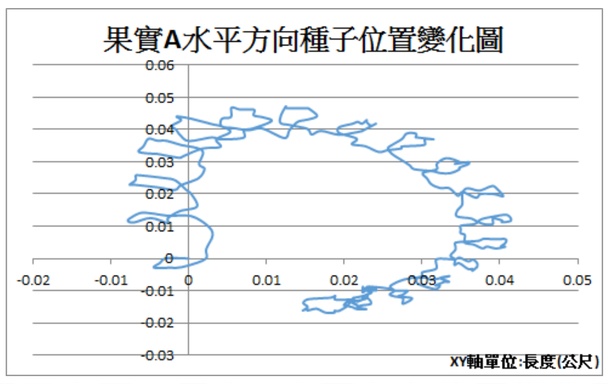
分期	自由落體期	減速期	緩飛期
總圈數	0.46±0.31	3.80±0.73	16.28±3.7
平均角速度(r.p.s)	4.11±3.63	29.97±4.22	29.29±3.76
旋轉情形	果實無明顯旋轉，以翻轉為主，果實與水平面夾角較大	翅果開始旋轉，果實與水平面夾角漸小，角速度漸大，最大角速度約出現在此期	角速度漸緩，並逐漸穩定，果實與水平面夾角大致固定

四、探討槭樹翅果飛行時的旋轉特性

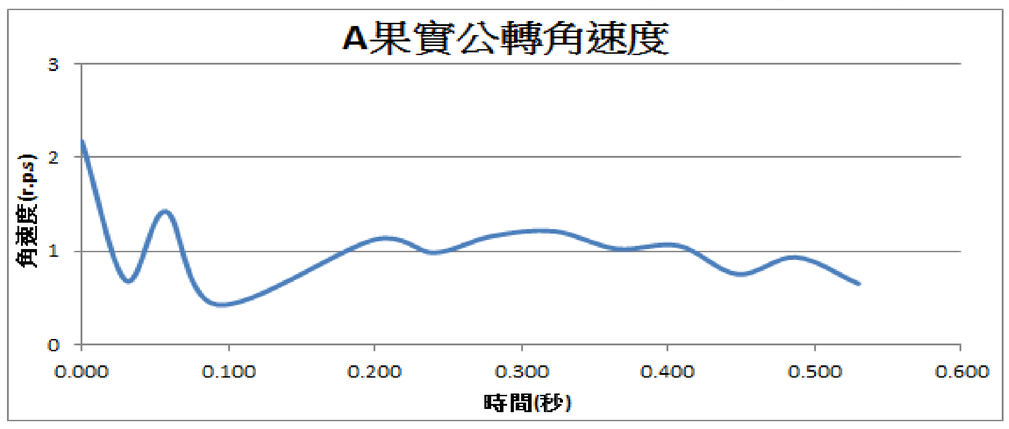
以下是俯拍各分群果實進行重複實驗，並取A、B、C三顆果實最為清楚以利觀察公轉的影片分析。

（一）果實A的公轉觀察

圖二十四、果實A公轉軌跡



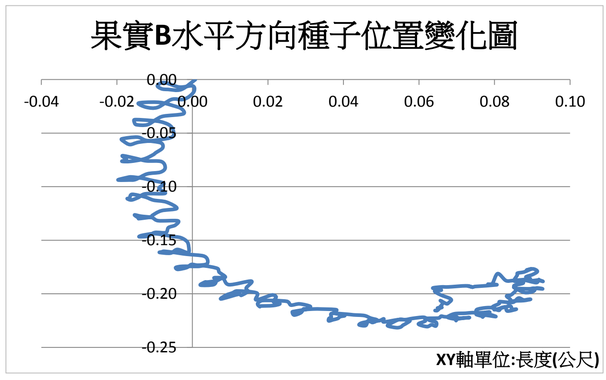
圖二十五、果實A水平方向位置變化圖



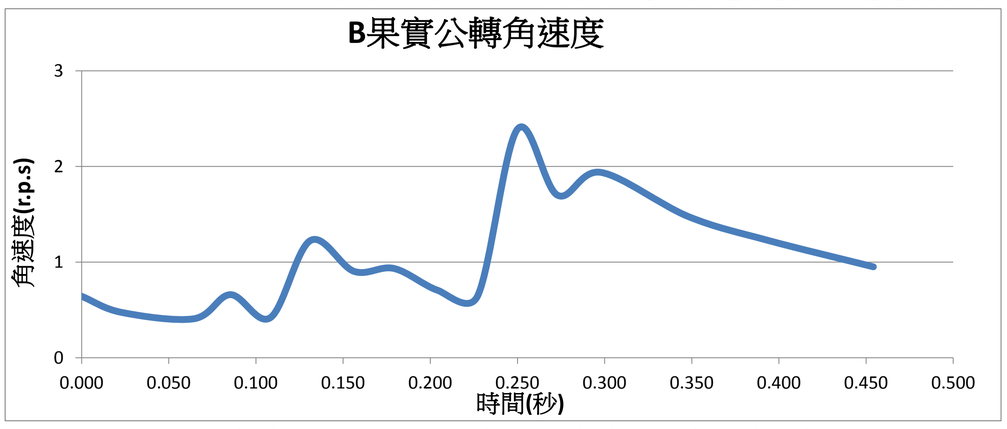
圖二十六、果實A公轉角速度隨時間變化圖

（二）果實B的公轉觀察

圖二十七、果實B公轉軌跡



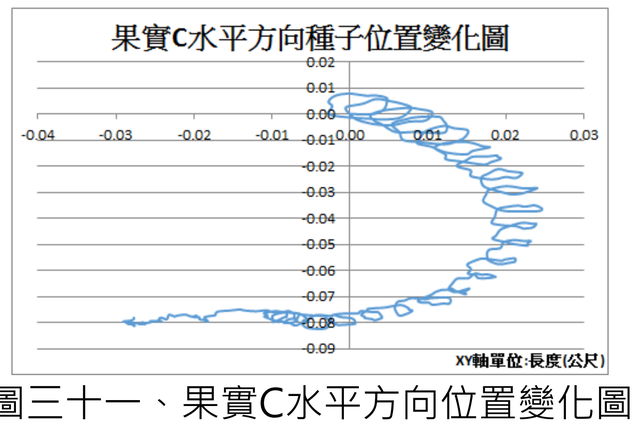
圖二十八、果實B水平方向位置變化圖



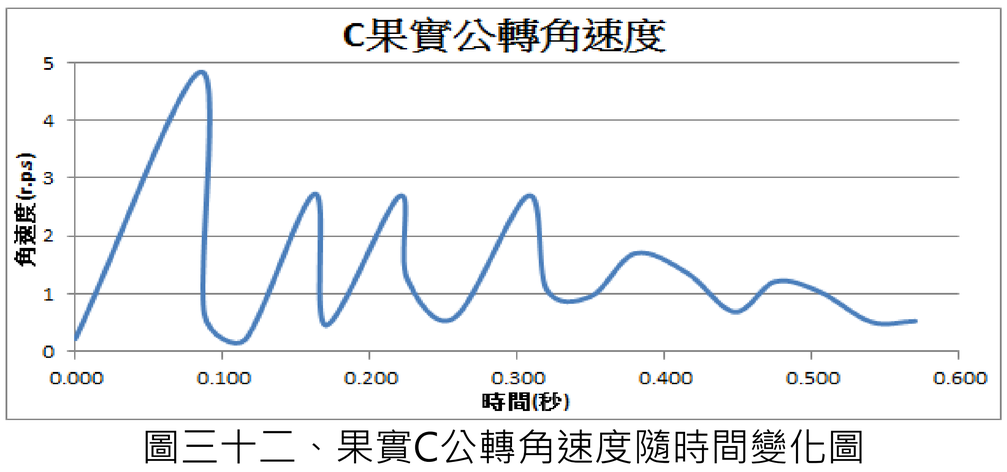
圖二十九、果實B公轉角速度隨時間變化圖

（三）果實C的公轉觀察

圖三十、果實C公轉軌跡



圖三十一、果實C水平方向位置變化圖



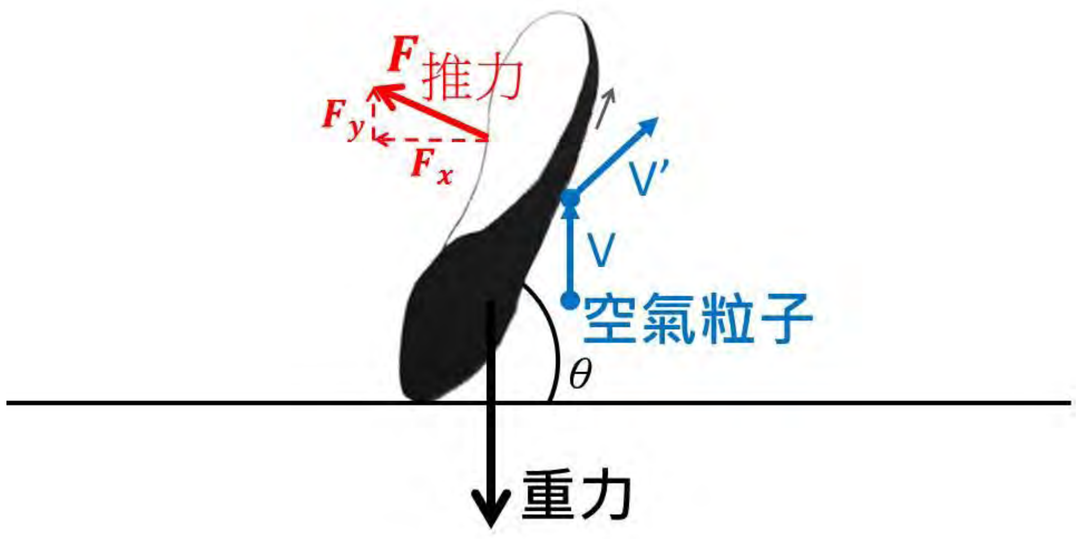
圖三十二、果實C公轉角速度隨時間變化圖

緩飛期的公轉較明顯。槭樹翅果除了本身重心的自轉（圖中小圈）之外，亦繞著一個旋心（旋心會隨著果實掉落而向下移動，因此也能說槭樹果實繞著一個軸公轉）公轉（圖中大圈），且與自轉方向相反。

陸、討論

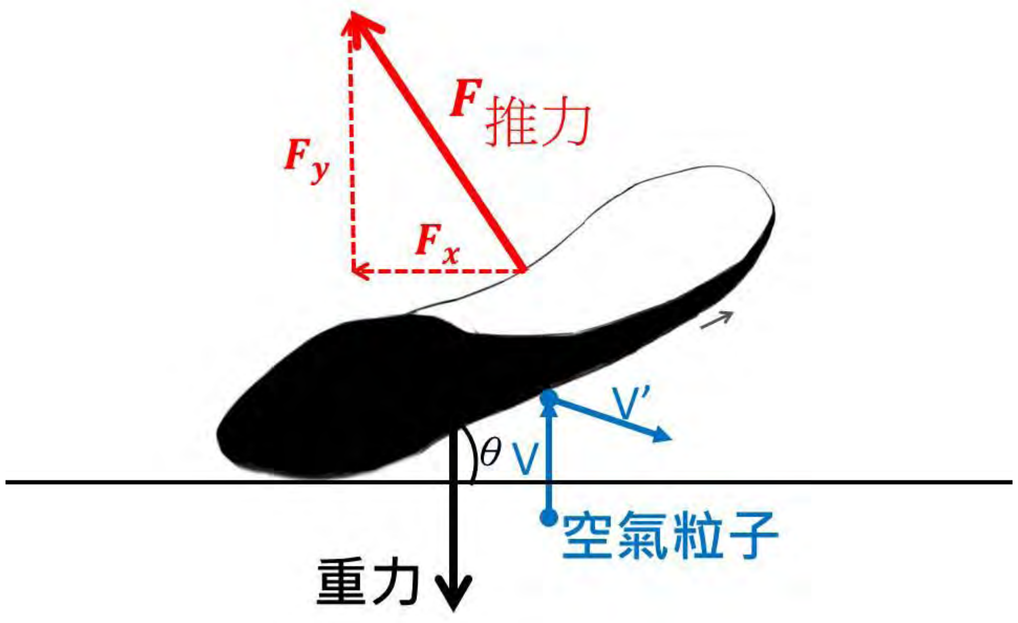
槭樹科植物的果實大多有翅膀，落下時以旋轉方式飄到遠處。果實藉旋轉延長落地時間，增加飄到遠處之機率。槭樹果實周邊發育的翅狀物可增加表面積，增加升力，這和大葉桃花心木(蔡，2012)具翅種子有類似的構造。重量集中在種子部份，翅膀部分(含肋)只占總重量的$\frac{1}{5}$，翅膀厚度約只有肋的$\frac{1}{3}$倍，這些特徵皆有助於槭樹翅果飛行與散播。翅果各結構的數據皆成常態分布($p>0.05$)，無論是何種比例所構成的翅果，皆是為了達到緩飛的目的。

翅果與空氣粒子碰撞產生推力$F_{推力}$（垂直於接觸面）。如圖三十七，自由落體期時，翅果與水平面的夾角θ較大，碰撞造成空氣粒子的動量變化較小，因此$F_{推力}$較小，其鉛直分量F_y也較小，F_y與重力的合力向下，果實加速落下。



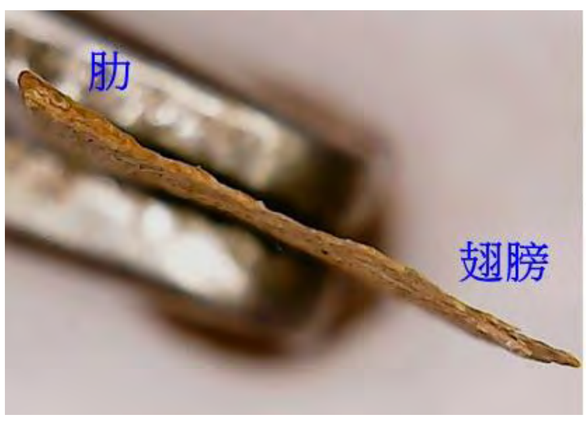
圖三十五、自由落體期空氣對翅果的作用力

在自由落體期及減速期的交界時，θ逐漸變小，碰撞造成空氣粒子的動量變化較大，因此$F_{推力}$漸大，F_y也漸大，與重力的向下合力漸小，甚至產生向上的合力，使翅果減速掉落。而當翅果掉落速度漸減，向上的合力逐漸變小，最終F_y與重力平衡，使掉落速度達到穩定。(如圖三十六）。

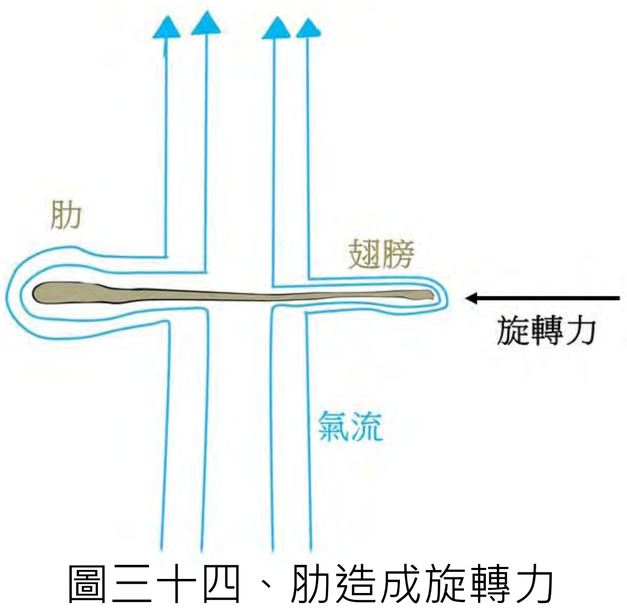


圖三十六、減速期之後空氣對翅果的作用力

我們可將翅膀視為一個個縱切面（圖三十三），當氣流經過翅膀時，肋痕部分較厚，氣流需流過的距離較長，相對氣流速度較快，因此壓力較小；而翅膀部分較薄，相對氣流速度較慢，因此壓力較大。兩側的壓力差產生一個往肋方向的旋轉力，對質心造成力矩，使翅果旋轉（如圖三十四）。

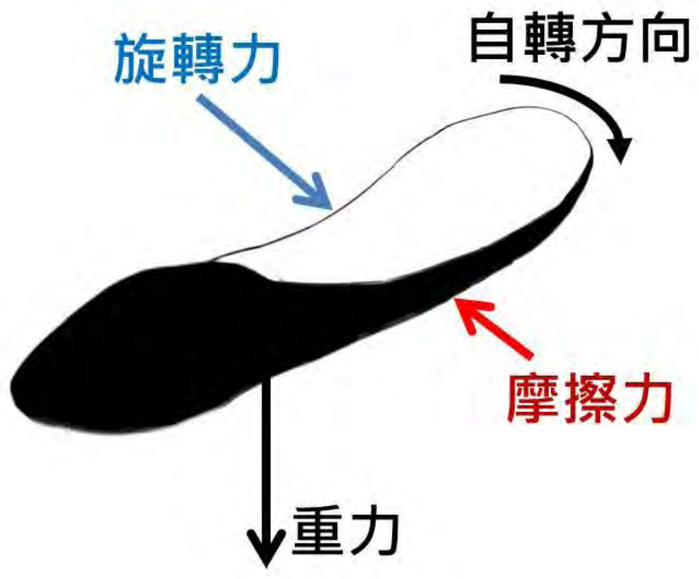


圖三十三、解剖顯微鏡下翅的縱切面



圖三十四、肋造成旋轉力

翅果旋轉時，根據低速時的空氣阻力公式：$F=kAv$（k＝阻力係數，A＝截面積，v＝速度），空氣摩擦力和速度成正比，當轉速增加，摩擦力也同時增加，合力矩漸小且與原旋轉方向相反，使翅果稍微減速旋轉；減速後摩擦力漸小，最後與旋轉力達平衡，合力矩接近零，達到穩定旋轉。（如圖三十七）。



圖三十七、旋轉力及摩擦力對翅果的作用

從能量的角度來看，假設能量只牽涉位能跟動能的互換。當果實自由落下後，減少的位能就轉變成動能，其中我們又將動能分成移動動能與轉動動能。

自由落體期時，移動動能↑，自轉的轉動動能↑，位能主要變成移動動能，轉動動能增加較少。

減速期時，翅果旋轉逐漸加速，此時較多的能量轉為轉動動能，因此移動動能↓，而減緩了下落的速度，造成延長滯空時間的效果。

緩飛期時，翅果的鉛直移動速度及自轉角速度幾乎沒有變動，也就是動能幾乎維持不變。若只考慮位能與移動動能及轉動動能間的互換，將無法解釋以上情形，我們推測是因為與空氣摩擦產生熱能而散失。

觀察到翅果有公轉的現象，翅果會繞著果實外的一個軸一邊公轉，一邊自轉掉落，且公轉方向永遠和自轉方向相反。我們希望將來能夠研究找出造成公轉的向心力。

槭樹翅果因自身構造及氣流作用，落下時會旋轉並減速，有很好的緩降效果，且其容錯率高，即使翅膀破裂也能繼續旋轉；若能利用翅果旋轉減速的原理，模擬出在落下時有類似行為的載具，跟降落傘等載具相比可能僅需較少材料，或許可以成為另一種空投物資或緊急逃生的新方法，也是未來研究的方向。

柒、結論

一、槭樹翅果的長、寬、重皆呈常態分布。果實展弦比可分成最常見三群，分別為2.75～3.00、3.00～3.25、3.25～3.50。

二、槭樹翅果飛行有一定的規律性，且各型態翅果飛行皆具有相似性。翅果的落下過程可依速度分為自由落體期、減速期、緩飛期，因空氣作用力使翅果與水平面的夾角漸小，翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度（0.44±0.94m/s）落下，達到緩降效果。

三、翅果上的肋痕會造成流速差使壓力不同，產生旋轉力而使翅果開始旋轉。旋轉時移動動能減少時，轉動動能增加，造成翅果減速，達到緩飛的效果。

四、翅果除了自轉，也會繞著翅果外的一個軸公轉，且公轉半徑約為翅長一倍到兩倍。緩飛期的公轉較明顯。

捌、參考資料及其他

一、朱家慧、曾麟雅。2013。天空的舞者—探討槭樹種子的飛行模式　第53屆中小學科學展覽會作品說明書。

二、蔡亞婷。2012。不對稱之美---大葉桃花心木種子飛行軌跡的分析 2012年台灣國際科學展覽會優勝作品專輯。

三、陳昱雯、林于真、董懿萱。2010。看你飛多久 - 火焰木種子滯空的奧秘 第50屆中小學科學展覽會作品說明書。

四、劉又瑄、蔡亞婷、駱宥辰。2011。 飄飄何所似—以單翅種子飛行原理進行飛播造林的研究 第51屆中小學科學展覽會作品說明書。

五、朱達勇、谷天心、徐植蔚、鄭宜男（譯）。2007。普通物理學（上冊）（原作者：Harris Benson）。新北市：學銘圖書。