

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

(鄉土)教材獎

030104

「杞」幻之旅-探討黃杞翅果緩降落的飛行模式

學校名稱：南投縣立大成國民中學

作者： 國二 吳怡蓁 國二 廖家玉 國二 吳宸瑜	指導老師： 梁敏芳 徐敏益
---	-----------------------------

關鍵詞：黃杞、翅果、飛行模式

摘要

黃杞翅果依左翅、中翅、右翅的比例分為四型。垂直方向的飛行模式可分為自由落體期，減速期和緩飛期，翅果先快速落下，接著翻轉減速並開始轉動，轉動後以接近等速的狀態落下。水平方向的飛行模式則以種子為中心轉動，翅果的角速度先增加，再減速下降，進入穩定狀態，以接近等角速度轉動。不同類型的翅果飛行模式略有差異，第一型(標準型)的翅果，飛行模式最為穩定，落下的速度小且飛行時間長，緩飛的效果最好。第二、三型左右翅長差異大，則飛行不穩，落下速度大而飛行時間短，第四型三翅近等長，最易轉動但飛行模式也較不穩定，落下速度比第一型大而飛行時間短。黃杞翅果的飄移距離小，並可承載6倍種子的重量，可作為空投飛行器的參考。

壹、研究動機

有次和家人到蓮華池踏青時，看到天上掉落下了一片片像直升機般降落的翅果，仔細觀察它飛行時的細節，發現它是以旋轉的方式降落，覺得很有趣，於是我們向老師提出想做這方面研究的想法，剛開始我們只是將翅果隨手丟，讓它降落，發現不是每一次都會成功，而成功的翅果幾乎都沿著一條直線降落，除非有風，不然它不會飄太遠。這使我們更加好奇他的飛行結構，看看到底為甚麼他飛行時幾乎是垂直降落?如果在不同高度的地方飛行，是否會受影響?帶著滿滿好奇的我們就開始了以下的研究。

貳、研究目的

- 一、分析黃杞翅果各結構型態分類
- 二、探討黃杞翅果在垂直方向的飛行狀況
- 三、探討黃杞翅果在水平方向的飛行狀況
- 四、分析黃杞翅果散布距離

參、研究設備及器材

一、研究設備及器材

黃杞翅果、電子天秤(Sartorius BSA224S-CW)、游標尺、夾鏈袋、乾燥箱、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(Meazure)、雷射筆、計時器、梯子

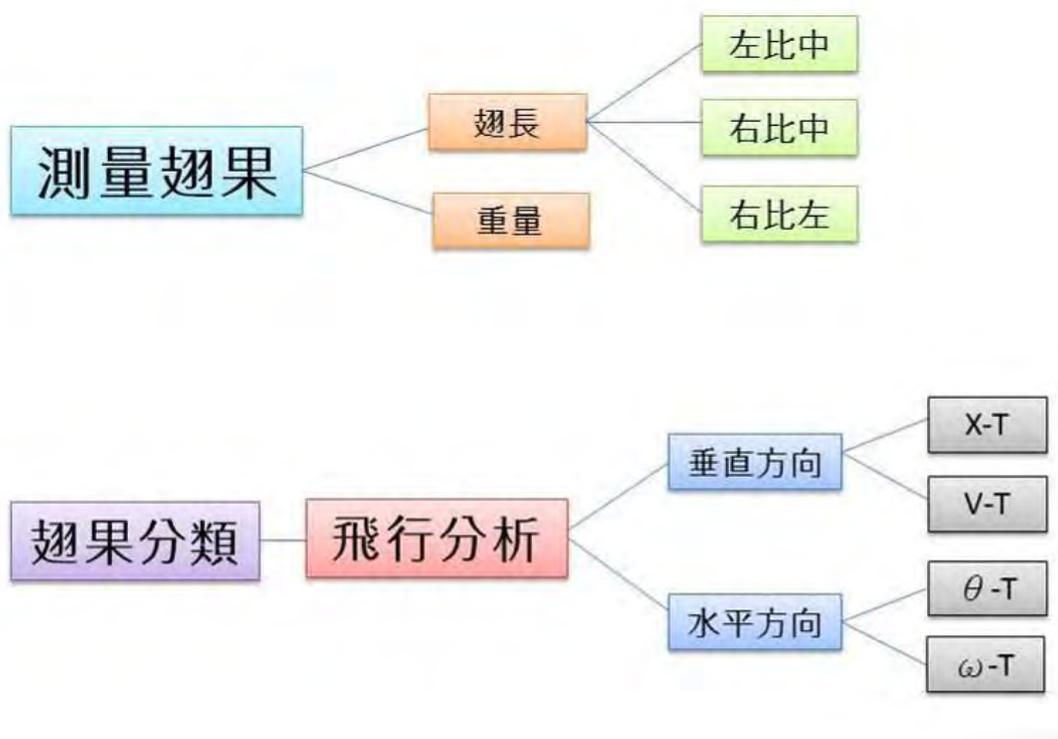


二、黃杞翅果介紹

黃杞為胡桃科(Juglandaceae)黃杞屬(Engelhardtia)，臺灣全島低至中海拔約 200~1,500 公尺處之闊葉林內，常為組成暖溫帶林主要樹種之一。落葉性喬木，樹幹皮為灰褐色，縱向不規則細淺短溝裂，芽裸露。偶數羽狀複葉，互生，無托葉；小葉 6~10 片，披針形，長 10~30 公分，全緣或偶有鋸齒，漸尖頭。小堅果球形，具 3 裂之膜質苞(翅)。黃杞的果實具有三裂片的黃色膜質苞，其功能如同翅果一般，光輝的十月正值其成熟的時候，此時藉由大自然的舞台，由空中落下，恰如穿著黃色舞衣的舞者，踩著優雅的舞步凌空而下。黃杞木材的新鮮切面為淡黃色，然後變成深黃色，故名「黃杞」。因全株具毒性，早期山區居民將黃杞樹皮及樹葉搗碎，置於溪流中，使魚浮在水面，藉以將其捕獲；另其樹皮亦是繩索的原料。在野外要辨識黃杞不難，可以把枝條或是葉子的表皮刮破，傷口會呈現黃色，隨著時間的增加，黃色會越來越深，這也是「黃杞」之名的由來。



肆、研究過程或方法



實驗一、翅果結構測量與分析

我們使用游標尺及電子天秤測量 200 片翅果左、中、右片的翅果長度與整個翅果的重量，以左翅長比中翅長、右翅長比中翅長及左翅長比右翅長的比值來分類(圖 1)，嘗試找出其具代表性的標準型種子與極端型種子，進行飛行實驗。



圖 1：翅果構造圖

實驗二、飛行軌跡垂直追蹤分析

拍攝方法為兩人分別於方格紙正上方及側面架設高速攝影機，另一個人翻轉尺使翅果掉落，以高速攝影機(Nikon J1、Sony DSC-RX10M2)從上方及側面拍攝翅果自由落下的影片，共取 7 顆具代表性的翅果進行拍攝，並以軌跡追蹤軟體

(Tracker)追蹤其種子部分垂直方向掉落的軌跡，分析翅果落下時垂直方向的位置變化與速度變化趨勢(圖 2)。

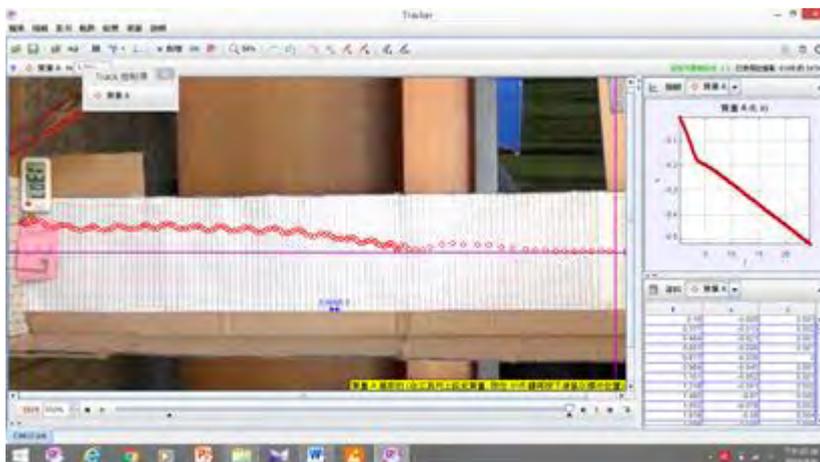


圖 2：Tracker 軟體分析翅果落下時垂直方向的位置變化

實驗三、飛行軌跡水平追蹤分析

拍攝方法同實驗二，每顆翅果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，事後再進行分析。以高速攝影機(Nikon J1、Sony DSC-RX10M2)從上方拍攝翅果自由落下的影片，並以軌跡追蹤軟體(Tracker)追蹤其種子部分水平方向掉落的軌跡，以(Meazure)測量其角度(圖 3)，再以(Excel)計算其角速度，分析翅果自由落下之角速度變化及趨勢。

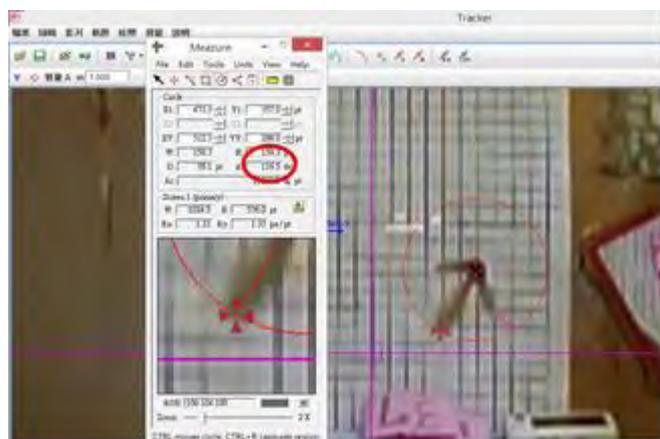


圖 3：Meazure 軟體分析角度變化

實驗四、分析黃杞翅果散布距離

將雷射筆固定於上方牆壁使其光線垂直照射於兩尺間的交點，作為中心點，將不同類型黃杞翅果分別在 150cm、200cm、250cm 處翻落，並以照相機記錄翅果掉落位置，計算黃杞翅果的散布距離(圖 4)。



圖 4：翅果散布距離實驗裝置圖

伍、研究結果

一、 分析黃杞翅果各結構型態分類

(一)翅果長度測量

我們將 200 顆黃杞翅果進行測量，分別測量它的翅果長度及重量，翅果呈三出狀。我們將它分為左翅、中翅、右翅三個部分，結果發現右翅比中翅的比值約在 0.55~0.75cm 之間(圖 5); 左翅比中翅的比值約在 0.55~0.75cm 之間(圖 6);右翅比左翅的比值約在 0.9~1.1cm 之間(圖 7)。結果發現翅果長度呈現常態分佈，左右翅大部分呈對稱狀態，中翅較長，左右翅皆約占中翅的 60%。

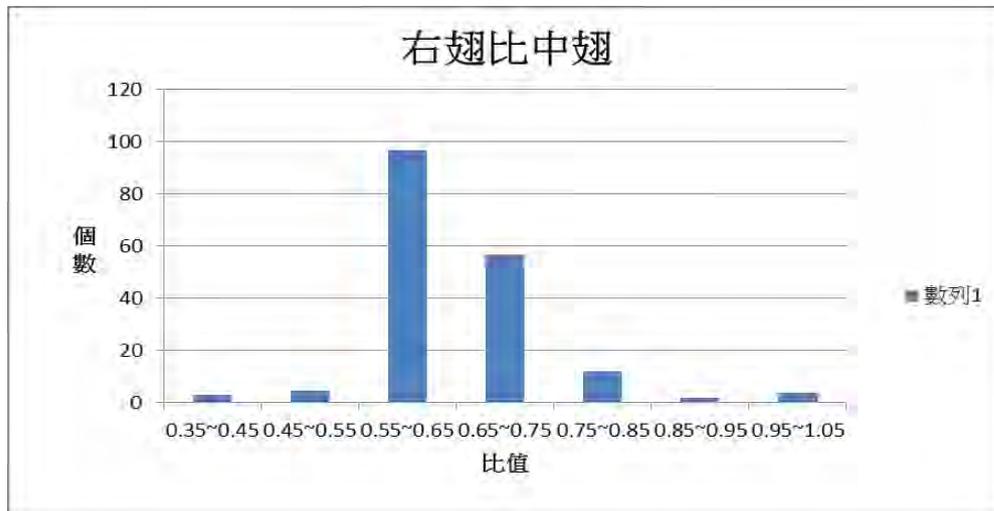


圖 5：右翅比中翅的比值數量統計(n=200)

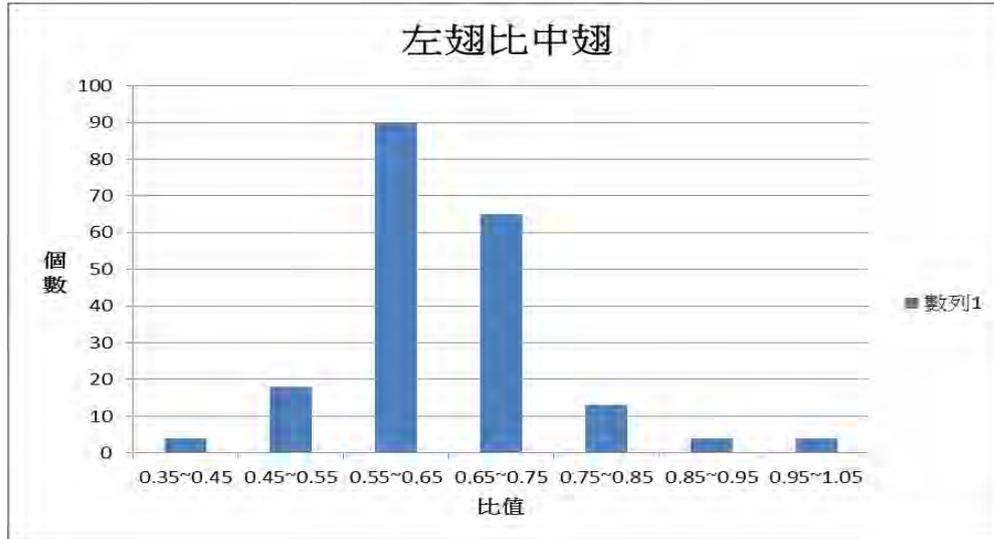


圖 6：左翅比中翅的比值數量統計(n=200)

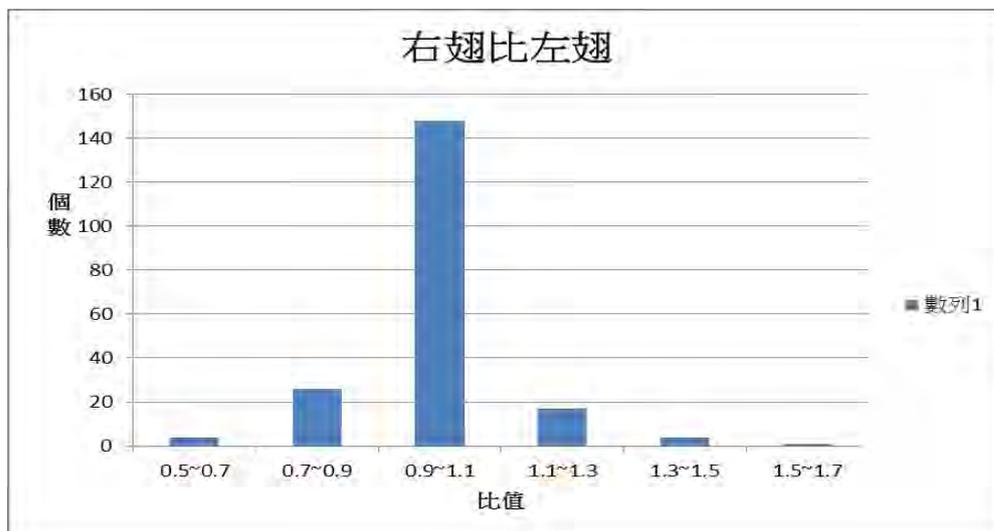
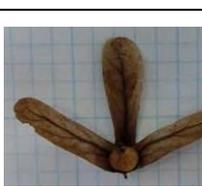


圖 7：左翅比右翅比值數量統計(n=200)

我們依據翅果的測量結果，將黃杞翅果分成 4 個型態(表一)，第一型(標準型)翅果，右翅/左翅的比值落在 0.7~1.3，兩翅接近左右對稱；第二型(左翅較右翅長)，右翅/左翅的比值小於 0.7；第三型(右翅較左翅長) 右翅/左翅的比值大於 1.3；第四型(三翅近等長)，右翅/中翅的比值大於 0.8，且同時左翅/中翅的比值也大於 0.8 的翅果。

表一、翅果分型依據

類型	編號	照片	比值	敘述
一	137		右翅/中翅=0.61 左翅/中翅=0.60 右翅/左翅=1.00	右：2.12cm 中：3.46cm 左：2.11cm
	38		右翅/中翅=0.67 左翅/中翅=0.60 右翅/左翅=1.13	右：2.13cm 中：3.17cm 左：1.89cm
	51		右翅/中翅=0.61 左翅/中翅=0.54 右翅/左翅=1.12	右：1.82cm 中：3cm 左：1.63cm
	20		右翅/中翅=0.54 左翅/中翅=0.47 右翅/左翅=1.16	右：1.86cm 中：3.43cm 左：1.61cm
二	6		右翅/中翅=0.36 左翅/中翅=0.73 右翅/左翅=0.50	右：1.19cm 中：3.285cm 左：2.4cm 左翅比右翅長。
三	89		右翅/中翅=0.83 左翅/中翅=0.43 右翅/左翅=1.91	左：0.97cm 中：2.23cm 右：1.86cm 右翅比左翅長
四	14		右翅/中翅=0.84 左翅/中翅=0.83 右翅/左翅=1.01	左：2.14cm 中：2.56cm 右：2.12cm 三翅約等長。

我們將這四型的翅果加以統計，發現 第一型(標準型)翅果約占 94%；第二型(左翅>右翅)翅果約占 2%；第三型(右翅>左翅)翅果約占 2.5%；第四型(三翅近等長)翅果約占 1.5%(圖 8)。

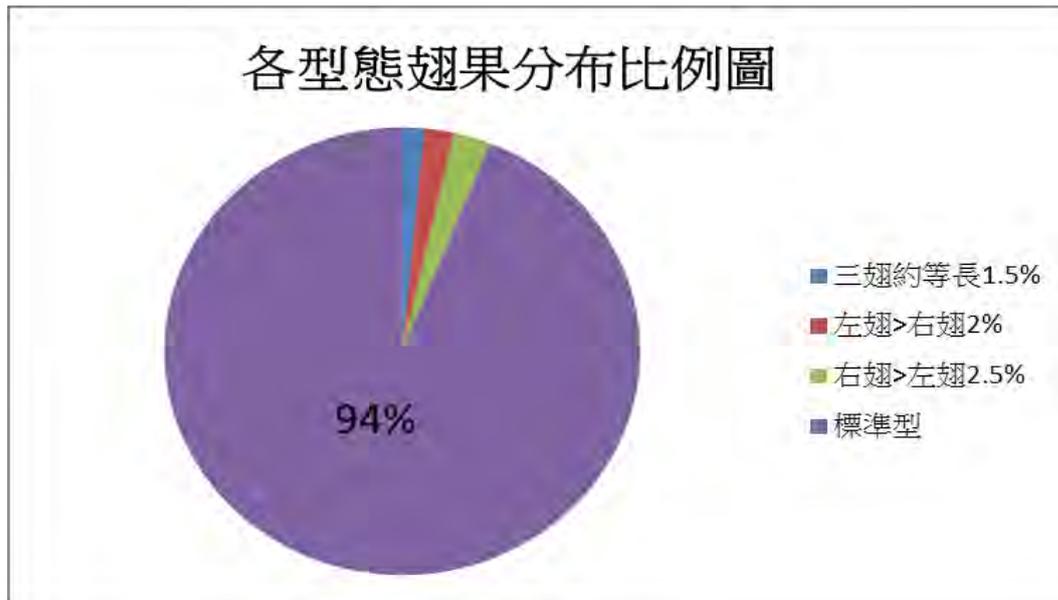


圖 8：各型態翅果分布比例圖(n=200)

所以，我們挑選了比值的平均值與極端值翅果來進行實驗，第一型翅果(標準型)編號 137、38、51、20；第二型翅果(左翅比右翅長)編號 6、第三型翅果(右翅比左翅長)編號 89、第四型翅果(三翅近等長)編號 14。

(二)翅果重量測量

測量翅果重量發現，翅果重量在 0.01 克~0.06 克之間，其中在 0.02~0.04 克的翅果最多(圖 9)。我們測量 20 顆翅果的種子及翅翼重量，翅翼重量平均值約在 0.0126g，種子重量平均值約在 0.0225g，可知翅果重量大多集中在種子，且種子重量約是翅翼重量的 1.785 倍(圖 10)。

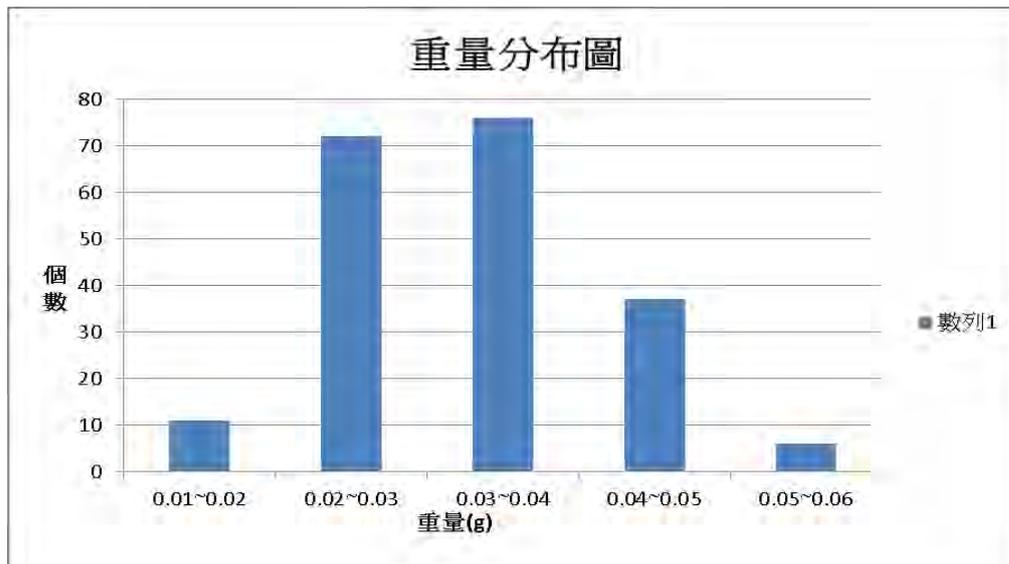


圖 9：黃杞翅果重量數量分布圖(n=200)

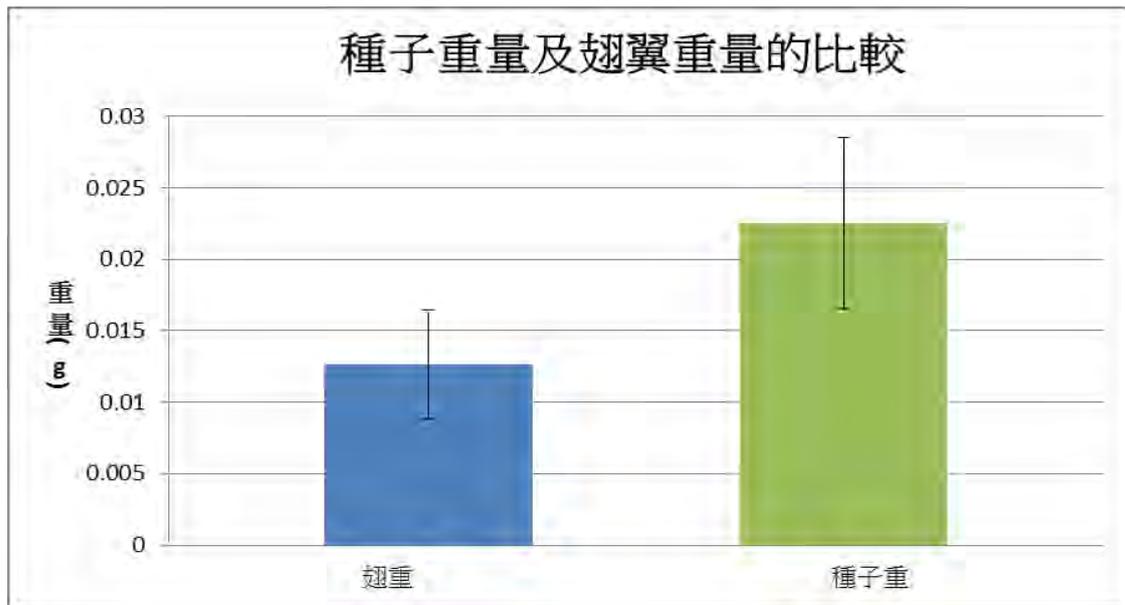


圖 10：黃杞翅果種子重量及翅翼重量的比較(n=20)

二、探討黃杞翅果在垂直方向的飛行狀況

(一)垂直方向位置時間變化

第一型翅果(編號 137)的垂直方向(x-t)關係圖(圖 11)，可以發現，0~0.1625 秒翅果快速落下，此時稱為自由落體期，此時期翅果無明顯轉動，圖形呈現近二次函數的曲線。開始旋轉後產生減速效果，減速期為 0.175~0.25 秒，此時翅果落下的速度減慢，圖形產生轉折。0.265 秒以後達到近似平衡，並進入接近等速的狀態降落，此段為緩飛期，圖形呈現近似斜直線，此翅果以順時針的方式降落。

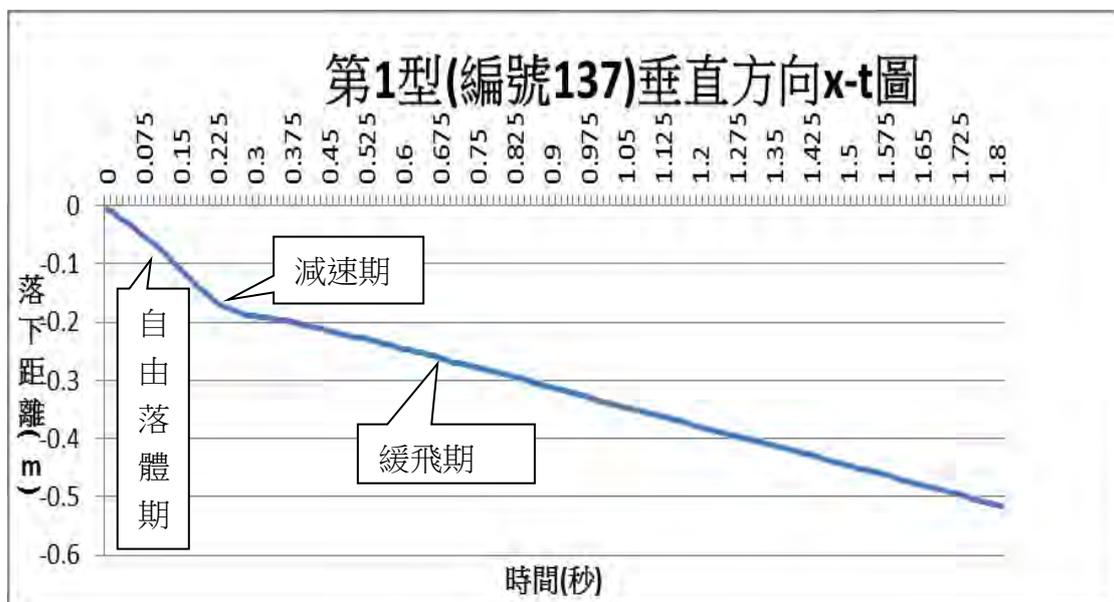


圖 11：第一型(編號 137)垂直方向 x-t 圖

第二型(左翅>右翅)(編號 6)的垂直方向(x-t)關係圖(圖 12)可以發現，0~ 0.125 秒翅果快速落下，此時為自由落體期，此時期無明顯旋轉。減速期為 0.1375~0.2625 秒，0.275 秒以後開始穩定，此段為緩飛期以順時針的方式降落。

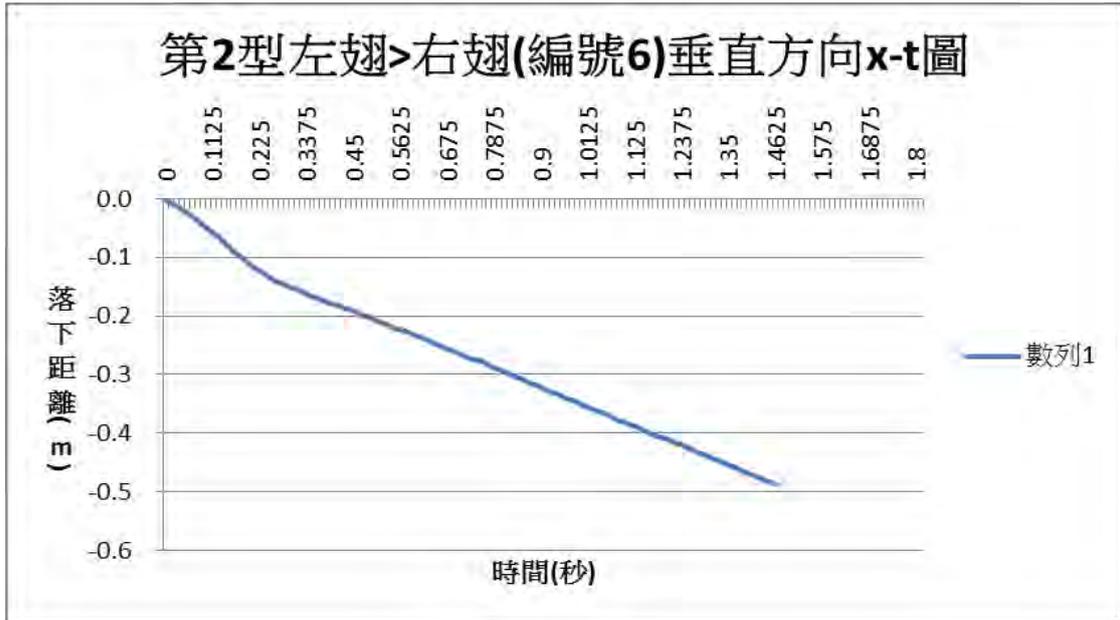


圖 12： 第二型(左翅>右翅)(編號 6)垂直方向 x-t 圖

第三型(右翅>左翅)(編號 89)，這個翅果左翅與右翅的長度差異最大，飛行時間最短，雖能轉動，但轉動的角度與其他翅果不同，其他類型翅果轉動時中翅以近似水平的角度轉動，而編號 89 轉動時則和鉛垂線保持一個較小的角度，因此飛行的模式較不同。垂直方向(x-t)關係圖(圖 13)可以發現，此翅果的緩飛效果不明顯，減速期不明顯，以逆時針的方式降落。

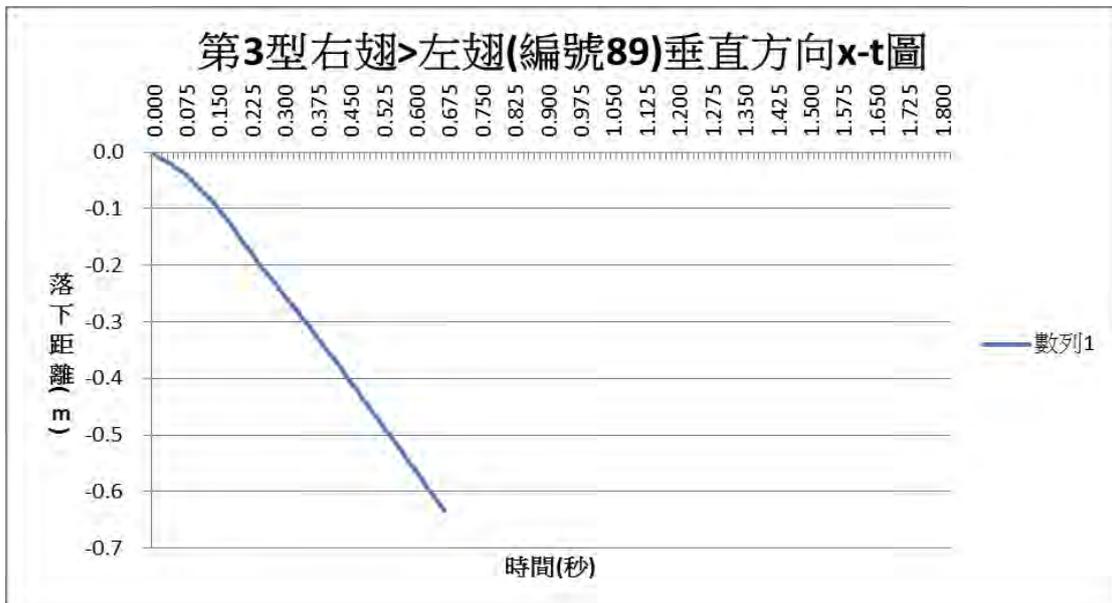


圖 13： 第三型(右翅>左翅)(編號 89)垂直方向 x-t 圖

第四型(三翅約等長)(編號 14)的垂直方向(x-t)關係圖(圖 14)可以發現， 0~0.02625 秒翅果快速落下，此時為自由落體期，此時期無明顯旋轉。減速期為 0.25~0.4875 秒，0.5 秒以後開始穩定，此段為緩飛期以逆時針的方式降落。

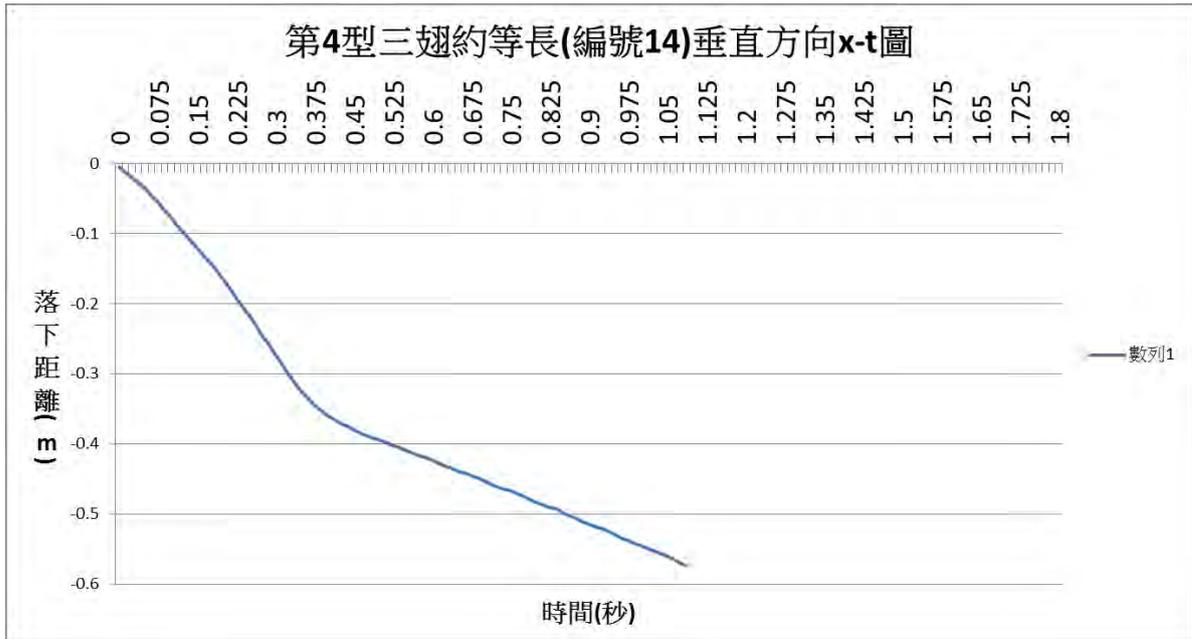


圖 14：第四型(三翅約等長)(編號 14)垂直方向 x-t 圖

另外我們使用了選擇了三個同屬於第一型的翅果(編號 51、20、38)與編號 137 進行飛行模式比較，結果發現垂直方向的位置時間關係，四個翅果的飛行模式相近(圖 15)，自由落體期約在 0~1625 秒，減速期約在 0.175~0.25 秒，緩飛期大概在 0.265 秒以後。

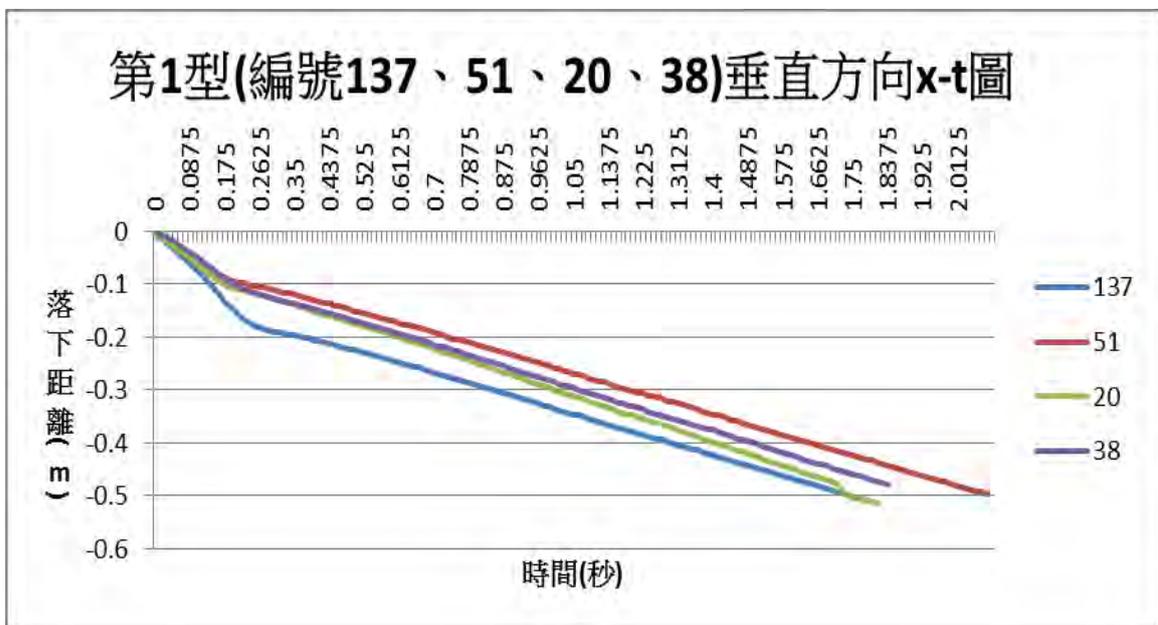


圖 15：第一型(編號 137、51、20、38) 垂直方向 x-t 圖

(二)垂直方向速度時間變化

第一型翅果(編號 137) 垂直方向速度時間關係圖(v-t) (圖 16)可以發現 0~0.1625 秒為自由落體期速率增加,平均速率約為 0.725m/s。減速期為 0.175~0.25 秒,平均速率為 0.571m/s。0.265 秒以後開始旋轉,此段為緩飛期,以順時針的方式降落,此時期速度變化不大,平均速率約為 0.216m/s,接近等速下降。

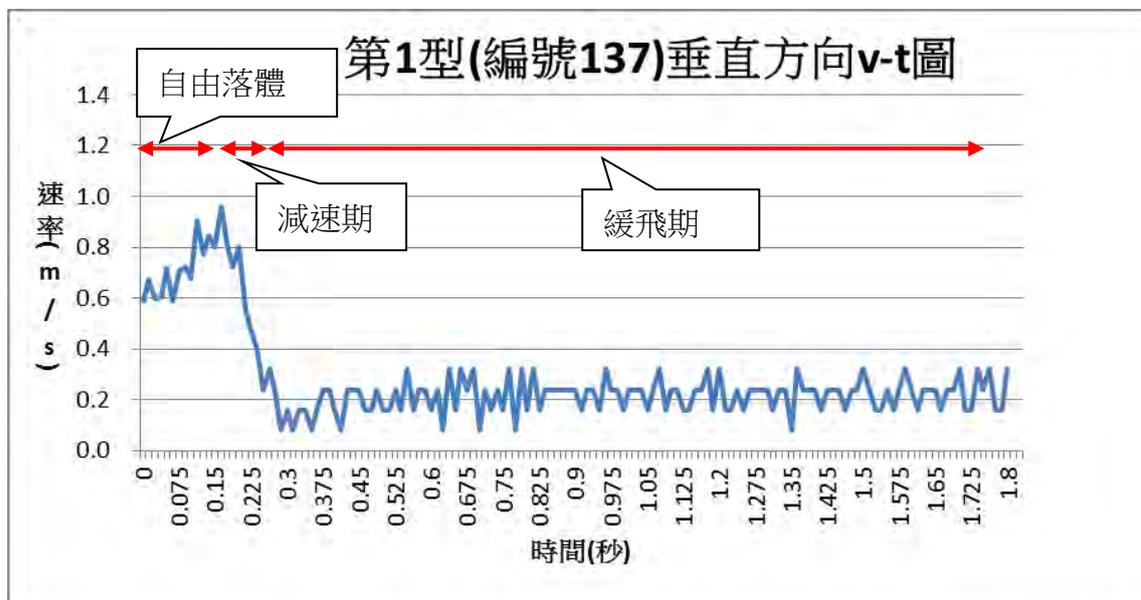


圖 16：第一型(編號 137)垂直方向 v-t 圖

第二型翅果(左翅>右翅)(編號 6)垂直方向速度時間關係圖(v-t) (圖 17)可以發現,由 0~ 0.125 秒翅果快速落下,此時為自由落體期,平均速率約為 0.521m/s。減速期為 0.1375~0.2625 秒,平均速率為 0.507m/s。0.275 秒以後穩定落下,以逆時針的方式降落,此段為緩飛期,速度變化不大,平均速率約為 0.287m/s,速度略高於第一型翅果,飛行時間略短。

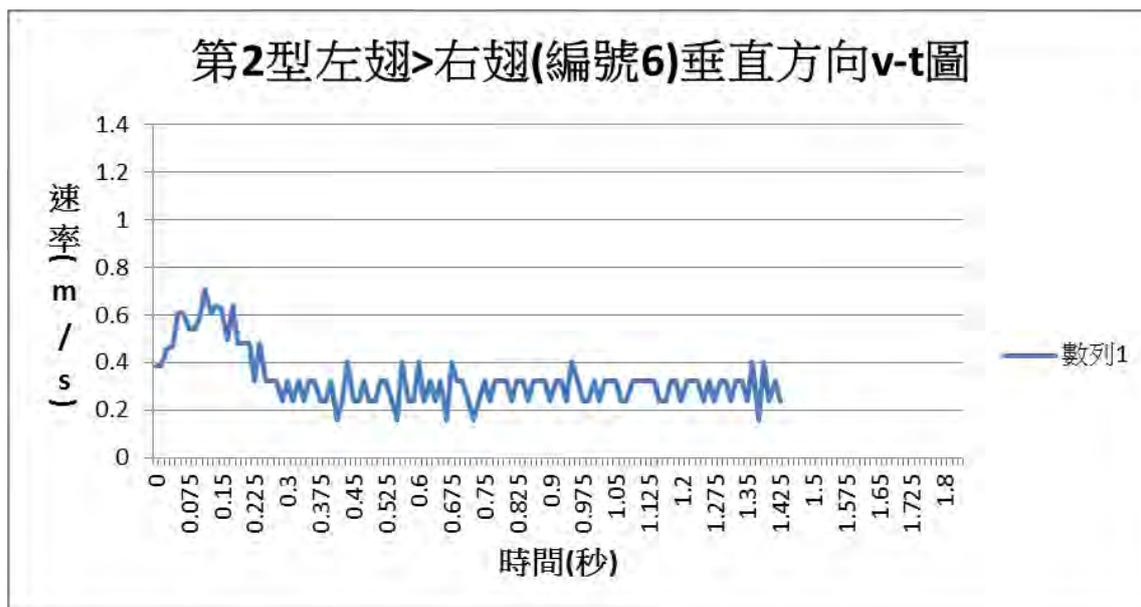


圖 17：第二型(左翅>右翅)(編號 6)垂直方向 v-t 圖

第三型(右翅>左翅)(編號 89)，這個翅果左翅與右翅的長度差異最大，飛行時間最短，雖能轉動，但轉動的方式與其他翅果不同。由其垂直方向(v-t)關係圖(圖 18)可以發現 0~0.125 秒翅果快速落下，此時為自由落體期，平均速率約為 0.632m/s。減速期為 0.138~0.150 秒，平均速率為 0.958m/s，未有明顯的減速效果。0.1625 秒以後開始旋轉，以逆時針的方式降落，此段為緩飛期，速度變化不大，平均速率約為 1.036m/s。相較於其他類型，此種翅果下降的速度最快，飛行時間最短，在此翅果的飛行，雖能藉由轉動將下落的速度穩定下來，但沒有顯著的減速效果。



圖 18：第 3 型右翅>左翅(編號 89)垂直方向 v-t 圖

第四型(三翅約等長)(編號 14)垂直方向(v-t)關係圖(圖 19)可以發現，由 0~0.2625 秒翅果快速落下，此時為自由落體期，平均速率約為 0.901m/s。減速期為 0.25~0.4875 秒，平均速率為 0.621m/s。0.5 秒以後開始旋轉，以逆時針的方式降落，此段為緩飛期，速度變化不大，平均速率約為 0.303m/s。相較於第一型與第二型翅果，此種翅果自由落體期較長，緩飛期下降的速度較快，飛行時間較短。



圖 19：第 4 型三翅約等長(編號 14)垂直方向 v-t 圖

另外使用了三顆與第一型相近的翅果進行飛行模式比較，分別是編號 38、51、20。由第一型四個翅果(編號 137、51、20、38)垂直方向 v-t 圖(圖 20)可知，當翅果類型相似時，飛行速率差異不大，自由落體期平均速率約在 0.596m/s，減速期速率平均約在 0.463m/s，緩飛期平均速率約在 0.232m/s。

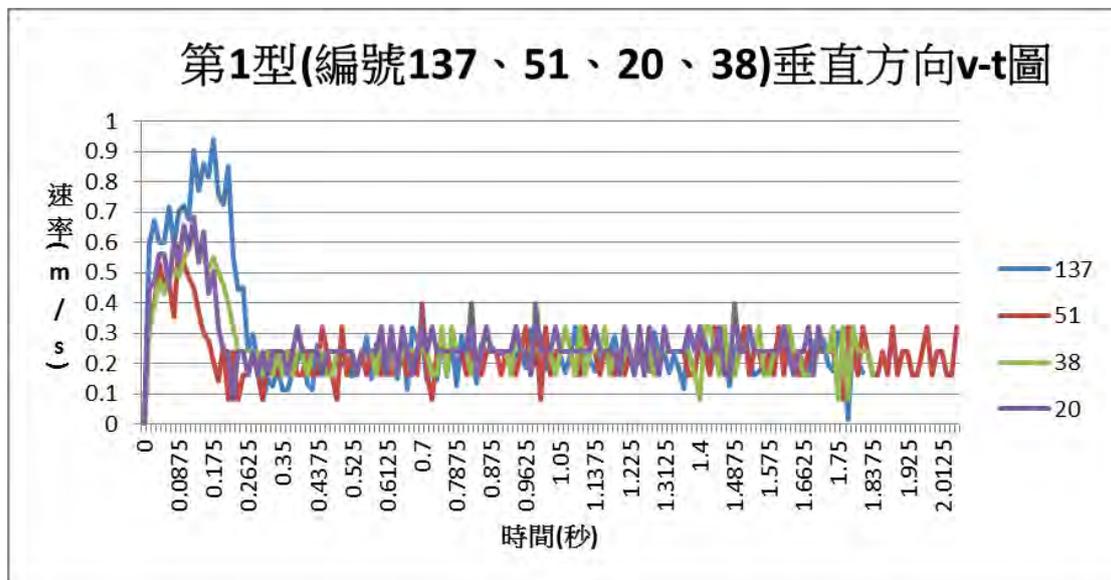


圖 20：第 1 型(編號 137、51、20、38)垂直方向 v-t 圖

由結果可知，同類型翅果飛行模式相近，若左翅與右翅不對稱或三翅長度相近時，會影響種子的飛行，造成自由落體期延長，緩飛期速度加快，飛行時間縮短的現象。

三、探討黃杞翅果在水平方向的飛行狀況

(一)水平方向角度與時間變化

相機由上往下(俯視)拍攝翅果的飛行時，可觀察翅果的轉動情形，第一型種子(編號 137) 水平方向 θ -t 圖(圖 21)可以發現，此飛行共轉動了 19 圈，大約每 0.1 秒轉一圈。

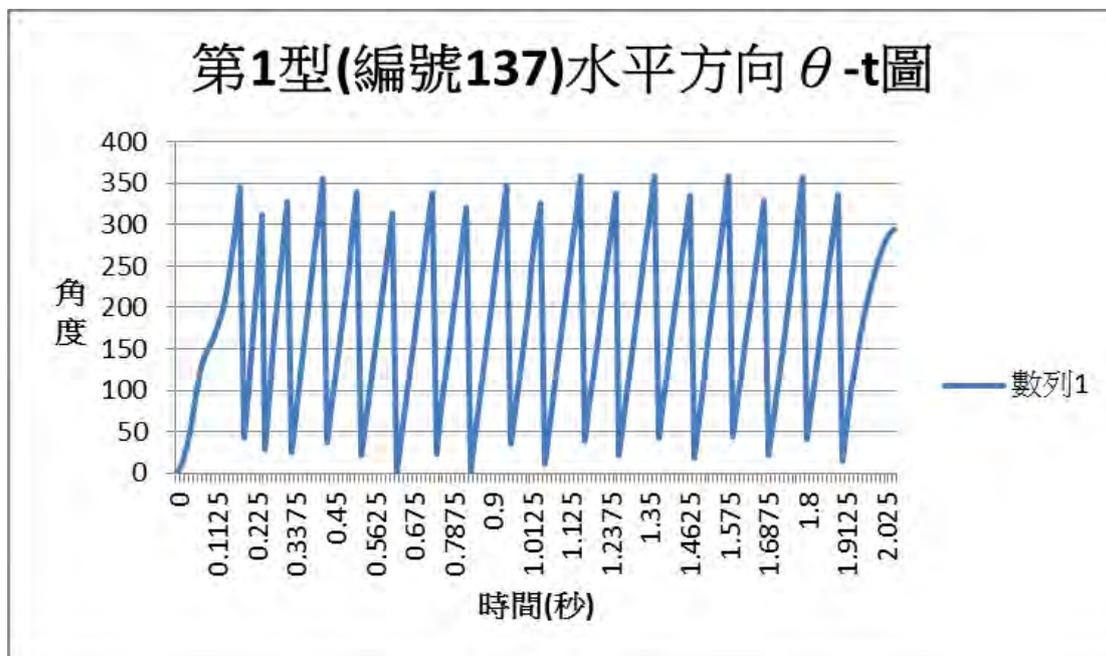


圖 21：第二型(左翅>右翅)(編號 6)水平方向 θ -t 圖

第二型(左翅>右翅)(編號 6)水平方向 θ -t 圖(圖 22)可以發現，此飛行共轉動了 16 圈，大約每 0.1 秒轉一圈。

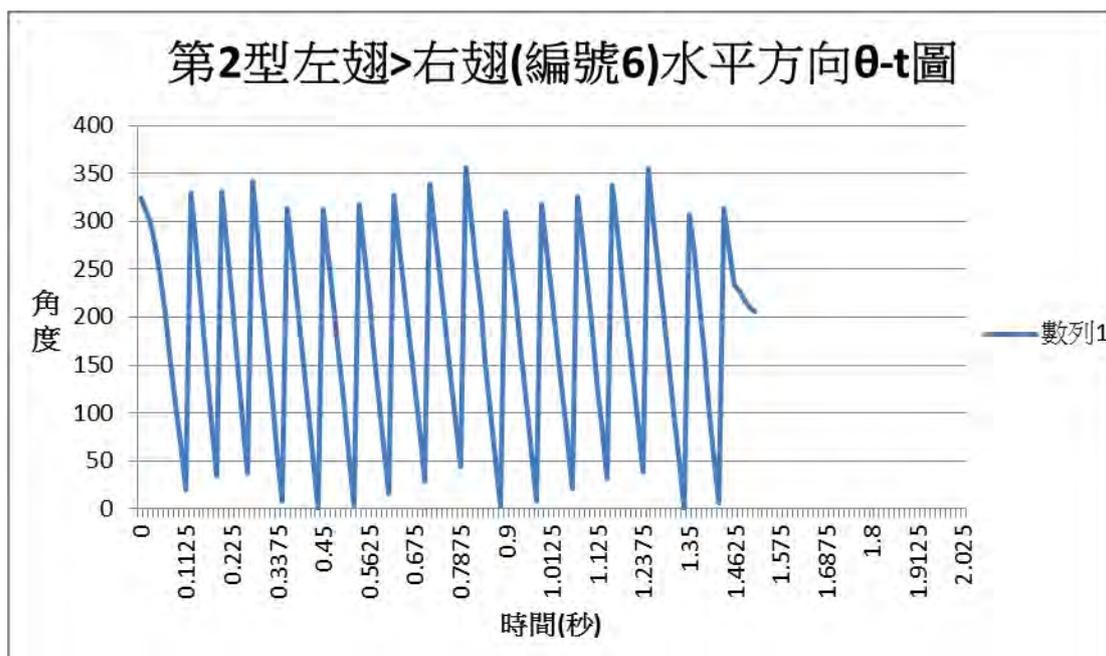


圖 22：第二型(左翅>右翅)(編號 6)水平方向 θ -t 圖

第三型(右翅>左翅)(編號 89)水平方向 θ -t 圖(圖 23)可以發現，此飛行共轉動了 9 圈，大約每 0.05 秒轉一圈。相較於其他類型翅果，此翅果的轉動周期較小，與其旋轉的半徑也較小有關。

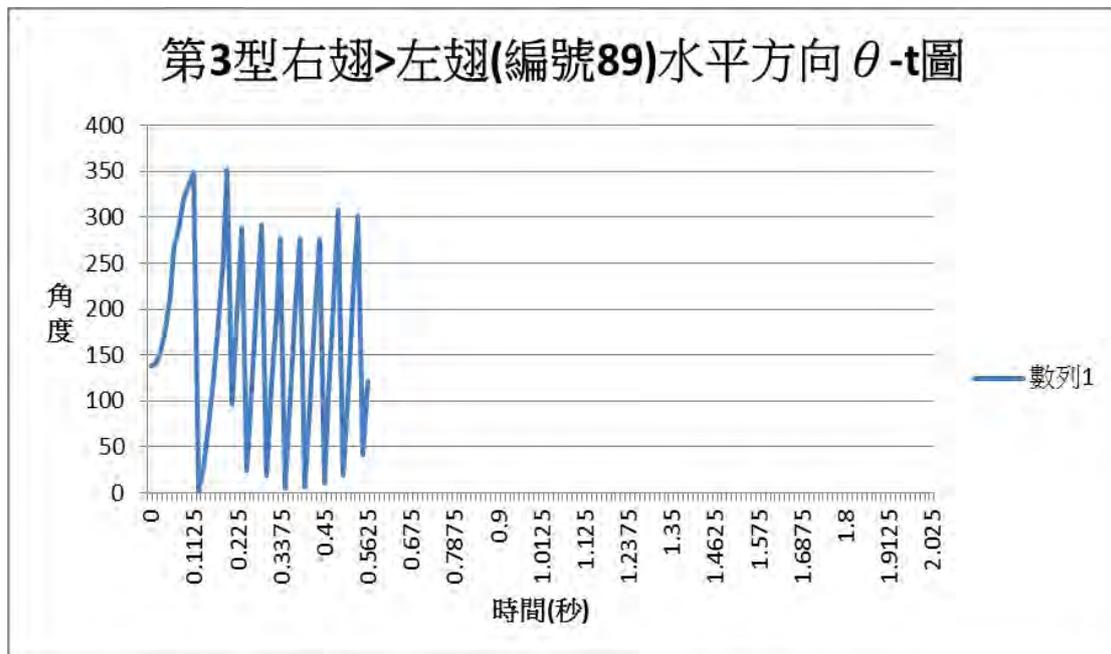


圖 23：第三型(右翅>左翅)(編號 89) 水平方向 θ -t 圖

第四型(三翅約等長)(編號 14)水平方向 θ -t 圖(圖 24)可以發現，此飛行共轉動了 14 圈，大約每 0.075 秒轉一圈。此類型翅果的飛行，旋轉周期小於第一型、第二型，大於第三型。

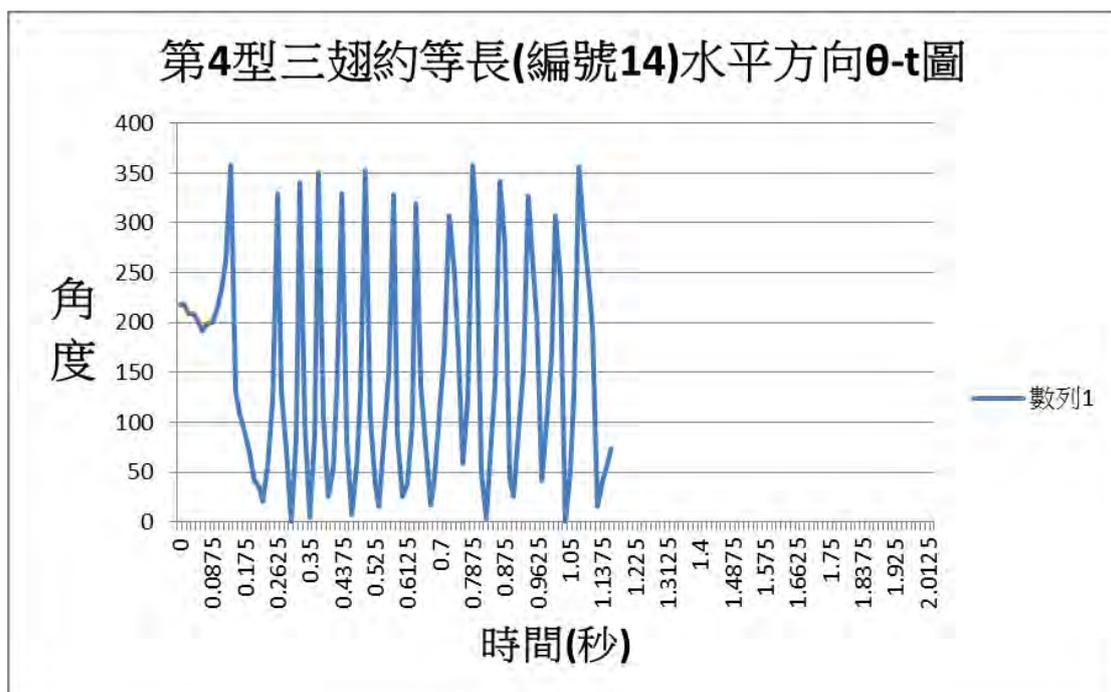


圖 24：第四型三翅約等長(編號 14)水平方向 θ -t 圖

另外使用了三顆與第一型相近的翅果進行飛行實驗，分別是編號 51(圖 26)、編號 38(圖 27)、編號 20 (圖 28)。當翅果類型相似時，轉動的周期相近，轉動週期大約為 0.1 秒。

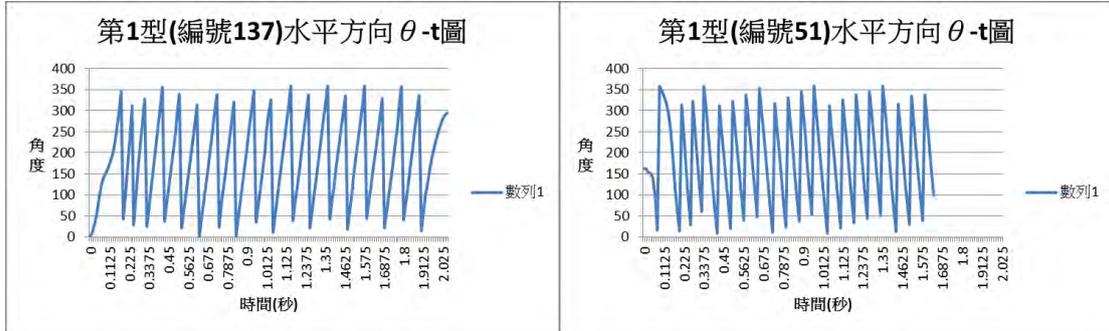


圖 25：第一型(編號 137) θ -t 圖

圖 26：第一型(編號 51) θ -t 圖

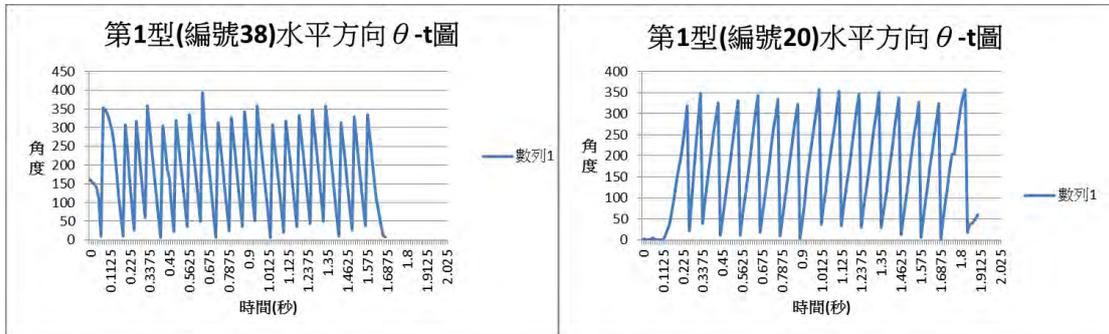


圖 27：第一型(編號 38) θ -t 圖

圖 28：第一型(編號 20) θ -t 圖

(二)水平方向角速度與時間變化

第一型種子(編號 137)角速度-時間(ω -t)關係圖(圖 29)可以發現，由 0 到 0.1625 秒翅果快速落下，此時為自由落體期角速度從 15.77 rps 升到 106.62rps，其平均角速度為 60.65 rps；0.175~0.325 秒為減速期，此時角速度從 106.62rps 降到 67.55 rps，其平均角速度為 74.27rps；從 0.325 秒後為緩飛期，平均角速度為 59.44 rps，維持穩定轉動。



圖 29：第一型(編號 137)水平方向 ω -t 圖

第二型(左翅>右翅)(編號 6)角速度-時間(ω -t)關係圖(圖 30)可以發現，0~0.125 秒的角速度從 34.33 rps 升到 89.32rps，其平均角速度為 64.75rps；0.1375~0.3125 秒為減速期，角速度從 83.46rps 降到 70.90 rps，其平均角速度為 79.31rps；從 0.325 秒後為緩飛期，平均角速度為 69.84 rps。

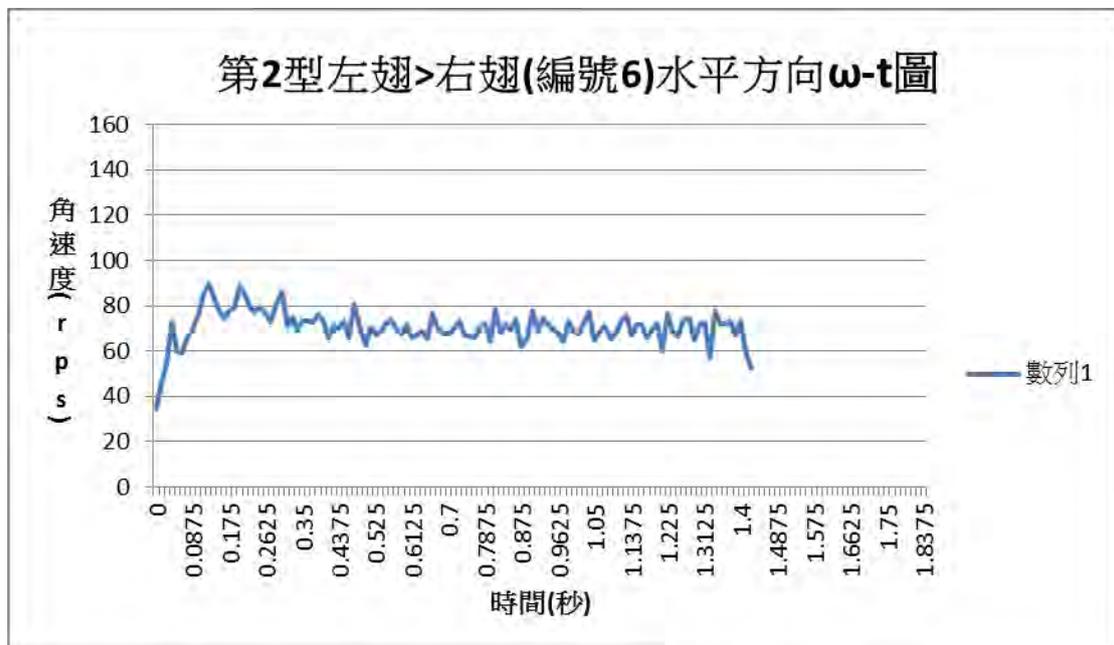


圖 30：第二型(左翅>右翅)(編號 6)水平方向 ω -t 圖

第三型(右翅>左翅)(編號 89)角速度-時間(ω -t)關係圖(圖 31)可以發現 0~0.2 秒的角速度從 0 rps 升到 145.01 其平均角速度為 55.68rps。0.2125~0.275 秒為減速

期，此時角速度從 135.38rps 降到 113.74rps，其平均角速度為 129.19rps；從 0.2875 秒後，其平均角速度為 126.65rps，雖略有下降，但並不明顯，飛行狀況也不穩定，而使得緩飛效果不佳，翅果快速落地。



圖 31：第三型(右翅>左翅)(編號 89)水平方向 ω -t 圖

第四型(三翅約等長)(編號 14)角速度-時間(ω -t)關係圖(圖 32)可以發現 0~0.125 秒的角速度從 0 rps 升到 133.84r 其平均角速度為 28.58rps。0.1375~0.1625 秒為減速期，此時角速度從 133.84rps 降到 23.3 rps，其平均角速度為 64.9rps；從 0.2125 秒後為緩飛期，其平均角速度為 79.94 rps。



圖 32：第四型(三翅約等長)(編號 14)水平方向 ω -t 圖

我們另外使用了三顆(編號 38、51、20)與第一型(編號 137)相近的翅果進行飛行實驗比較，由(圖 33)可知，當翅果類型相似時，飛行模式相近，自由落體期平均角速度約在 59.82rps，減速期平均角速度平均約在 75.50rps，緩飛期平均角速度約在 61.65rps。

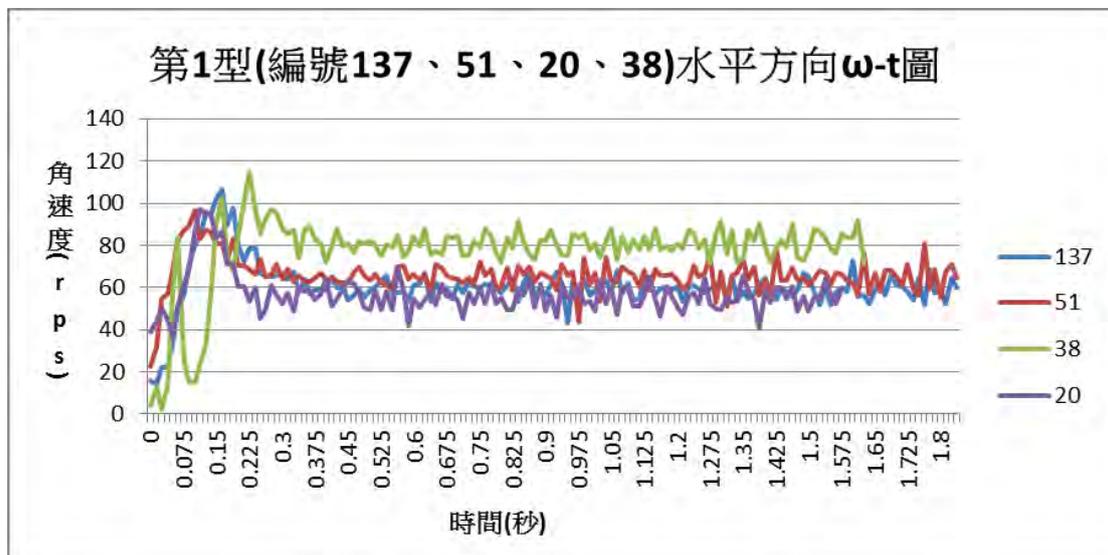


圖 33：第一型(編號 137、51、20、38)水平方向 ω -t 圖

四、分析黃杞翅果散布距離

由(圖 34)可知第一型翅果在 150cm 處翻落平均飄移了 11.10cm，200cm 處翻落約飄移了 11.74cm，250cm 處翻落約飄移了 11.48 c m。而其他類型翅果的飄移距離也和第一型相似，由此可推測，黃杞翅果的水平飄移距離不大，即使高度增加也沒有明顯差距。

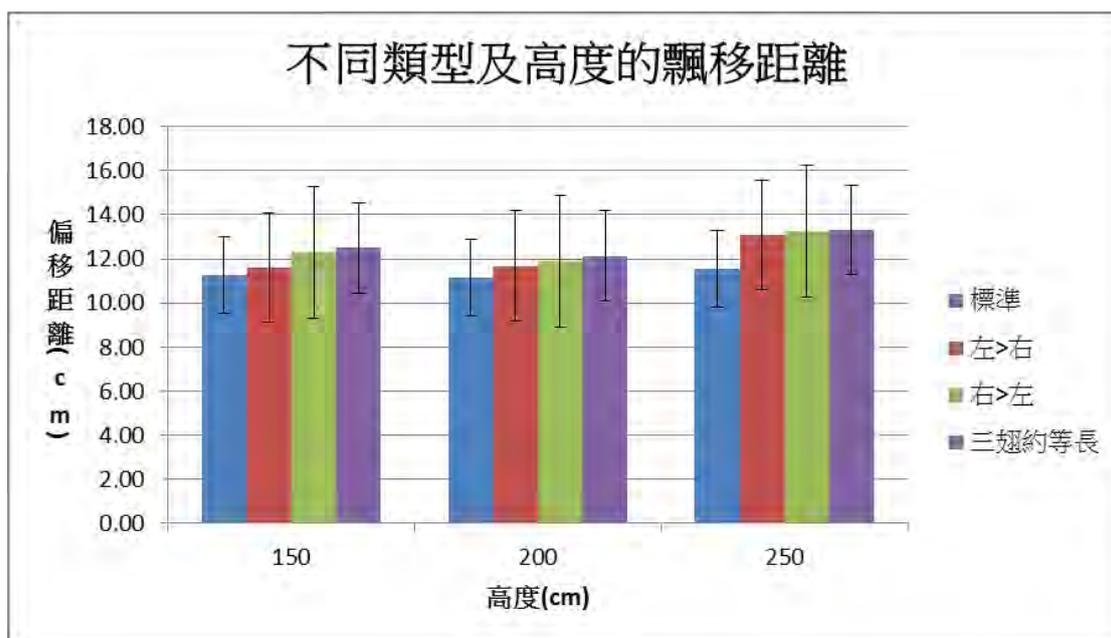


圖 34：不同類型及高度的飄移距離

陸、討論

黃杞翅果在落下的過程中，會有轉動並穩定落下的現象。我們將其翅果依據左、中、右翅翼的長度比例，將之分為四類(表一)，並探討這四類翅果的飛行模式有何差異。我們發現這四類翅果中以第一型(標準型)所佔的比例最高(圖 8)，翅果雖有大小的差異，但只要左、右翅翼對稱，就很容易產生穩定的轉動，較快將落下的速度減緩，以接近等速的狀態下降，以延長其滯空的時間(圖 11、圖 16、圖 28、圖 20、圖 32)。而當左、右翅不對稱時，轉動的角速度較大，落下的速度較快，滯空時間較短如第二型翅果(圖 12、圖 17、圖 30)，有時甚至出現飛行不穩，如第三型翅果，雖可轉動但轉動半徑小，且角速度大，並未產生明顯的減速效果，以致落下速度大且滯空時間最短(圖 13、圖 18、圖 31)。若三翅近乎等長時(第四型)並沒有更佳的緩飛效果，反而不易達到平衡，飄移距離最大(圖 14、圖 19、圖 32)。種子的散播對植物的生存極具意義，若在種子散播的過程中，滯空的時間越長，能散播的距離就能越遠，且緩飛期的速度如果越小，更能保護種子落地時少受傷害。

黃杞翅果能藉由轉動達到緩速的效果，其原理與螺旋槳相似。如在開車時，若把手伸出車窗外，把手掌張開且向上傾斜時，手臂將感受到有往後和往上移動的力，而且當手掌傾斜的角度大越大時力量越大，但當手掌傾角大於某一角度時，往上移動的力量會急速地消失。此種現象可能的原因是當一物體相對於空氣有前進的速度時，空氣作用於此物體上的力量可分為兩個分量：一為垂直於物體方向的分量，另一為平行物體方向的分量，前者為升力而後者則為阻力。而手掌的仰角大於某一特定的角度時，升力會快速的隨著仰角的增加而下降，且阻力會上升，而此一特定的角度可能會隨著物體形狀的不同改變。而黃杞翅翼切面也有類似現象，當翅翼切面相對於空氣移動時，其升力及阻力的大小與物體的壓力有關，空氣一開始很平順的流過翼切面的表面，當速度或角度逐漸增加，氣流開始與翼切面的上表面分開，當翅翼下方的氣體作用在翅翼切面上的壓力較上方的氣體所作用的壓力為高，由於壓力的作用，旋翼切面產生一沿著氣流方向的力量即為阻力，且同時有一垂直於流體方向的力量即為升力。

從高處釋放翅果的瞬間，翅翼會受到空氣的阻力，阻力最主要來自翅翼面與空氣產生摩擦產生的空氣阻力，此種狀態下翅翼上阻力合力與翅果質心軸平行，三個翅翼阻力及重力形成共平面，且對質心軸無力矩，此時並不會旋轉(圖 35-A)，只會墜落。在掉落期間若發生傾斜，作用在翅翼上的阻力合力的大小和方向均會發生變化，阻力的合力垂直於翼面向上，此時可分為兩個分量，一為垂直於物體方向的分量，是為升力，另一為平行物體方向的分量，則為側向力，當翻轉的角度大於某一特定的角度時，阻力會快速上升，而開始旋轉，升力也會的隨著上升，此時翅翼上的阻力合力會向翅果的中心軸線方向偏轉，翅翼上

阻力合力與翅果質心軸有一夾角，而且阻力合力作用線與質心軸不共面。若將阻力分別沿著垂直和水平方向分解，可看出翅翼上的阻力會對質心軸產生力矩，使翅果轉動起來(圖 35-B)。

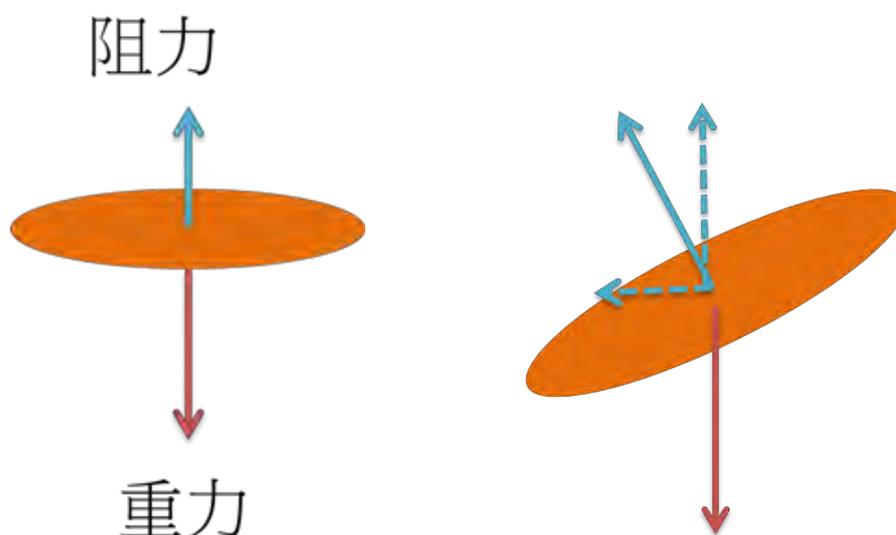


圖 35：翅翼受力示意圖(A)落下瞬間 (B)掉落期間開始旋轉時受力狀態

在旋轉狀態下，翅翼面就像是一平板機翼，在旋轉過程中會產生慣性力和空氣動力，空氣動力會使翅翼面傾斜，外端部上翹，慣性力矩和重力力矩會對抗空氣動力力矩的作用，抵銷了上翹趨勢。此動態過程中，可以將空氣動力力矩看作干擾力矩，而慣性力矩和重力力矩則是恢復力矩的角色。空氣動力力矩使翼面上翹的過程，同時也是慣性力矩增長的過程，但此時重力力矩會有所減小，三種力矩中，重力力矩的作用相對較小，空氣動力力矩和慣性力矩作為主導作用。當三種力矩達到平衡時，翼面傾角能保持穩定，此時黃杞翅果就會穩定旋轉降落(圖 36)。我們推論，當重力與上升阻力相同時，翅果會以終端速度(等速)下降，所以當重力大於下墜的阻力，會使下墜的相對風速增加，且提高了自轉的角動量，當角速度變大時，風阻面積也會變大，則流體的截面積會變小，因此通過翅果翼面的氣體流速會增加，增加氣流壓力差，使升力上升，降低下墜的速度。

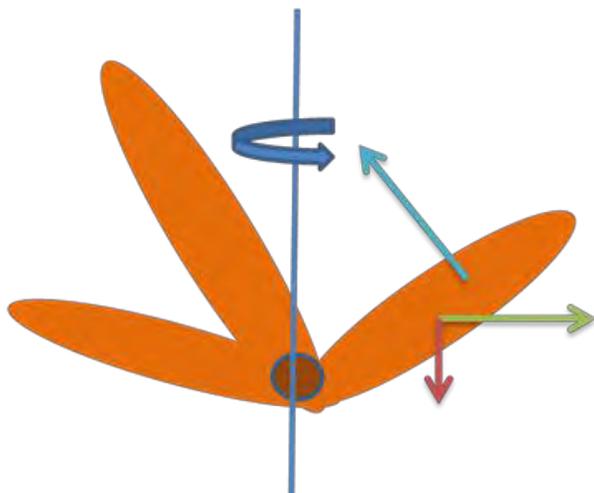


圖 36：旋轉狀態翼片受力

氣流與翅翼面的夾角稱為迎角，翅翼面的迎角由翅果下墜速度和繞中心軸轉動的角速度共同決定。氣流吹向翼片下表面時，迎角為正，能夠產生向上的升力分量，此分量能對抗部分重力，使黃杞翅果向下的加速度降低，進而延長下墜時間，當力矩達到平衡時，翅果將停止加速，以一個比較穩定的角速度旋轉(圖 37)。我們透過風洞煙的擾動觀察(圖 38)，發現當黃杞翅果轉動時，會在翅翼的上方出現擾動，顯示有氣流的改變。

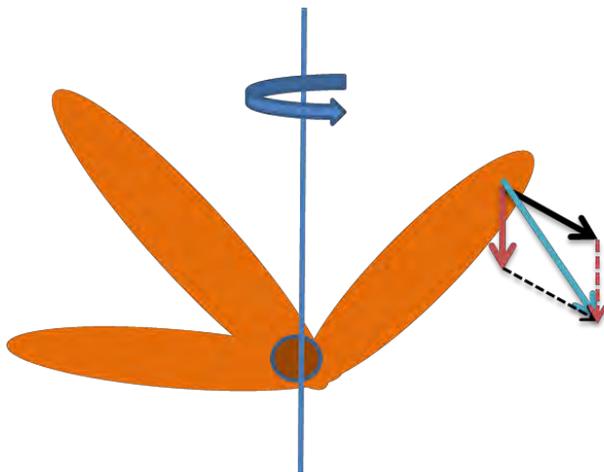


圖 37：旋轉時翼片速度向量關係時



圖 38：翅果落下時對煙的擾動情形

從能量守恆的角度同樣能解釋為何旋轉的翅果下墜時間較長。若忽略熱能等變化的影響，翅果下墜的過程就是翅果本身的位能向自身動能以及空氣動能轉化的過程。若翅果不轉動，其對空氣的擾動也會較小，空氣的動能則可以忽略不計，翅果的位能若全部轉化為自身下墜時的動能，轉動速度會增加，下墜的動能就會變小。翅果的動能由兩部分組成，分別為隨質心下墜的動能和繞質心軸轉動的動能，轉動越快，轉動動能以及對空氣的擾動(與迎角有關)也會越強，因轉動而傳遞給空氣的能量也會越多。總能量是守恆的，轉動動能和空氣的動能所占比例增高，下墜的動能所占比例必然減小，表現為下墜時的速度就會較小，下墜時間就會更長。

由實驗發現，黃杞翅果飛行的模式，可分成三個時期，第一階段為自由落體期，翅果先自由落下，翅果在下落的過程中，翻轉後開始轉動，轉動速率增加，能產生向上的升力，與重力對抗，而產生減速的現象，進入減速期，當升力、阻力漸達到平衡，使翅果等速落下。第一型種子飛行的模式最穩定，減速效果最佳，滯空時間最長，而第二型、第三型左右翅不平均，造成減速效果較差，飛行時間較短的現象，而第四型翅果三翅翼等長，但因三翅在同一側，反而造成重心不易平衡的現象，飄移距離較大(圖 39、圖 40)。我們將四型翅果的飛行資料整理成表二，發現當翅果若能在較短的時間達到穩定平衡使轉動的角速度穩定下降，緩飛期的速度減小，有延長翅果滯空時間的效果。

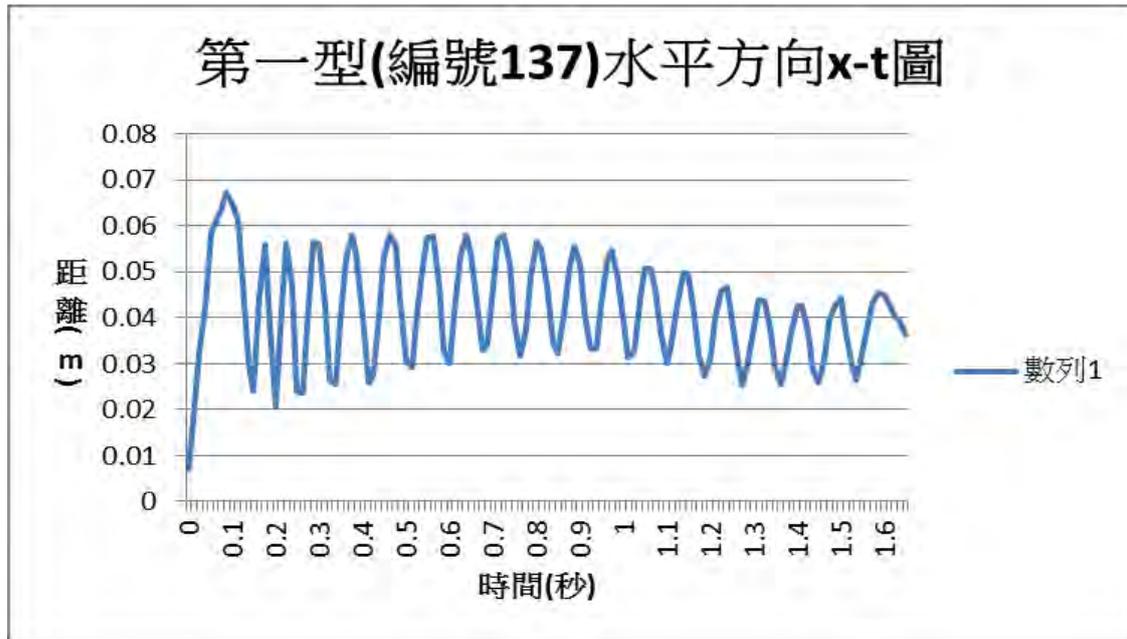


圖 39：第一型旋轉軌跡圖



圖 40：第四型旋轉軌跡圖

表二、四型翅果在自由落體期、減速期、緩飛期的速率、角速度比較

翅果類型		自由落體期	減速期	緩飛期
第一型	平均速率 m/s	0.596	0.463	0.232
	平均角速度 rps	60.65	74.27	59.44
第二型	速率 m/s	0.521	0.507	0.287
	角速度 rps	64.75	79.31	69.84
第三型	速率 m/s	0.632	0.958	1.036
	角速度 rps	55.68	129.19	126.65

第四型	速率 m/s	0.901	0.621	0.303
	角速度 rps	28.58	64.9	79.94

我們將黃杞翅果的飛行模式與槭樹(朱等，2017)及大葉桃花心木(蔡等，2011)進行比較(表三)，發現黃杞翅果飛行時在緩飛期的角速度都較其他兩種翅果大，使得其下落速度比另兩種翅果小，所以滯空時間較其他兩種翅果長。

表三、三種不同翅果比較

種類	黃杞	槭樹	大葉桃花心木
外觀	三翅	單翅果	單翅
角速度(rps)	69.84	29.29±3.76	8.06
緩飛期速率 (m/s)	0.216	0.44	0.58
飄移距離(cm) (150cm 處落下)	11.1	13	17.4
飛行模式	旋轉	直落旋轉+公轉	旋轉

由以上可知黃杞翅果三翅的比例，與左右翅的差異，會對其飛行模式產生影響。從不同高度翅果落下的飄移距離分析，可發現若在無風的條件下，黃杞種子散播的距離並不大。而黃杞翅果的種子重量約為翅翼的 1.75 倍(圖 10)，我們想知道若將翅果的重量增加時，翅翼是否仍能穩定旋轉降落?於是我們將翅果與種子分開，秤量種子的重量，並以黏土取代種子進行飛行測試，結果發現翅翼最重能承受種子 6 倍重量仍可旋轉降落(圖 41)，也就是翅翼的載重量最大可達翅翼本身重量的 10 倍。所以，我們可將黃杞翅果的緩降落特性，運用在開發新型降落傘、人類飛行器、空投物資載具，或大樓救災使用，同時注意飛行器的翅翼構造、材質和翅翼的比例等變因，或許能為人類的生活帶來些助益。

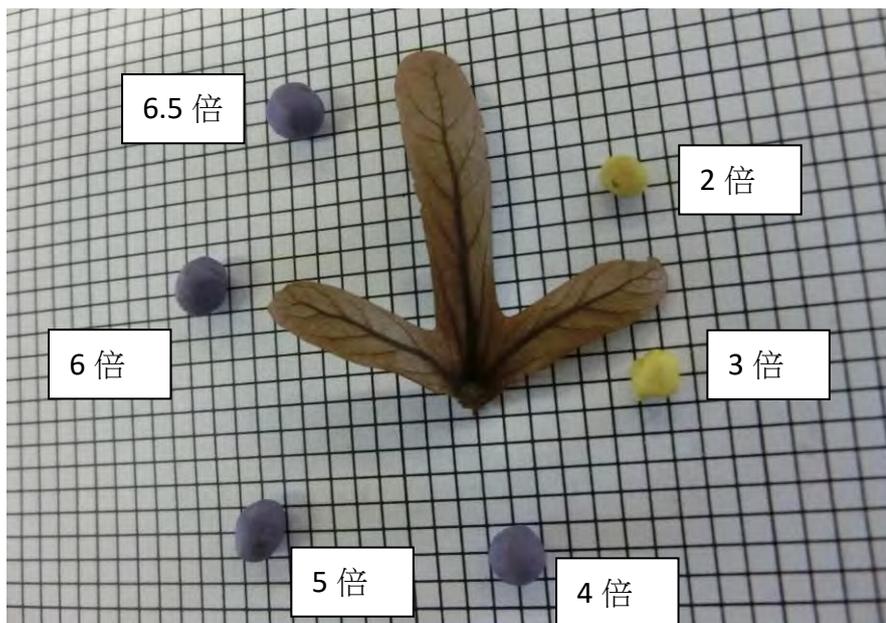


圖 41:黃杞翅果負載不同倍數的種子重量

柒、結論

- 一、我們測量 200 片種子，依據左翅/中翅、右翅/中翅、右翅/左翅的比值分成四種型態。
- 二、翅果垂直方向的運動模式，將其分為自由落體期、減速期和緩飛期。翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度。
- 三、第一型(標準型)翅果在緩飛期飛行的速率較小，可延長滯空時間；第二型、第三型、第四型在緩飛期速率較大，會減少滯空時間。
- 四、翅果水平方向的運動模式，會產生週期性旋轉，角速度會先增加，接著下降，之後維持一個穩定的轉速。
- 五、第一型飛行模式較相近，速率及角速度緩飛期時變化大；第二型、第三型、第四型角速度變化不穩定，震盪較大。
- 六、黃杞翅果從不同高度落下時，飄移距離不大。

捌、參考文獻

- 一、朱家慧、賴彥臻。2017。槭動心旋－槭樹翅果飛行模式之研究第 57 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、物理基礎觀念(上) 張鎮麟 林樹人編著
- 六、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
- 七、黃杞介紹 <https://baike.baidu.com/item/%E9%BB%84%E6%9D%9E/8279801>
- 八、三小時讀通牛頓力學 小峯龍男著

【評語】 030104

常見的題材但取材具新意，研究架構完整、實驗數據豐碩、參考前人作品有所擴充精進，惟研究結果未能進一步解釋或分析研究，圖表呈現略有瑕疵。

以身邊家園之植物，既有之研究方法進行探究能力之鍛鍊，以期創新研究之發展，值得鄉土教材獎之鼓勵。

摘要

黃杞翅果依左翅、中翅、右翅的比例分為四型。垂直方向的飛行模式可分為自由落體期，減速期和緩飛期，翅果先快速落下，接著翻轉減速並開始轉動，轉動後以接近等速的狀態落下。水平方向的飛行模式則以種子為中心轉動，翅果的角速度先增加，再減速下降，進入穩定狀態，以接近等角速度轉動。不同類型的翅果飛行模式略有差異，第一型(標準型)的翅果，飛行模式最為穩定，落下的速度小且飛行時間長，緩飛的效果最好。第二、三型左右翅長差異大，則飛行不穩，落下速度大而飛行時間短，第四型三翅近等長，最易轉動但飛行模式也較不穩定，落下速度比第一型大而飛行時間短。黃杞翅果的飄移距離小，並可承載6倍種子的重量，可作為空投飛行器的參考。

壹、研究動機

有次和家人到蓮華池踏青時，看到天上掉落下了一片片像直升機般降落的翅果，仔細觀察它飛行時的細節，發現它是以旋轉的方式降落，覺得很有趣，於是我們向老師提出想做這方面研究的想法，剛開始我們只是將翅果隨手丟，讓它降落，發現不是每一次都會成功，而成功的翅果幾乎都沿著一條直線降落。這使我們更加好奇他的飛行結構，看看到底為甚麼他飛行時幾乎是垂直降落?如果在不同高度的地方飛行，是否會受影響?帶著滿滿好奇的我們就開始了以下的研究。

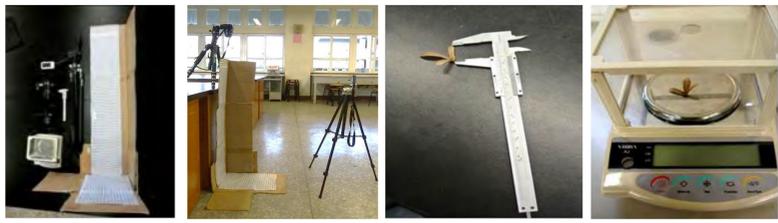
貳、研究目的

- 一、分析黃杞翅果各結構型態分類
- 二、探討黃杞翅果在垂直方向的飛行狀況
- 三、探討黃杞翅果在水平方向的飛行狀況
- 四、分析黃杞翅果散布距離

參、研究設備及器材

一、研究設備及器材

黃杞翅果、電子天秤(Sartorius BSA224S-CW)、游標尺、夾鏈袋、乾燥箱、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(Measure)、雷射筆、計時器、梯子

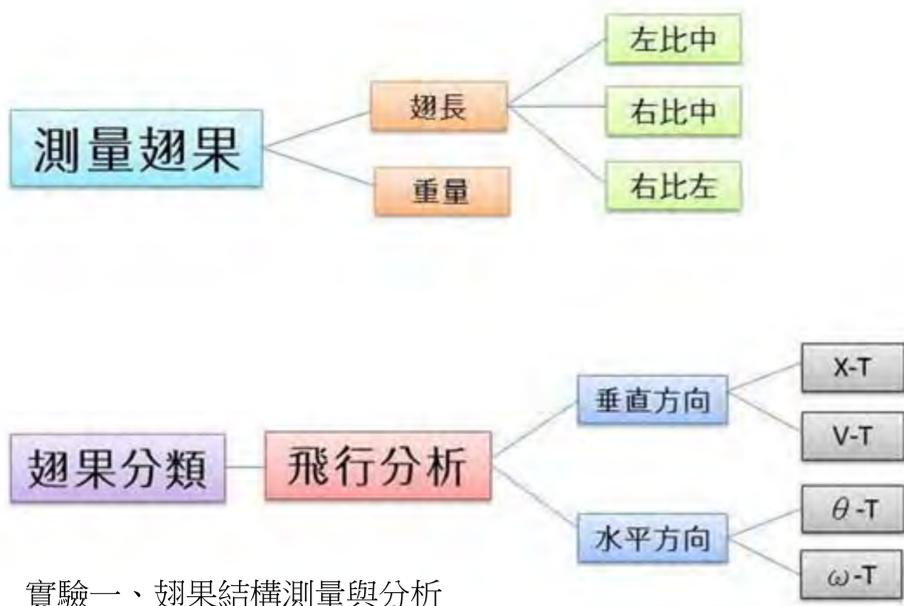


二、黃杞翅果介紹

黃杞為胡桃科黃杞屬,臺灣全島低至中海拔約 200~1,500 公尺處之闊葉林內。全緣或偶有鋸齒，漸尖頭。小堅果球形，具 3 裂之膜質苞(翅)。黃杞的翅果具有三裂片的黃色膜質苞，其功能如同翅果一般，全株具毒性



肆、研究過程與方法

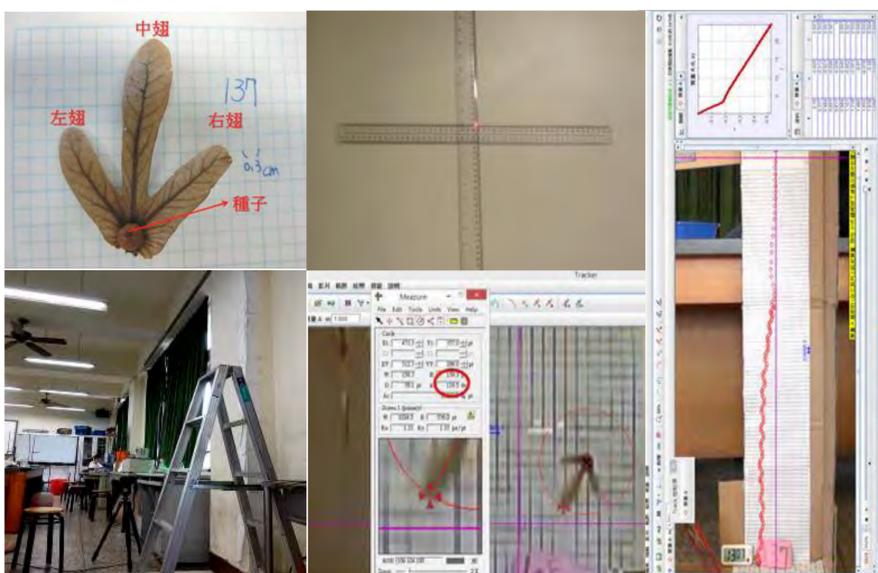


實驗一、翅果結構測量與分析

實驗二、飛行軌跡垂直追蹤分析

實驗三、飛行軌跡水平追蹤分析

實驗四、分析黃杞翅果散布距離



伍、研究結果

一、分析黃杞翅果各結構型態分類

(一)翅果長度測量

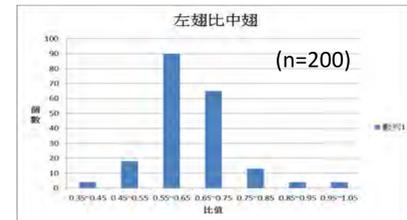


圖1:左翅/中翅比值數量統計

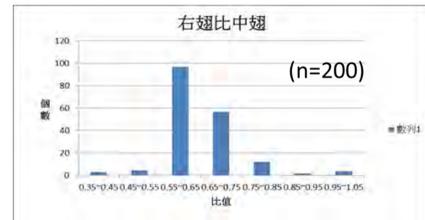


圖2:右翅/中翅比值數量統計

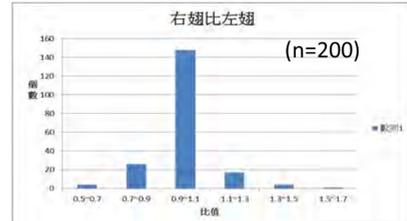


圖3:右翅/左翅比值數量統計

左翅/中翅值約在0.55~0.75cm
右翅/中翅值約在0.55~0.75cm
右翅/左翅值約在0.9~1.1cm

表一、翅果分型依據

類型	編號	照片	比值	敘述
一	137		右翅/中翅=0.61	右：2.12cm
			左翅/中翅=0.60	中：3.46cm
			右翅/左翅=1.00	左：2.11cm
二	38		右翅/中翅=0.67	右：2.13cm
			左翅/中翅=0.60	中：3.17cm
			右翅/左翅=1.13	左：1.89cm
三	51		右翅/中翅=0.61	右：1.82cm
			左翅/中翅=0.54	中：3.00cm
			右翅/左翅=1.12	左：1.63cm
四	20		右翅/中翅=0.54	右：1.86cm
			左翅/中翅=0.47	中：3.43cm
			右翅/左翅=1.16	左：1.61cm
二	6		右翅/中翅=0.36	右：1.19cm
			左翅/中翅=0.73	中：3.29cm
			右翅/左翅=0.50	左：2.40cm
				左翅比右翅長
三	89		右翅/中翅=0.83	左：0.97cm
			左翅/中翅=0.43	中：2.23cm
			右翅/左翅=1.91	右：1.86cm
				右翅比左翅長
四	14		右翅/中翅=0.84	左：2.14cm
			左翅/中翅=0.83	中：2.56cm
			右翅/左翅=1.01	右：2.12cm
				三翅約等長

各型態翅果分布比例圖

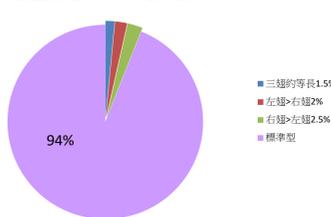


圖4:各型態翅果分布比例圖 (n=200)

(二)翅果重量測量

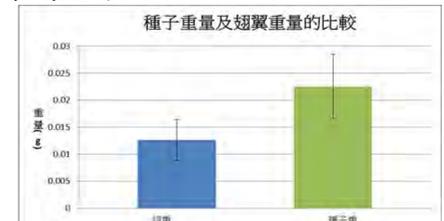


圖5:黃杞翅果種子重量及翅翼重量的比較(n=20)

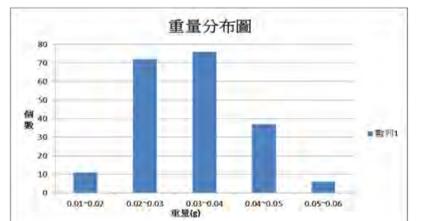


圖6:黃杞翅果總重量的比較(n=20)

翅翼重量平均值約在0.0126g，種子重量平均值約在0.0225g，可知翅果重量大多集中在種子，且種子重量約是翅翼重量的1.785倍

二、探討黃杞翅果在垂直方向的飛行狀況

(一)垂直方向位置時間變化

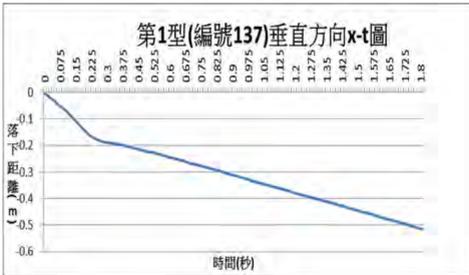


圖7:第一型(編號137) x-t圖

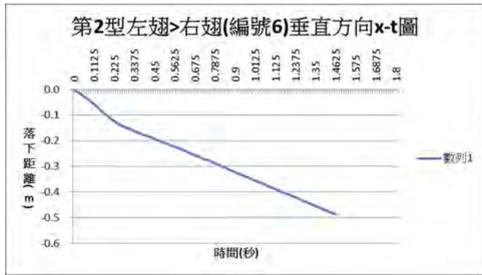


圖8:第二型(編號6) x-t圖

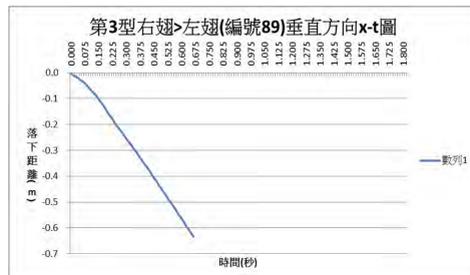


圖9:第三型(編號89) x-t圖

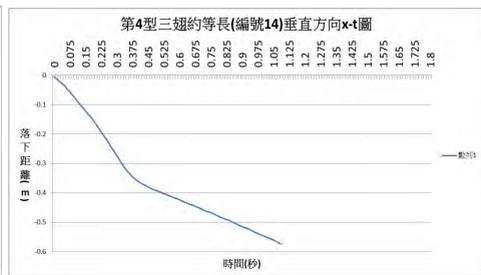


圖10:第四型(編號14) x-t圖

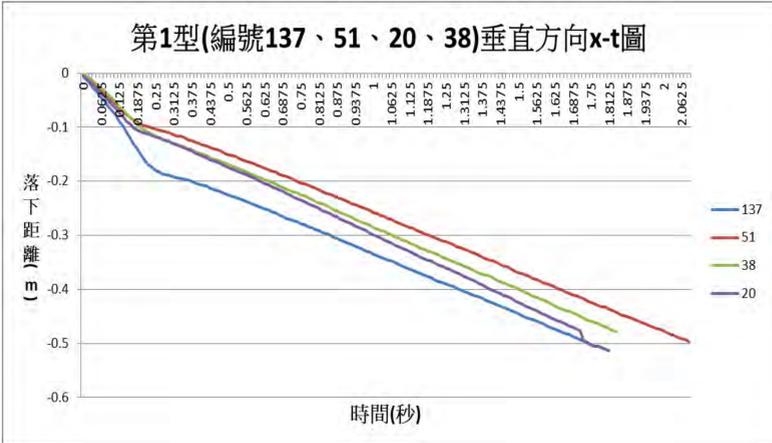


圖11:第一型(編號137、51、20、38)x-t圖

表二、各型翅果飛行模式時期比較

類型	時期	自由落體期	減速期	緩飛期
第一型		0~0.1625秒	0.175~0.25秒	0.265秒以後
第二型		0~0.125秒	0.1375~0.2625秒	0.275秒以後
第三型		無法判斷		
第四型		0~0.2625秒	0.275~0.4875秒	0.5秒以後

四個翅果的飛行模式相近(圖11)，自由落體期約在0~0.1625秒，減速期約在0.1750~0.2500秒，緩飛期大概在0.2650秒以後。

(二)垂直方向速度時間變化

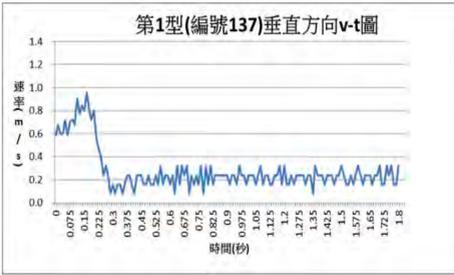


圖12:第一型(編號137) v-t圖



圖13:第二型(編號6) v-t圖



圖14:第三型(編號89) v-t圖

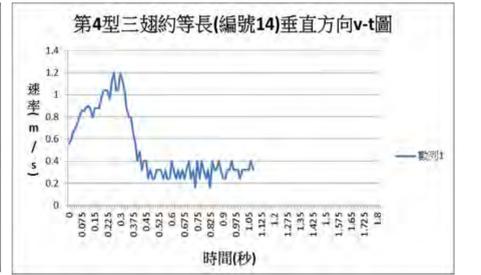


圖15:第四型(編號14) v-t圖

表三、各型翅果飛行模式 v-t 比較

類型	時期	自由落體期	減速期	緩飛期
第一型(平均速率m/s)		0.596	0.463	0.232
第二型(平均速率m/s)		0.521	0.507	0.287
第三型(平均速率m/s)		0.632	0.958	1.036
第四型(平均速率m/s)		0.901	0.621	0.303

由結果可知，同類型翅果飛行模式相近，若左翅與右翅不對稱或三翅長度相近時，會影響種子的飛行，造成自由落體期延長，緩飛期速度加快，飛行時間縮短的現象。

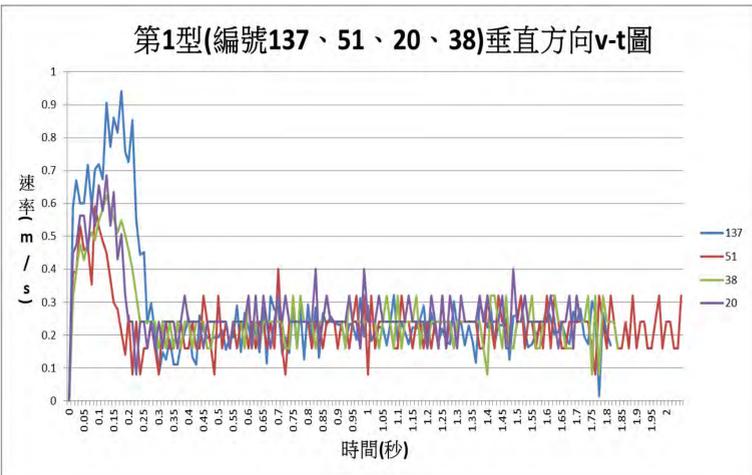


圖16:第一型(編號137、51、20、38) v-t圖

三、探討黃杞翅果在水平方向的飛行狀況

(一)水平方向角度與時間變化

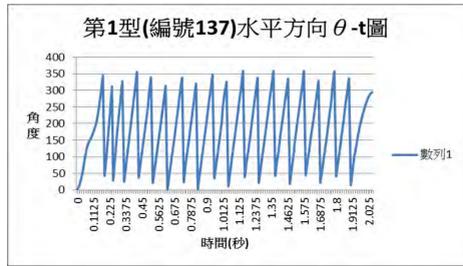


圖17:第一型(編號137) θ-t圖

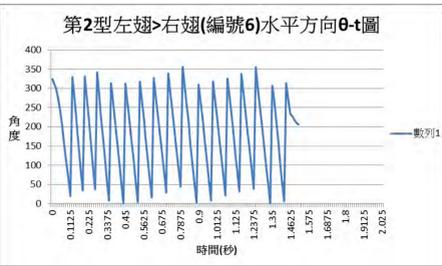


圖18:第二型(編號6) θ-t圖

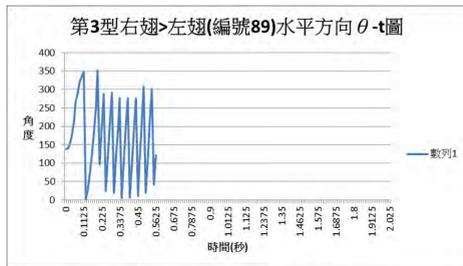


圖19:第三型(編號89) θ-t圖

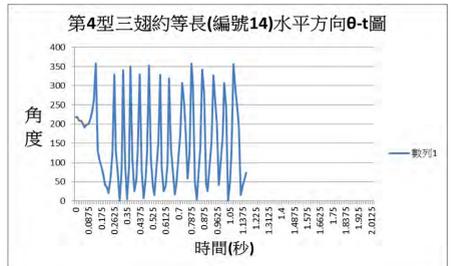


圖20:第四型(編號14) θ-t圖

第一型種子(編號137) 水平方向θ-t圖(圖21)可發現此飛行共轉動19圈，約每0.1秒轉一圈。

第二型(左翅>右翅)(編號6)水平方向θ-t圖(圖22)可發現此飛行共轉動16圈，約每0.1秒轉一圈。

第三型(右翅>左翅)(編號89)水平方向θ-t圖(圖23)可發現此飛行共轉動了9圈，大約每0.05秒轉一圈。

第四型(三翅約等長)(編號14)水平方向θ-t圖(圖24)可發現此飛行共轉動了14圈，大約每0.075秒轉一圈。

(二)水平方向角速度與時間變化



圖21:第一型(編號137) ω-t圖



圖22:第二型(編號6) ω-t圖



圖23:第三型(編號89) ω-t圖



圖24:第四型(編號14) ω-t圖

表四、各型翅果飛行模式 ω-t比較

類型	時期	自由落體期	減速期	緩飛期
第一型(平均角速度rps)		59.82	75.50	61.65
第二型(平均角速度rps)		64.75	79.31	69.84
第三型(平均角速度rps)		55.68	129.19	126.65
第四型(平均角速度rps)		28.58	64.9	79.94

由結果可知，第一型翅果的飛行模式較相近，角速度緩飛期時變化小；因翅果長度比例差異大第二型、第三型的角速度變化大，自由落體期及減速期之間角速度變化不明顯，第四型角速度變化不穩定，較快開始轉動。

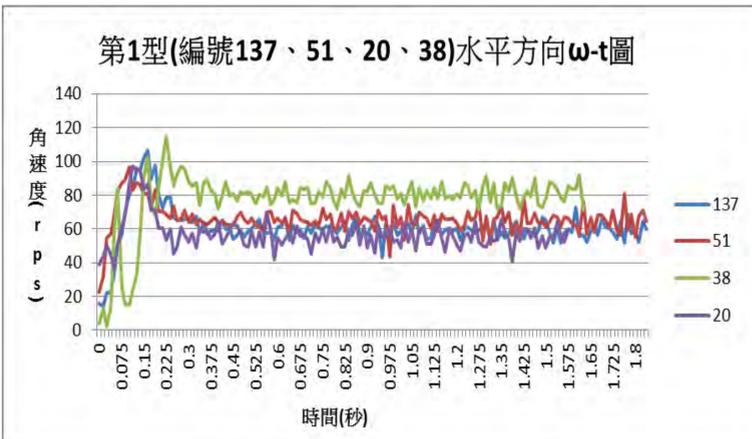


圖25:第一型(編號137、51、20、38) ω-t圖

四、分析黃杞翅果散布距離

由(圖26)可知第一型翅果在150cm處翻落平均飄移了11.10cm，200cm處翻落約飄移了11.74cm，250cm處翻落約飄移了11.48cm。而其他類型翅果的飄移距離也和第一型相似，由此可推測，黃杞翅果的水平飄移距離不大，即使高度增加也沒有明顯差距。

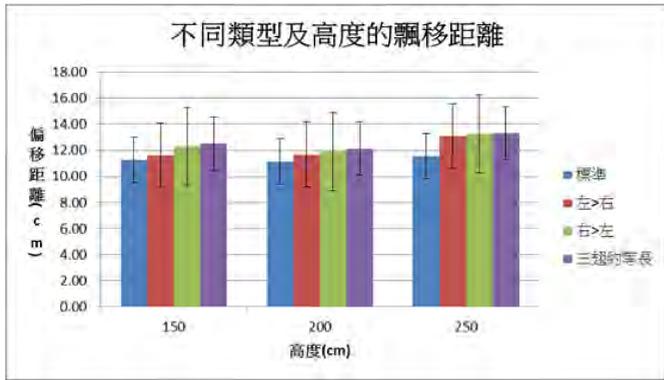


圖26：不同類型及高度的飄移距離

陸、討論

力及力矩的分析

- 釋放翅果的瞬間，翅翼會受到空氣的阻力，阻力最主要來自翅翼面與空氣產生摩擦產生的空氣阻力，對質心軸無力矩，此時並不會旋轉(圖27-A)，只會墜落。
- 掉落期間若發生傾斜，阻力的合力垂直於翼面向上，此時可分為兩個分量，一為垂直於物體方向的分量，是為升力，另一為平行物體方向的分量，則為側向力。
- 當翻轉的角度大於某一特定的角度時，阻力會快速上升，而開始旋轉，升力也會的隨著上升，此時翅翼上的阻力合力會向翅果的中心軸線方向偏轉，使翅果轉動起來(圖27-B)。

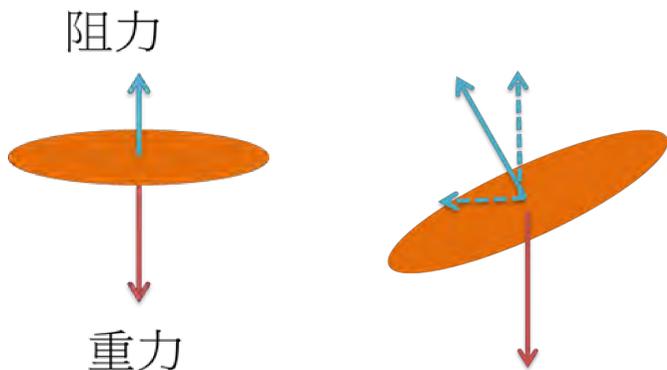


圖27：翅翼受力示意圖(A)落下瞬間 (B)掉落期間開始旋轉時受力狀態

- 在旋轉狀態下過程中會產生慣性力和空氣動力，空氣動力會使翅翼面傾斜，外端部上翹，慣性力矩和重力矩會對抗空氣動力力矩的作用，抵銷了上翹趨勢。
- 三種力矩中，重力矩的作用相對較小，空氣動力力矩和慣性力矩起主導作用。
- 當三種力矩達到平衡時，翼面傾角就能基本保持穩定了，此時就會穩定旋轉降落(圖28)。

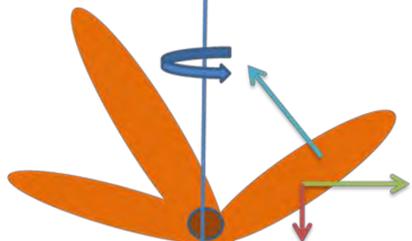


圖28：旋轉狀態翼片受力

- 氣流吹向翼片下表面時，迎角為正，能夠產生向上的升力分量，此分量能對抗部分重力，使黃杞翅果向下的加速度降低，進而延長下墜時間，當力矩達到平衡時，翅果將停止加速，以一個比較穩定的角速度旋轉(圖29)。
- 我們透過風洞煙的擾動觀察(圖30)，發現當黃杞翅果轉動時，會在翅翼的上方出現擾動，顯示有氣流的改變。

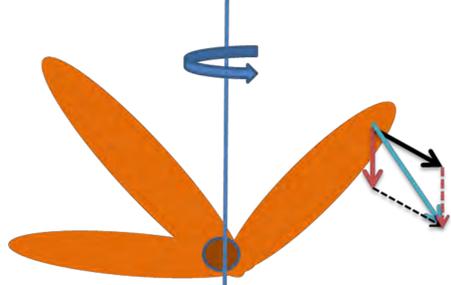


圖29:旋轉時翼片速度向量關係時

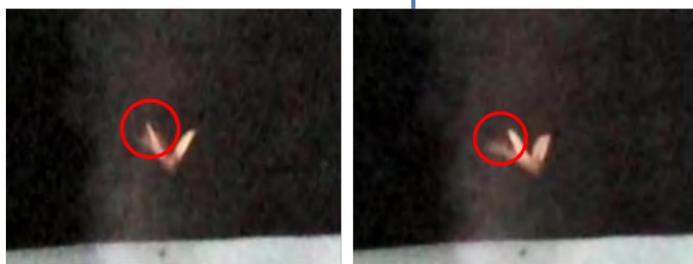


圖30:翅果落下時對煙的擾動情形

能量分析

- 能量守恆翅果下墜的過程就是翅果本身的位能向自身動能以及空氣動能轉化的過程。
- 翅果的動能由兩部分組成，分別為隨質心下墜的動能和繞質心軸轉動的動能，轉動越快，轉動動能以及對空氣的擾動(與迎角有關)也會越強，因轉動而傳遞給空氣的能量也會越多。
- 總能量是守恆的，轉動動能和空氣的動能所占比例增高，下墜的動能所占比例必然減小，表現為下墜時的速度就會較小，下墜時間就會更長的效果。

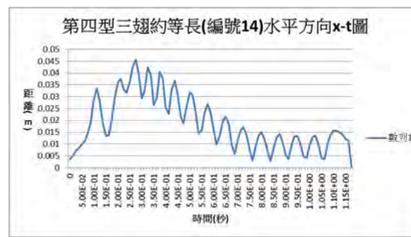


圖30:第四型旋轉軌跡圖

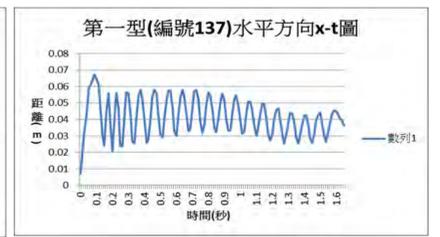


圖31:第一型旋轉軌跡圖

四型翅果的分析

- 第一型翅果飛行的模式最穩定，減速效果最佳，滯空時間最長，而第二型、第三型左右翅不平均，造成減速效果較差，飛行時間較短的現象，而第四型翅果三翅翼等長，但因三翅在同一側，反而造成重心不易平衡的現象，飄移距離較大(圖30、圖31)。
- 我們將四型翅果的飛行資料整理成表五，發現當翅果若能在較短的時間達到穩定平衡使轉動的角速度穩定下降，緩飛期的速度減小，有延長翅果滯空時間。

表五、四型翅果在自由落體期、減速期、緩飛期速率、角速度比較

翅果類型		自由落體期	減速期	緩飛期
第一型	平均速率m/s	0.596	0.463	0.232
	平均角速度rps	60.65	74.27	59.44
第二型	速率m/s	0.521	0.507	0.287
	角速度rps	64.75	79.31	69.84
第三型	速率m/s	0.632	0.958	1.036
	角速度rps	55.68	129.19	126.65
第四型	速率m/s	0.901	0.621	0.303
	角速度rps	28.58	64.9	79.94

表六、不同翅果比較

種類	黃杞	槭樹	大葉桃花心木
外觀	三翅	單翅果	單翅
角速度(rps)	69.84	29.29±3.76	8.06
緩飛期速率(m/s)	0.216	0.44	0.58
飄移距離(cm) (150cm處落下)	11.1	13	17.4
飛行模式	旋轉	直落旋轉+公轉	旋轉

負載的應用

- 發現翅翼最重能承受種子6倍重量仍可旋轉降落(圖32)，也就是翅翼的載重量最大可達翅翼本身重量的10倍。
- 可將黃杞翅果的緩降落特性，運用在開發新型降落傘、人類飛行器、空投物資載具，或大樓救災使用，同時注意飛行器的翅翼構造、材質和翅翼的比例等變因，或許能為人類的生活帶來些助益。



圖32:黃杞翅果負載不同倍數的種子重量

柒、結論

- 一、我們測量200片翅果，依據左翅/中翅、右翅/中翅、右翅/左翅的比值分成四種型態。
- 二、翅果垂直方向的運動模式，將其分為自由落體期、減速期和緩飛期。翅果先加速落下後開始減速，最後維持穩定速度。
- 三、第一型(標準型)翅果在緩飛期飛行的速率較小，可延長滯空時間；第二型、第三型、第四型在緩飛期速率較大，會減少滯空時間。
- 四、翅果水平方向的運動模式，會產生週期性旋轉，角速度會先增加，接著下降，之後維持一個穩定的轉速。
- 五、第一型飛行模式較相近，速率及角速度緩飛期時變化小；第二型、第三型、第四型角速度變化不穩定，震盪較大。
- 六、黃杞翅果從不同高度落下時，飄移距離不大。

捌、參考文獻

- 一、朱家慧、賴彥臻。2017。槭動心旋—槭樹翅果飛行模式之研究 第57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、物理基礎觀念(上) 張鎮麟 林樹人編著
- 六、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
- 七、黃杞介紹<https://baike.baidu.com/item/%E9%BB%84%E6%9D%9E/8279801>
- 八、三小時讀通牛頓力學 小峯龍男著