

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100017

參展科別 工程學

作品名稱 蝴蝶仿生拍翼機設計製作及飛行之流場與動態
分析

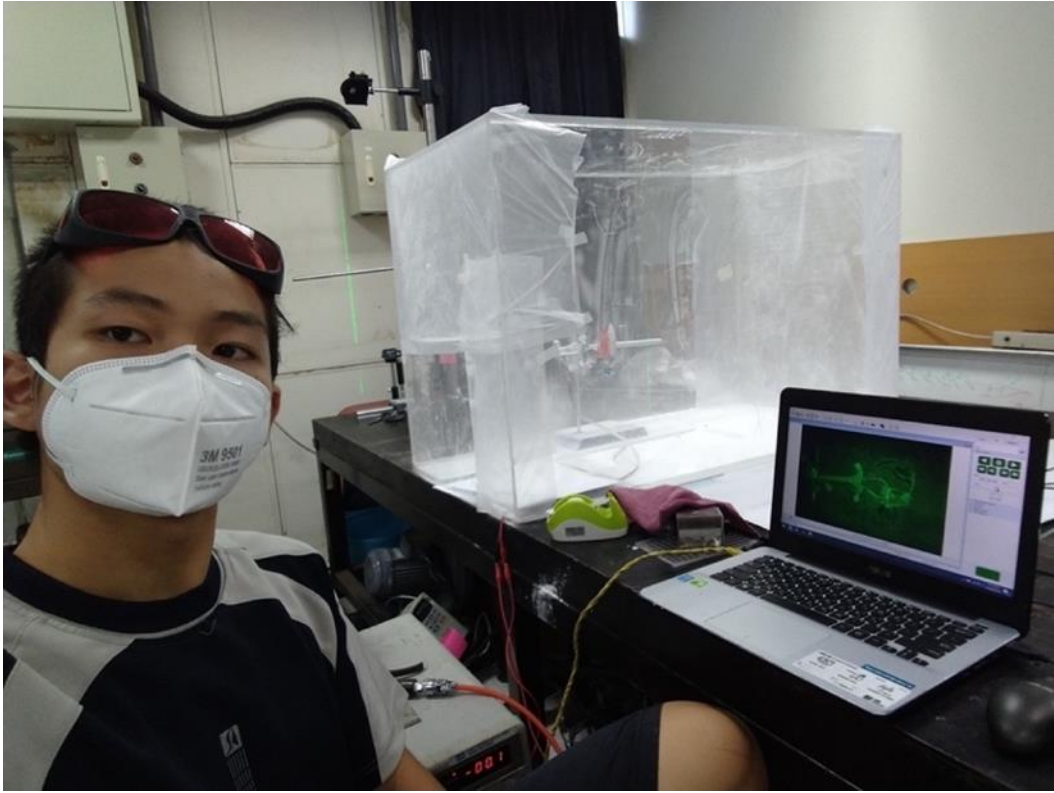
就讀學校 臺北市立建國高級中學

指導教師 賴奕帆、楊鏡堂

作者姓名 郭哲明

關鍵詞 蝴蝶仿生拍翼機、動態分析、PIV 流場可視化

作者簡介



我是郭哲明，就讀於台北市立建國高級中學數理資優班。

多少次待在生科教室趕工；多少個疲憊的日子在蝴蝶與高速攝影機間奮鬥；多少回盯著一張張動態影像進行標點；多少個白晝黑夜在電腦前修改程式碼。這場與蝴蝶的邂逅雖然勞累而耗時，成果說實在也不甚精彩炫目，但經過這場試煉，我從一個懵懂的毛毛蟲，羽化為更堅毅不拔、更無所畏懼、更成熟的蝴蝶。

「因為需要感謝的人太多了，就感謝天罷。」一路上有太多人向我伸出援手，在此我致上最深的感謝與祝福。

摘要

本研究以仿生微飛行器為標的，選擇以蝴蝶為仿生對象，期望妥善發揮其低振翅頻率、高靈敏度等優點，製作拍翼機，並觀測其拍翼動態與流場進行設計改良。

首先對8種蝴蝶進行動態分析，經過拍攝、標點、程式撰寫等步驟分析其飛行動態並呈現在三維空間中，觀察得到拍翼振幅、拍頻、上下拍時間比等數據，作為拍翼機設計之依據。接著以大鳳蝶為設計基礎，使用3D列印並結合生活材料，經過六代的改良，製作出與大鳳蝶拍翼動作相近的拍翼機。最後以PIV可視化技術，使用氧化鋁粉末與綠光雷射紀錄流場的變化，並利用matlab的套件PIVlab進行分析，接著觀察到昆蟲飛行的特色：翼前緣渦旋貼附與夾翼造成的射流。

本研究整合了生物觀察、機械工程、流場分析等領域，並已完成雛形的設計與製作，而我們希望動態與流場分析的數據能夠作為未來改良之依據。

Abstract

This study hopes to provide reference and inspiration to the development of micro aerial vehicle (MAV).

First, we applied dynamic analysis to 8 species of butterflies (17 flapping periods in total), through which we learned that their mean flapping angle amplitude is 95° , their ratio of downstroke time and upstroke time is about 2, and their flapping frequency is about 10 Hertz. Also, we created a 3D model to demonstrate the flying of the butterflies.

Secondly, we chose *Papilio memnon heronus* as the reference of the design of our butterfly-type ornithopter (BTO) because of its low flapping frequency which makes the manufacture easier. After six generations of evolution, we ended up with an ornithopter with a similar flapping pattern with *Papilio memnon heronus*.

At last, we measured the Fluid dynamics around the ornithopter with the particle image velocimetry (PIV) technology. Through the fluid dynamics, we observed the leading-edge vortex, which is considered to be the major factor of the insect flying aerodynamics. Besides, we also observed the jet stream caused by the clap and fling motion. Last but not least, the thrust it generates doesn't necessarily increase as the frequency grows, and the wingbeat frequency of butterfly is the optimized speed.

In this study we integrated biological experiment, mechanical engineering and flow field observation. Based on the flying dynamic of butterflies, we designed a BTO and observed its flapping fluid dynamics. Through this study we made a step forward towards the success of BTO, although the ornithopter is still too heavy to fly, we hope the observation of the fluid around the flapping ornithopter could help us understand more about the fundamental of how the butterfly flies, and apply it to the design of MAVs.

一、前言

(一) 研究動機

無人機用途相當廣泛，其中微飛行器主要用於軍事偵察與救災勘查等，尤其需能在窄小或複雜的空間中敏捷移動，因此微飛行器之設計應擁有高機動性與高靈敏度；飛行器依飛行方式可以分為三類(定翼、懸翼、拍翼)；傳統的飛機為定翼式飛行器，然而此種飛行器機動性不高，且微飛行器低雷諾數飛行，而定翼式飛行器在低雷諾數下無法進行穩定的飛行；直升機則為懸翼式飛行器，市面上已可見許多懸翼式的小型飛行器，然而其飛行效能與靈敏度仍不如拍翼式飛行器；拍翼式飛行器就如大自然中所有飛行生物，然而因理論仍不完備、技術不足等因素使得發展緩慢，隨著時間推移、理論的建構，科技的進步，拍翼微飛行器逐漸邁向可能。

適者生存不適者淘汰，飛行生物依循大自然的規則不斷演化、繁衍至今，在大自然的手中拍翼生物稱霸空中，而在飛行昆蟲中，蝴蝶尤為特殊，看似悠閒的飛行姿態不僅是文人的筆下意境，更是仿生的完美參考對象，然而其飛行之空氣動力知識仍未發展完全。本著對蝴蝶飛行其背後原理的好奇，及對蝴蝶所擁有之優點在微飛行器之應用的發想，與對拍翼微飛行器發展的期盼，本研究期望透過觀察蝴蝶、設計製作拍翼機並探討其空氣動力以供未來拍翼機發展之依據。

(二) 研究目的

- 1.觀察蝴蝶的飛行動態
- 2.設計製作拍翼機
- 3.觀察拍翼機的拍翼動態與流場

二、研究設備與器材

(一) 軟體：

Phantom Camera Controller (PCC), Freecad, Cura, Creo, Geogebra, Python, Imagej, Matlab

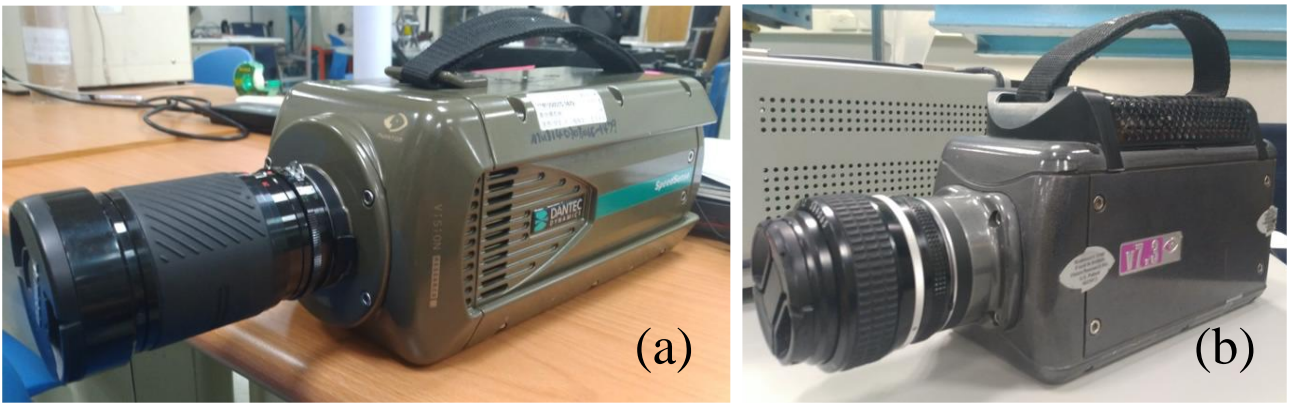
(二) 硬體：

1、拍攝

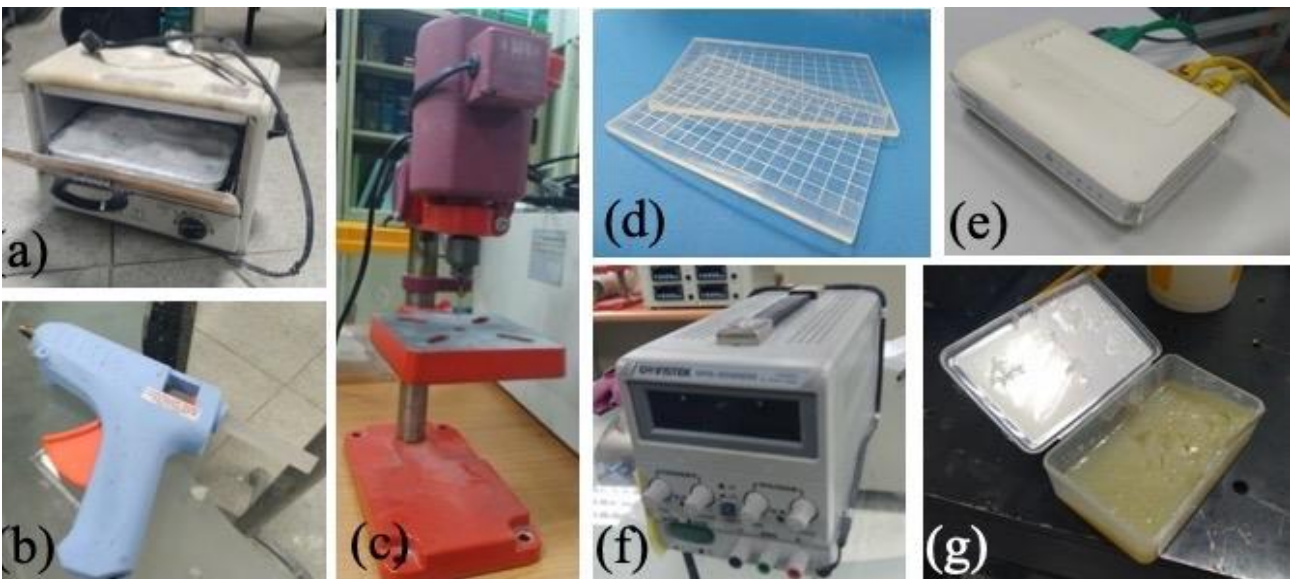
高速攝影機、鏡頭、校正板、半開放透明壓克力箱、照明燈具、電子秤、雷射、圓柱透鏡、凸透鏡、電源供應器、n95口罩、護目鏡、氧化鋁粉末、烤箱、空氣壓縮機、鐵架、路由器、紗網

2、製作

線鋸機、鑽床、熱熔膠槍、3D印表機、PLA 3D列印線材、碳纖維棒、直流馬達、齒輪、麥拉片、軟塑膠片、素描紙、雙面膠、膠水、迴紋針、鐵砂網、木材、針、電線、潤滑油膏



圖一：高速攝影機 (a) Phantom v310 (b) Phantom v7.3



圖二：(a)烤箱 (b)熱融膠槍 (c)鑽台 (d)校正版 (e)路由器 (f)電源供應器 (g)潤滑油膏



圖三：(a)紗網 (b)高速攝影機之配件 (c)光源 (d)空氣壓縮機 (e)針 (f)鐵架、夾具與拍翼機 (g)果糖 (h)atom 3D列印機

三、研究方法或過程

(一) 觀察蝴蝶的飛行動態

1、取材

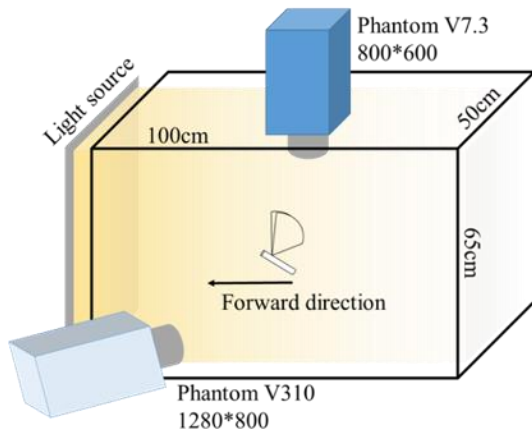
本研究所使用之蝴蝶皆為作者於新北市安坑山區經數小時抓捕而得(2019/8/31, 2020/5/3)，不同種類的蝴蝶維持活力的時間長短不一，而本研究之拍攝皆在捕獲後3天內完成，期間以沾滿果糖溶液之衛生紙餵食蝴蝶。

2、拍攝

首先要進行校準，設定有效區域，即讓蝴蝶飛過之區域，將校正板放置在此區域中央並對焦，儲存影像供校準用。

接著將蝴蝶置於透明壓克力通道中，將室內燈光關閉後開啟光源，將蝴蝶至於遠離光源的一側(圖四左圖右側)，因蝴蝶有趨光性，等待一段時間便會向光源飛去，若他始終不起飛，便施予刺激，例如用另一隻手輕推其尾部；當其飛向光源會通過有效區域附近，此時先大致判斷他是否有飛進有效區域，若有則按下觸發，電腦會紀錄下按下觸發的前幾秒的影像，接著再慢動作回放細看是否有錄到一次以上的完整拍翅，以及轉彎幅度不大，若符合條件則將其儲存(圖四)；此為一次蝴蝶動態拍攝的過程。

另外，在拍攝前或拍攝後需量測蝴蝶重量，紀錄下來以供後續分析；測量方法有二：若蝴蝶仍相當有活力，則將其固定於夾鏈袋內秤重，而後再稱量夾鏈袋之重量，相減而得蝴蝶的重量；若蝴蝶已沒什麼活力，則可以直接稱量。

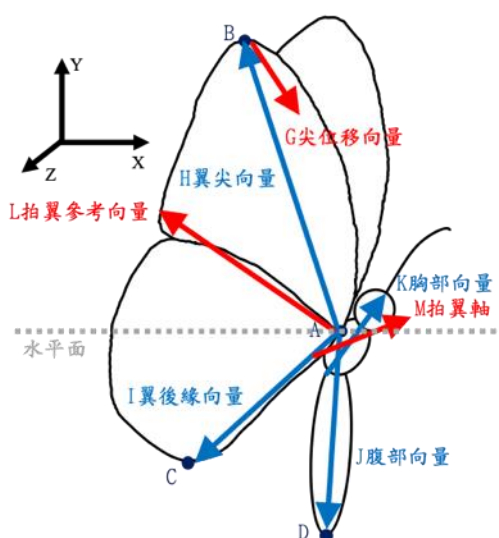


圖四：蝴蝶動態拍攝示意圖與實際圖

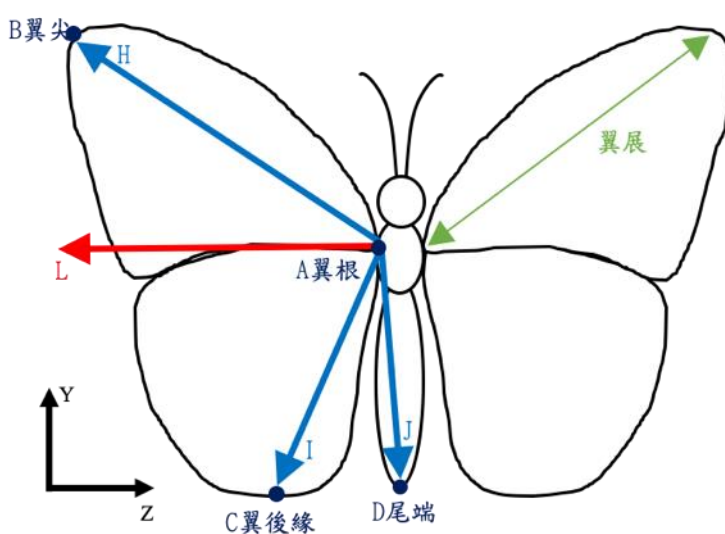
3、名詞定義

表一：名詞定義

名詞	定義	名詞	定義
A 翼根	翅膀基部點	H 翼尖向量	翼根指向翼尖的向量
B 翼尖	翅膀尖端點	I 翼後緣向量	翼根指向翼後緣的向量
C 翼後緣	翅膀後端點	J 腹部向量	翼根指向尾端的向量
D 尾端	腹部尾端點	K 胸部向量	胸部的方向向量
E 翼展	兩翅翼尖之間的距離	L 拍翼參考向量	翼面上垂直胸部向量之向量
F 翼面法向量	翼面的法向量	M 拍翼軸	尖位移向量推導出的旋轉軸
G 尖位移向量	翼尖瞬時位移向量		



圖五：蝴蝶名詞定義斜前視圖



圖六：蝴蝶名詞定義上視圖

4、角度定義

角度定義在此有二（表二），定義一為參閱許多參考資料後整理出的對角度的分析方式，然而其中之胸部向量(K)在標點上由於兩參考點距離相當靠近，容易產生誤差而影響後續的分析，因此本研究改以嘗試定義角度定義二。

接下來皆是以角度定義二進行分析與討論。

表二：角度定義

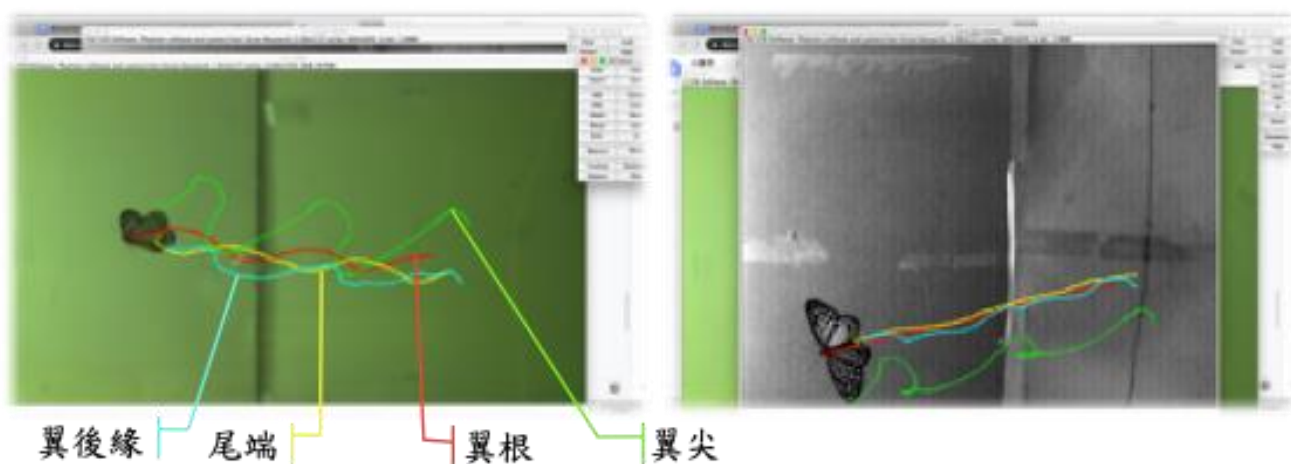
角度定義一		角度定義一	
角度	定義	角度	定義
拍撲角 α	拍翼參考向量(L)與Z軸之夾角	拍撲角 β	翼尖向量(H)與Z軸之夾角
腹部角	腹部向量(J)與水平面之夾角	腹部角	腹部向量(J)與水平面之夾角（同角度定義一）
胸部仰角	胸部向量(K)與水平面之夾角	仰角	拍翼軸(M)與水平面之夾角
掃掠角	翼尖向量(H)與拍翼參考向量(L)之夾角	攻角	尖位移向量(G)與翼面法向量(F)之夾角

5、標點

使用imagej的Mtrack套件，每一個素材皆有top與side兩份影像，兩份影像皆需將每張圖的四個特徵點(翼根、翼尖、翼後緣、尾端)標出。(圖七)此步驟相當費時，每一組振翅週期最少需花費2個小時，其中包括使用PCC將cine檔中欲使用之影像區間輸出為tiff影像序列、輸出時影像時間為負值所以要重新命名、將影像序列輸入Imagej、校正、開啟mtrack套件標點、將座標等數值輸出以備後續分析。

雖然如果按照步驟可能1個半小時即可完成，然而邊做邊摸索，嘗試過程中常需輸入輸出大量影像，而此時的等待時間雖然不長，仍然耗費了相當多時間。

其中值得一提的是，輸出影像序列檔時再存檔名稱的欄位需填寫某一特定字串提供程式輸出編號的格式例如若要將輸出時間標記為-100~-90的cine檔輸出(按下觸發的時間標記為0，因此在按下觸發前的影像其時間標記變為負)，並於檔名欄位輸入「pic! 4」，則影像序列為pic-0100, pic-0099, pic-0098...；輸入「pic+3」則會輸出pic001, pic002, pic003...。若使用前者，便需多一道重新命名的程序，然而一直都不知道可以使用加號的格式，直到很後期才知道，在使用加號格式之前就常因重新命名發生錯誤而需重新輸出。



圖七：標點作業截圖(左:side, 右:top) (0831_4_1 side)

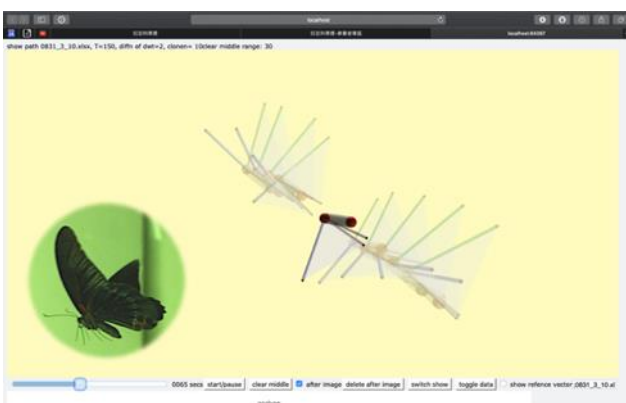
(圖中翼根、翼尖、翼後緣、尾端四點分別為紅、綠、淺藍、黃色軌跡)

6、視覺化與分析

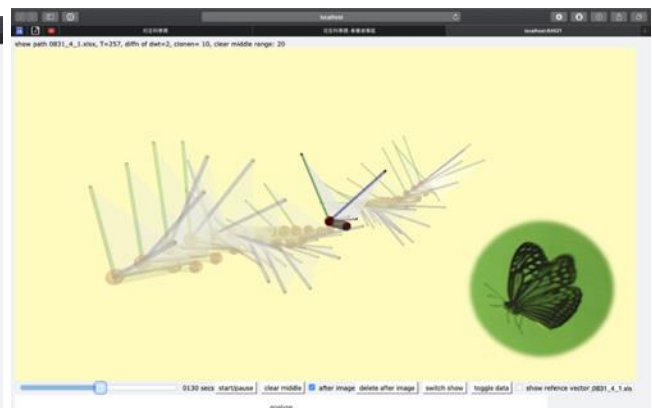
使用python撰寫程式分析標點數據。程式首先讀取四個點在兩平面(side & top)上的座標，合併後得到四點分別隨時間變化的三維座標。接下來在視覺化的部分本研究使用Vpython將三維空間的動作呈現眼前（圖十、圖八、圖九）。接著計算出各個角度隨時間的變化，並呈現在vpython視覺化區域的下方（圖十）。

數據分析的部分則是先逐一分析完所有資料庫中的數據，接著以批量輸出為csv檔，其優點為可直接以excel開啟並另存為xlsx檔（圖十一、圖十二），便於分析。

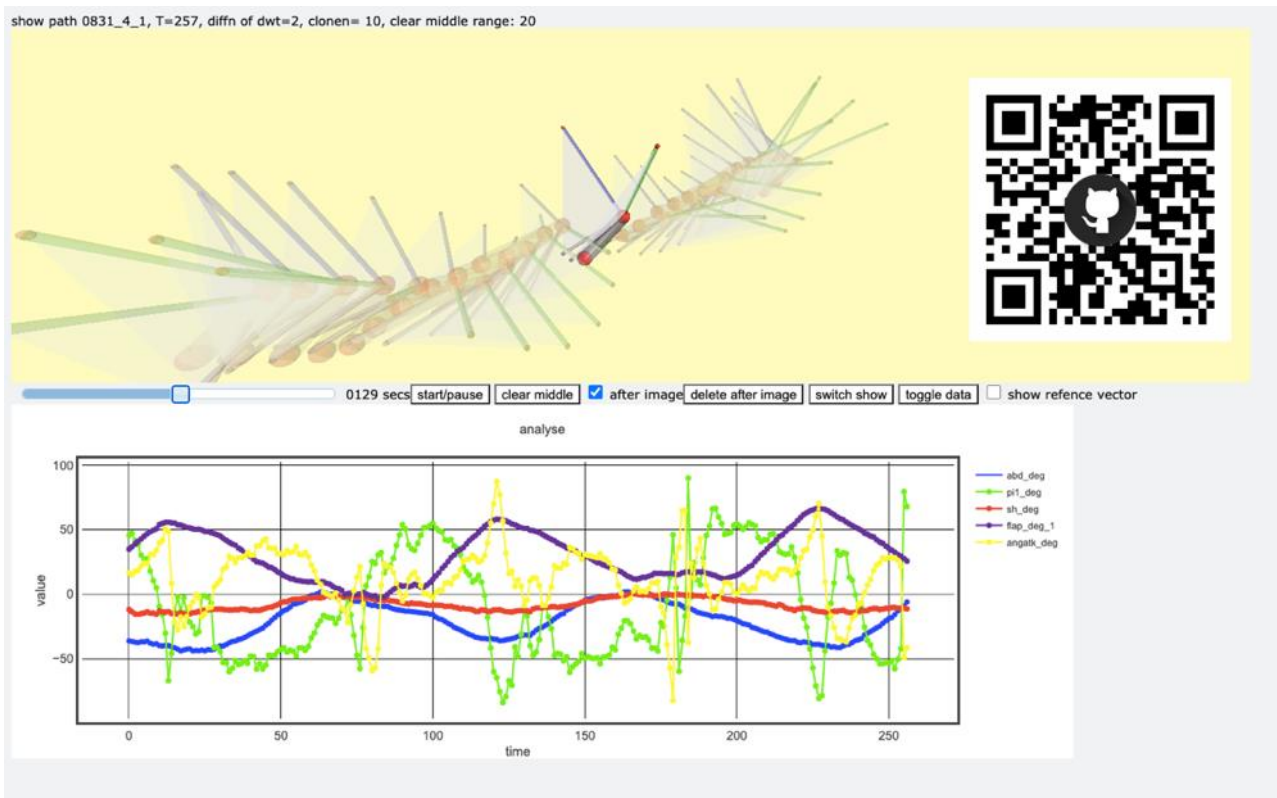
程式碼用git做版控且同步於github中(<http://github.cim/chemmy-jack/phyl>)。一開始程式碼相當混亂，一直到近期定義比較清晰且撰寫比較熟練，且在撰寫策略上一改寫到哪想到哪的方式，而先將整體架構寫清楚再逐一撰寫，程式碼才比較清楚。



圖八：0831_3_10 (大鳳蝶)

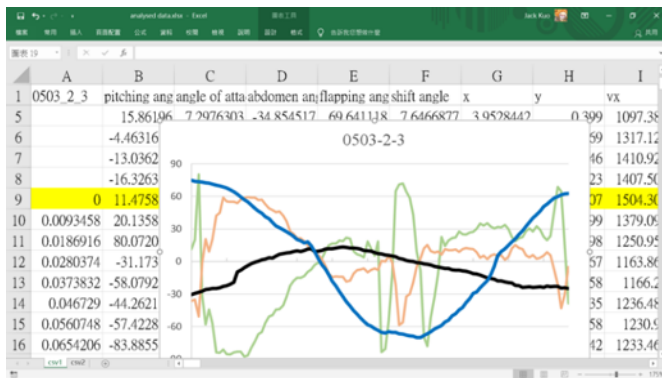


圖九：0831_4_1 (小姬紋青斑蝶)

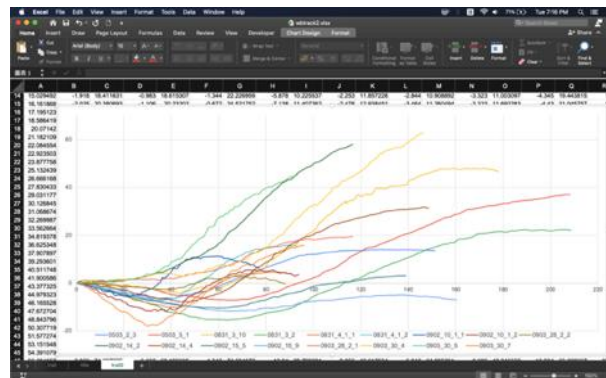


圖十：vpython視覺化與分析截圖（0831_4_1小姬紋青斑蝶）

右方QR code為存放於github的程式碼連結



圖十一：使用Excel整理角度數據



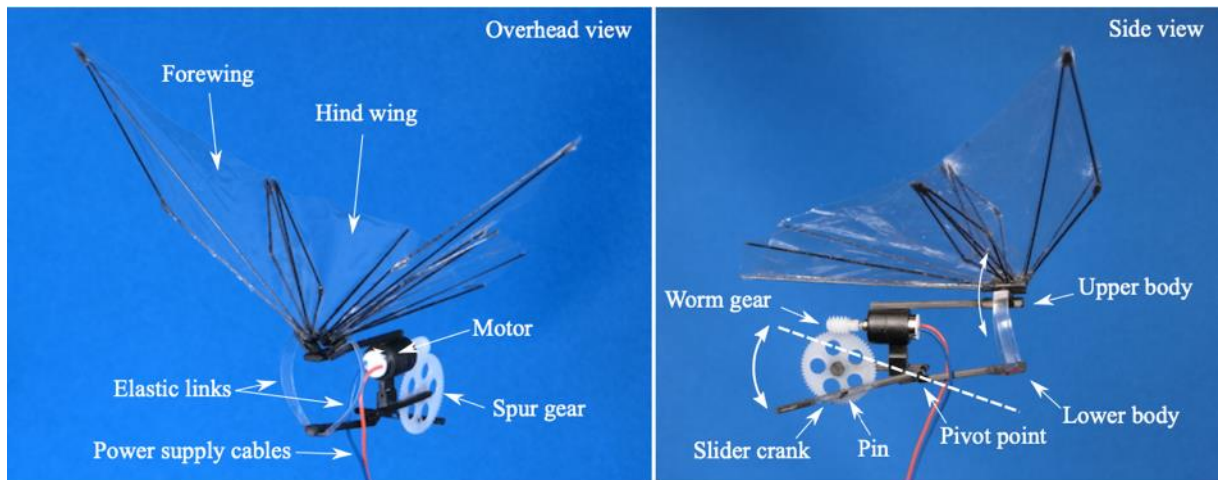
圖十二：使用Excel整理翼根路徑

(二) 設計製作拍翼機

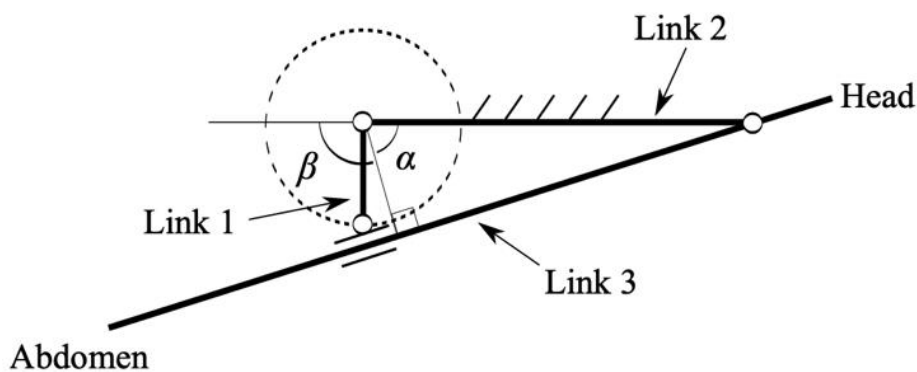
1、選擇模仿對象與尋找拍翼機構

觀察了八種蝴蝶的飛行後，我們最後選擇拍翅頻率最低且體型最大的大鳳蝶為仿生的參考對樣，因為較低的振翅頻率可以減輕零件的磨損，較大的體型則讓製作上更為容易。

統整數個前人之研究所使用之拍翼機構(Chen, Chen, Lu, Wang, & Lin, 2016; Fujikawa & Kikuchi, 2019; Tanaka & Shimoyama, 2010; Yang, 2012)，最後選擇了(Fujikawa & Kikuchi, 2019)的機構作為本研究所使用之拍翼機構，因為在前述的蝴蝶動態觀察中，我發現蝴蝶的下拍比上拍時間長，其下拍與上拍的時間比值約在1到2之間，鑑於此選擇了這個擁有不同上下拍時間比的機構。(Fujikawa & Kikuchi, 2019)為論文中機構得以產生不同上下拍時間比之拍翼機構簡圖。



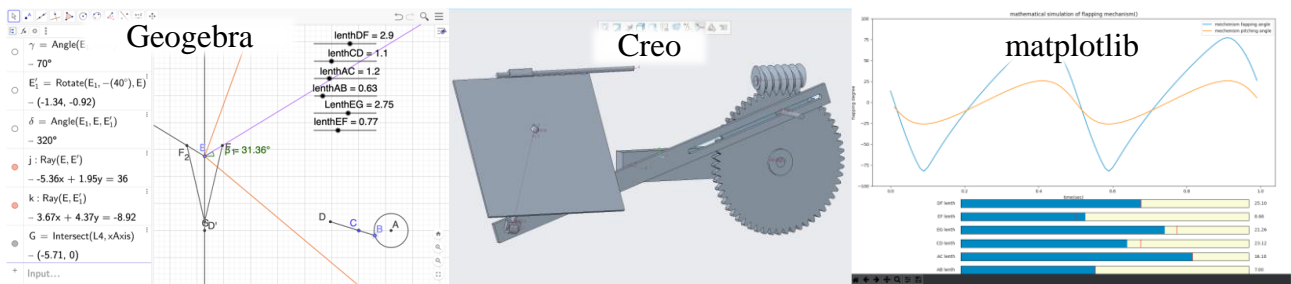
圖十三：(Fujikawa & Kikuchi, 2019)拍翼機右側視圖及左前視圖



圖十四：(Fujikawa & Kikuchi, 2019)拍翼機傳動機制解釋圖，其中 α 及 β 角比值為理想中之上下拍時間比

2、模擬以尋找理想合適之參數

在製作之前先以軟體模擬機構，檢測其可行性，並尋找較為合適之參數，方便之後在製作時有參考數值可以依循。本研究前後分別使用了Geogebra, Creo, python3 (matplotlib) 來進行模擬。



圖十五：模擬以尋找可行的參數之作業截圖

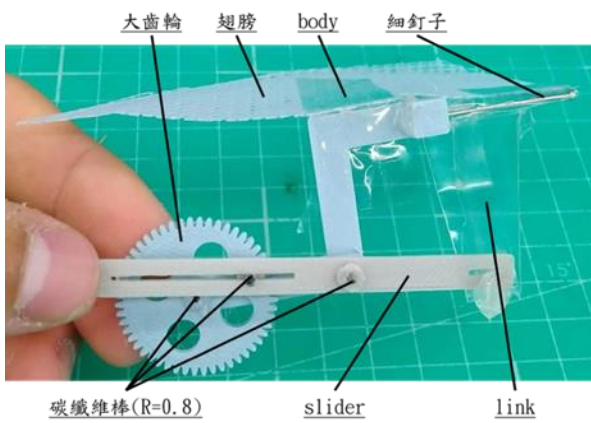
3、製作

從第一代還只是個概念機，到快要可以拍動的第二代，接著製作出能夠拍翼達拍撲振幅 90° 與頻率 5Hz 的第三代，至此已花了一個多月幾乎每天在生科教室嘗試、改良的循環。第三代之後機身主體便有了較穩定的架構，然而為了達到蝴蝶的振翅頻率與振幅，對翼根接合處做了改良而得到振幅 150° 頻率 10Hz 的第四代，此時已接近接近真實蝴蝶，然而整體相當不穩定。

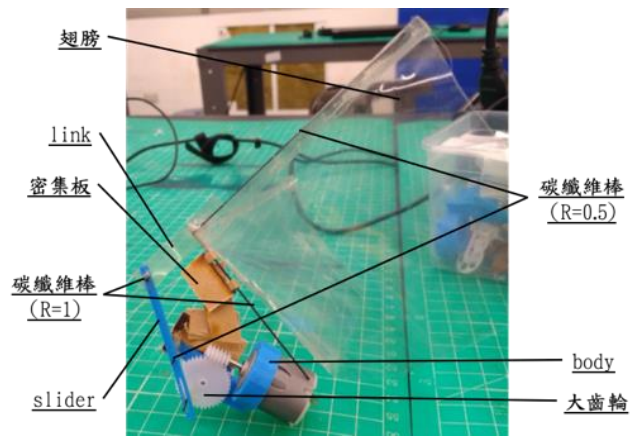
第四代在該高速振翅下齒輪出現了問題，高速旋轉下（馬達約供電 25V 轉速達約 360RPS ，此時振翅頻率約 10Hz ）蝸桿與正齒輪接觸處的不穩定導致出現空轉，而蝸桿則把正齒輪的一塊削平了，然而此尺寸的正齒輪雖然容易取得，但沒有地方單賣，欲取得需購買齒輪包，一包齒輪包卻只有一個可用的齒輪。經過許多的努力後終於找到能以低價的替代齒輪，著手針對齒輪更改機身主體尺寸，並為增加齒輪穩定做了新的設計後，經過許多嘗試與 15 次以上的重印，終於製作出第五代。

然而第五代齒輪仍有嚴重的磨損問題，起初希望以改變齒輪的材質來解決問題，但齒輪的規格一旦更換，有太多尺寸需要重調整，還有很多零件要重買，本研究最後回歸到了最原始的做法（雖然過程中一直沒想到，但這理應是最明顯的做法），加潤滑油膏。第六代拍翼機除了增價了潤滑，翅膀也做了更動，以大鳳蝶的翅脈為參考，印製 PLA 、厚 0.3 mm 的翅脈，翼面則使用兩張薄紙夾自翅脈兩側，並以膠水黏著，在拍觀察拍翼動態後發現一根附近變形量太大，因此在翼根至翼前緣中段以一根直徑 0.5 mm 的碳纖維棒加強。

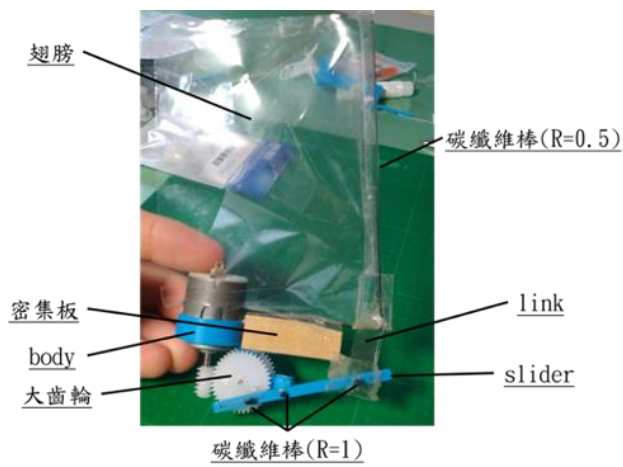
本研究使用freecad繪製3d列印之cad檔。



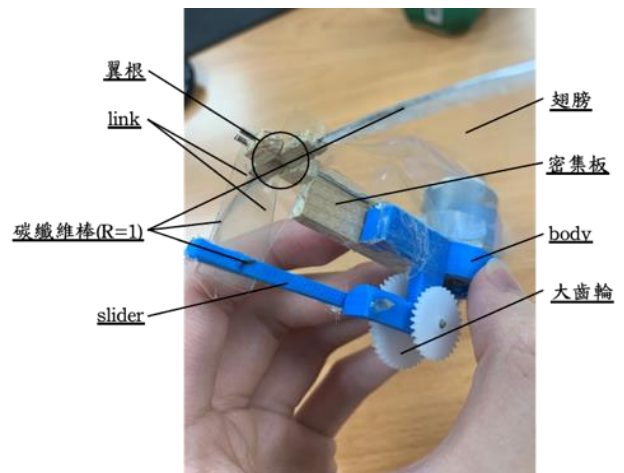
圖十六：第一代拍翼機



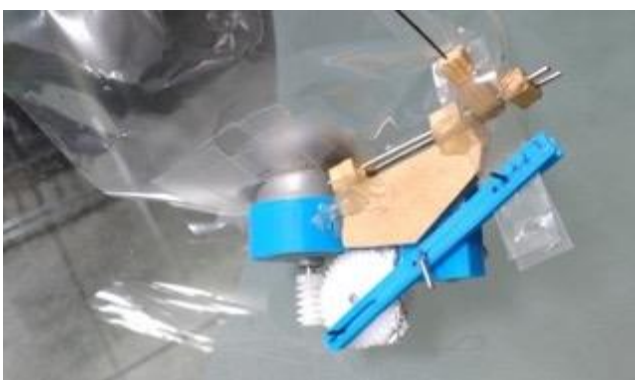
圖十七：第二代拍翼機



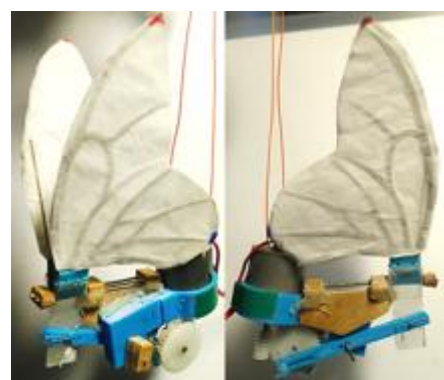
圖十八：第三代拍翼機



圖十九：第四代拍翼機



圖二十：第五代拍翼機



圖二十一：第六代拍翼機

(三) 觀察拍翼機的拍翼動態與流場

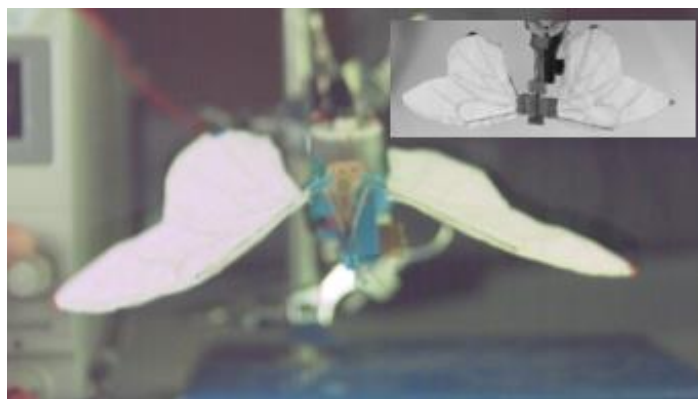
1、拍翼機動態拍攝與分析

拍攝拍翼機之動態與拍攝蝴蝶之動態步驟相近，首先將兩架攝影機擺設好正交的位置，並進行校正，接著使用鐵架及夾具自拍翼機後方固定，將拍翼機放置於有效區域中進行拍攝。

與蝴蝶動態拍攝不同的是，拍攝蝴蝶之動態時由於蝴蝶向前方飛行，攝影機的長邊需平行於蝴蝶飛行方向以取得較多完整的振翅週期，而在拍翼機的拍攝中，拍翼機固定於原地拍翅，將拍攝之長邊平行於翼展能使翅膀在影像中佔更高的比例，進而取得更高解析度的標點圖像，另外由正面拍攝得到更為準確的拍翼角，因此拍翼機之動態拍攝其側面的攝影機朝向拍翼機之正面。



圖二十二：拍翼機動態拍攝設計架設照片



圖二十三：用於動態分析之影像

2、拍翼機流場觀察與討論

(1) 拍攝

本研究採用PIV流場可視化進行流場之拍攝與解析，其原理為於流體中佈滿細小的微粒，接著製造光頁並拍攝光頁上被凸顯之細小微粒隨流體流動之影像，最後使用軟體分析影像而得光頁上的2維流場。

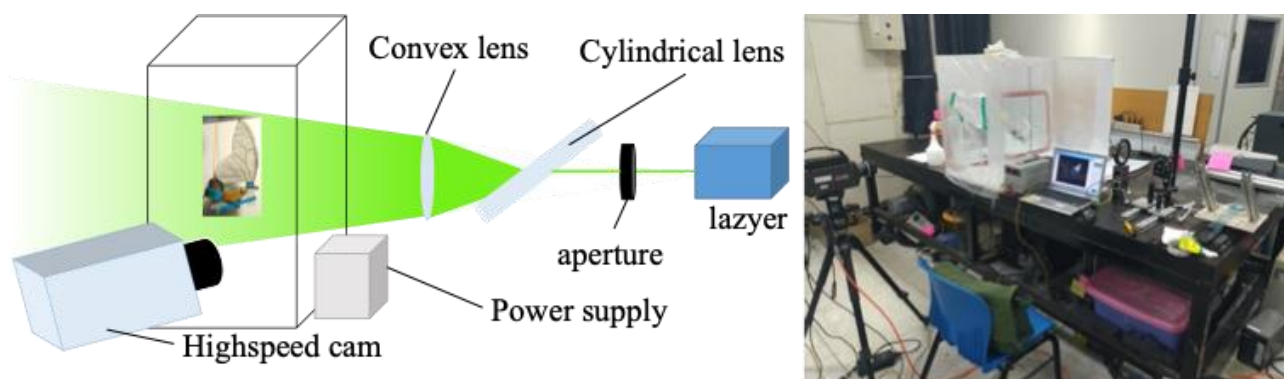
本研究進行PIV拍攝首先將氧化鋁粉末(粒徑 $<10 \mu\text{m}$)放入烤箱烘烤，盡可能將水分排除以確保微粒不會互相附著而使顆粒變大；在等待烤乾粉末的過程中，將雷射光源、製造光頁的鏡組、用於限制微粒範圍之透明壓克力箱、高速攝影機、拍翼機、電供裝置等架設定位，並完成校正，此時粉末大致已足夠乾燥，至此完成準備工作。

準備完成後，首先加入2~3匙的粉末並使用氣槍噴氣使微粒飛散於空間中，待其穩定後開啟強光雷射進行拍攝，接下來便重複以下動作，設定供電之電壓、通電完成拍翼動作並按下trigger、噴氣使微粒飛揚、待其穩定的過程中進行影像的儲存。

拍攝PIV之成敗關鍵在於噴氣的拿捏，噴太多會使得空間中瀰漫太多粒子，向煙霧一樣使影像非常模糊，無法進行分析；而噴太少則會使光頁上的粒子不足導致光頁亮

度下降，使分析誤差增加；且若噴太多則需等待粒子沉澱，然而沉澱的速度非常緩慢；噴太少雖然不用耗費許多時間等待其沉澱但要確認是否噴太少仍需等粉塵穩定。

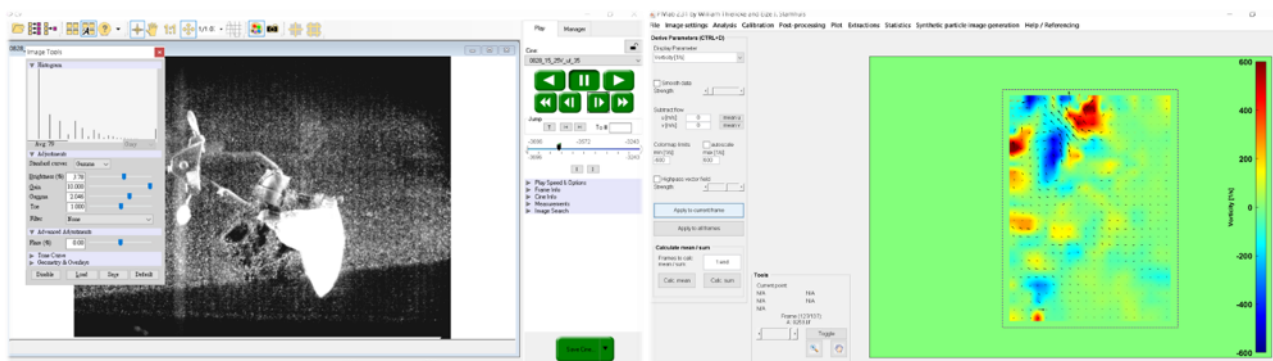
另外在安全方面，進行拍攝時須全程配戴n95口罩，且不宜長時間暴露於氧化鋁粉塵中，若需常碰觸到粉塵濃度高的地方可佩戴手套，作為保護。



圖二十四：進行拍翼機PIV拍攝之示意圖及設備架設照片

(1) 分析

首先進入PCC或Phantom Cine Viewer (CV)將拍攝時儲存的cine檔經過影像處理後(調整Brightness, Gain, Gamma, Toe等參數，使影像中的粒子流動較為清楚)，輸出為影像序列。接著使用matlab中的PIVlab進行PIV拍攝影像的分析。



圖二十五：使用CV對影像進行微調與輸出(左)與PIVlab的實作截圖(右)

四、研究結果與討論

(一) 觀察蝴蝶的飛行動態

本研究分析了8種蝴蝶共18組拍翼動態，由動態分析數據(表三)可以發現：下拍占比(DSP)平均為62%，即下拍時間約為上拍時間的2倍；爬升角(θ_{ob})皆小於 30° ，視為前飛；平均水平速度(V_x)為為1.3 m/s，人類一般行走大約只有1 m/s，這就是為甚麼人們不易追上蝴蝶；

雷諾數(Re)大約落在 10^3 數量級，此數量級大約介於紊流與穩流之間，此特性使得蝴蝶飛行之空氣動力學難以討論；平均拍翅頻率為10 Hz；拍翼振幅(Φ)大至 130° 小至 50° ，平均則落在 94° ；展弦比(AR)平均為1.4，可知相比其他昆蟲擁有較寬短的翅膀；重量(M)約為0.26公克，大約只有一張衛生紙1/6的重量；單位翼面負重平均為 0.15 kg/m^2 ；推進比(J)平均為0.52；腹部角振幅(Φ_{abd})平均為 46.6° ，此大幅度的腹部擺盪為蝴蝶透過腹部的擺動改變重心，進而改變翼面拍擊的方向，使原本將造成向下推力的上拍動作改為向後拍，將阻力化為推力(Fei & Yang, 2016)；最大拍翼角(θ_{maxflap})之平均為 80° ，上拍時幾近互相碰觸，此為夾翼動作，能提供相當大的推力(Sane, 2004)。

觀察圖二十六可發現，拍翼角之波谷左側（下拍）大約為右側（上拍）的近兩倍；腹部角由低到高再到低，即尾端於下拍時向上翹起，下拍末尾上拍之前轉而向下擺盪；分析仰角的變化時在下拍的部分須將數字以0度為對稱軸翻轉，因計算時使用翼尖位移向量計算翼轉軸，上下拍時外積所得的向量方向相反，依此分析仰角的變化為當下拍（拍翼角減少）時，翼轉軸逐漸靠近水平，翼面拍擊方向偏向下，上拍時翼轉軸漸趨垂直，此時翼面朝後拍擊。

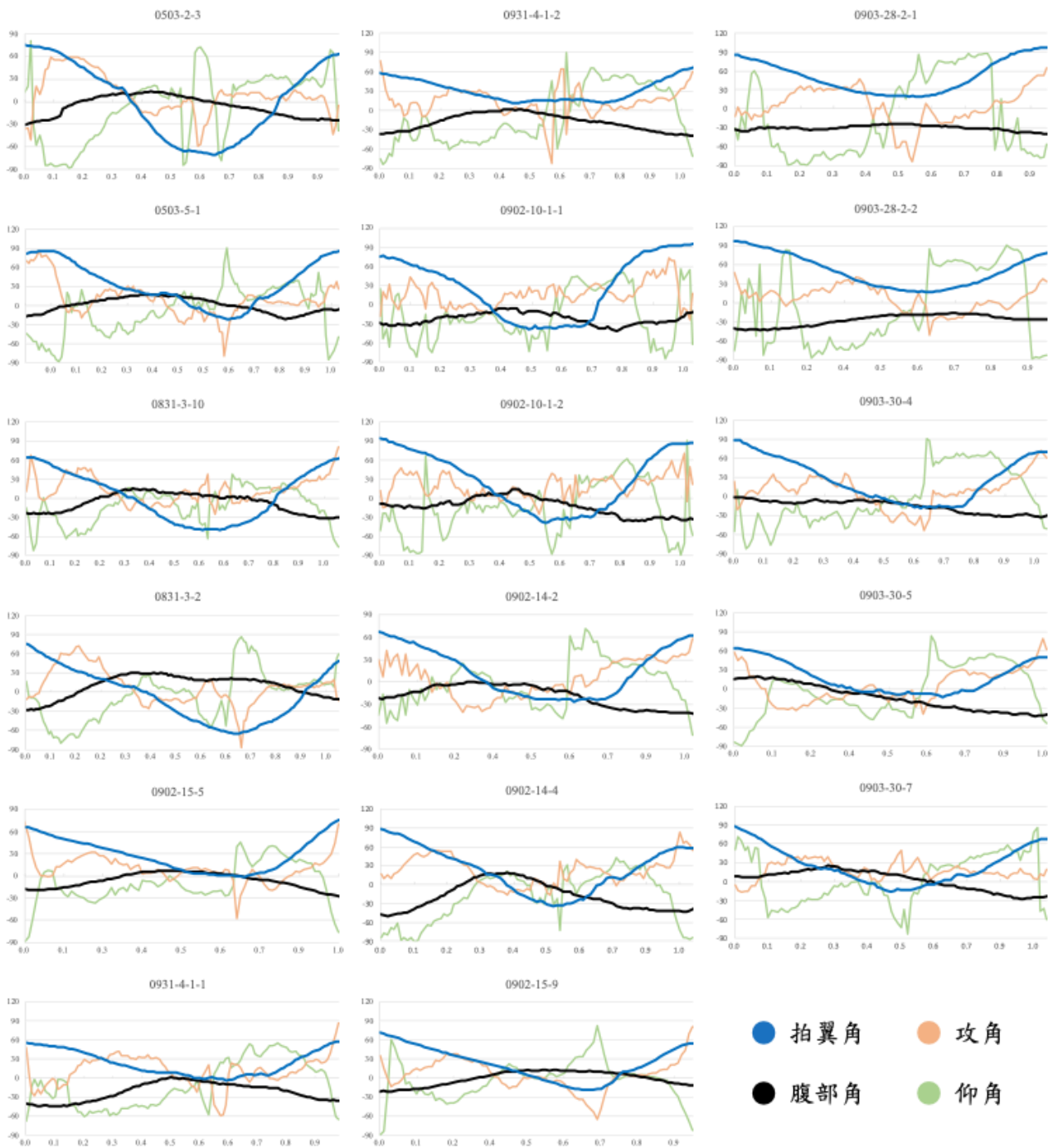
觀察圖二十七可發現蝴蝶所採飛行策略產生之特殊波浪狀軌跡。

表三：本研究之17組拍翼數據

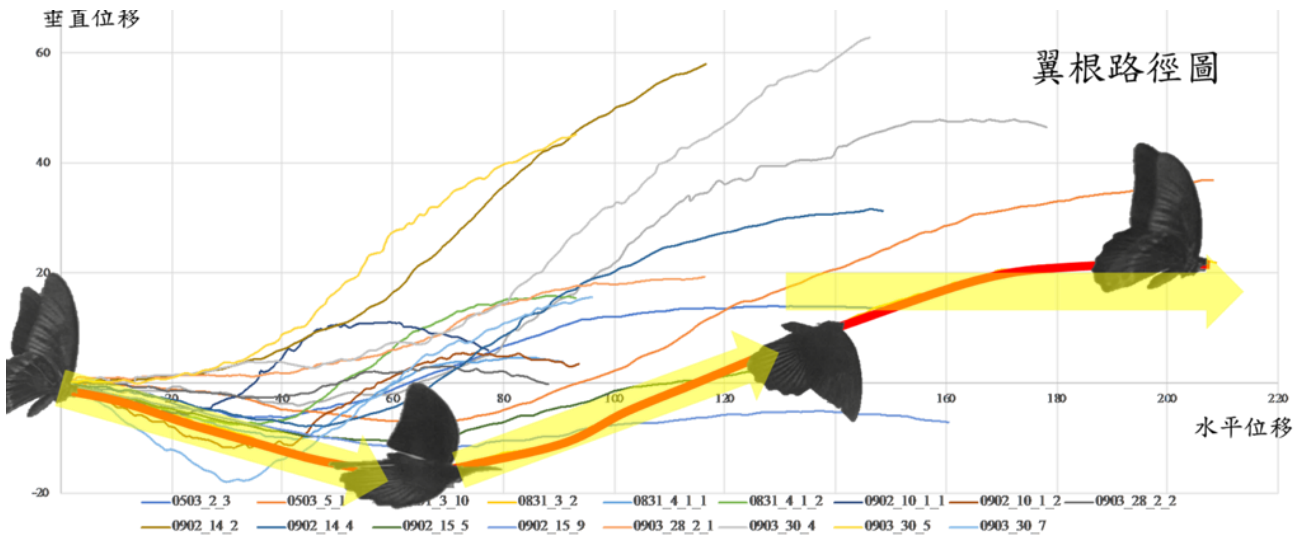
ID	n	breed	DSP	θ_{ob}	Vx	A	S	Re	f	AR	M	P _w	J	Φ_{abd}	$\theta_{maxflap}$	Φ
0503_2_3		端紅蝶	60.7	5.2	1.4	1311	42	3e+3	9.3	1.3	0.23	0.18	0.52	87.7	74.7	138.7
0503_5_1		小紋青斑蝶	62.6	10.1	1.8	1884	54	4e+3	8.7	1.6	0.32	0.17	0.60	38.4	86.2	107.5
0831_3_10		大鳳蝶	61.9	14.7	1.4	4800	70	6e+3	7.9	1.0	0.50	0.10	0.47	47.2	64.9	113.7
0831_3_2		大鳳蝶	67.2	6.0	1.7	4800	70	7e+3	8.0	1.0	0.50	0.10	0.47	58.6	76.0	126.9
0831_4_1	1	小姬紋青斑蝶	63.9	2.5	0.8	1900	40	3e+3	9.3	0.8	0.12	0.06	0.50	44.4	58.1	60.3
0831_4_1	2	小姬紋青斑蝶	71.2	9.5	0.9	1900	40	3e+3	9.6	0.8	0.12	0.06	0.52	40.1	66.3	50.3
0902_10_1	1	黃粉蝶	47.6	4.5	0.8	390	22	9e+2	9.7	1.2	0.05	0.12	0.50	45.0	94.6	122.9
0902_10_1	2	黃粉蝶	52.9	2.4	0.9	390	22	1e+3	9.6	1.2	0.05	0.12	0.55	48.8	93.8	129.7
0902_14_2		無尾白紋鳳蝶	62.2	26.5	1.4	1240	47	2e+3	12.2	1.8	0.26	0.21	0.53	42.1	67.4	91.5
0902_14_4		無尾白紋鳳蝶	55.3	11.9	1.6	1240	47	3e+3	10.6	1.8	0.26	0.21	0.47	68.2	88.0	107.3
0902_15_5		紅紋鳳蝶	70.0	1.3	1.7	2200	50	5e+3	12.5	1.1	0.29	0.13	0.61	38.4	74.9	72.0
0902_15_9		紅紋鳳蝶	67.1	-2.5	1.9	2200	50	5e+3	11.8	1.1	0.29	0.13	0.64	34.1	72.0	81.9
0903_28_2	1	小紫斑蝶	57.9	9.5	1.2	1400	48	2e+3	10.5	1.6	0.37	0.26	0.53	11.6	97.7	72.3
0903_28_2	2	小紫斑蝶	62.4	-0.2	1.0	1400	48	2e+3	11.8	1.6	0.37	0.26	0.44	25.7	97.1	70.1
0903_30_4		小紋青斑蝶	70.2	23.2	1.4	1570	54	3e+3	9.6	1.9	0.26	0.16	0.53	48.7	88.8	97.3
0903_30_5		小紋青斑蝶	54.3	25.9	1.0	1570	54	2e+3	10.6	1.9	0.26	0.16	0.42	61.7	64.2	69.2
0903_30_7		小紋青斑蝶	67.9	6.3	1.8	1570	54	3e+3	12.3	1.9	0.26	0.16	0.49	53.1	88.4	92.3
		average	62.0	9.2	1.3	1869	48	3e+3	10.3	1.4	0.26	0.15	0.52	46.6	79.6	94.4
		minimum	71.2	26.5	1.9	4800	70	7E+3	12.5	1.9	0.5	0.3	0.6	87.7	97.7	138.7
		maximum	47.6	-2.5	0.8	390	22	9E+2	7.9	0.8	0.0	0.1	0.4	11.6	58.1	50.3
		unit	%	°	m/s	mm ²	mm	1	Hz	1	g	kg/m ²	1	°	°	°

表四：名詞解釋，表中皆為一次完整振幅（即拍翼角之兩波峰之間）之數值

代號	中文	定義	代號	中文	定義
T	週期	period	S	翼展（僅單邊）	wing span
Dy	垂直位移	Vertical displacment	Re	雷諾數	Reynolds number ($\frac{\rho \bar{c} \cdot V_x}{\mu}$)
ρ	空氣密度	air density (27°C, =1.176 kg/m ³)	f	頻率	1/T
\bar{c}	平均弦長	Mean chord lenth ($\frac{S^2}{A}$)	AR	展弦比	aspect ratio ($\frac{S^2}{A}$)
μ	黏度	Dynamic viscosity (27°C, =1.8538e5)	M	重量	butterfly mass
DSP	下拍佔比	down stroke time/T	P _w	單位翼面負重	wing loading M/2A
Dx	水平位移	horizontal displacement	J	推進比	Anvance ratio ($\frac{V_x}{wing\ speed}$)
θ_{ob}	爬升角	atan(Dy/Dx)	Φ_{abd}	腹部角振幅	abdomen angle amplitude
Vx	平均水平速率	Dx/T	Φ	拍翼振幅	flapping angle amplitude
A	翼面積	wing area (one side only)	$\theta_{maxflap}$	最大拍翼角	max flapping angle



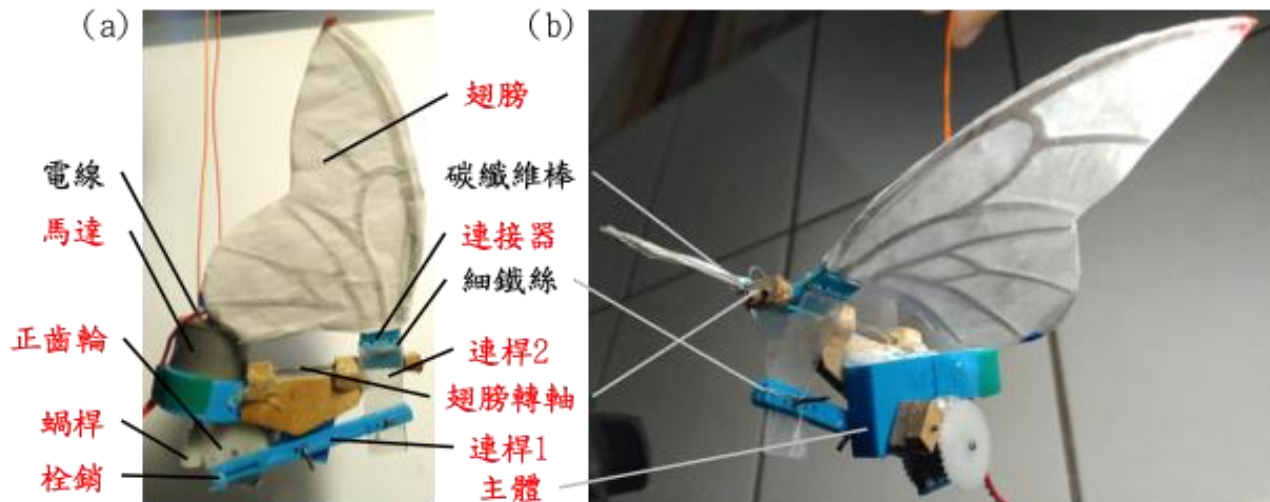
圖二十六：18組蝴蝶飛行動態之拍翼角、腹部角、仰角、攻角隨時間的變化



圖二十七：翼根路徑圖

(二) 設計製作拍翼機

於前述蝴蝶動態拍攝中，本研究選擇體型最大、拍翅相對緩慢的大鳳蝶作為拍翼機設計之參考對象。經過六代的版本，以及無數次的改良，製作出能符合大鳳蝶拍翼模式的拍翼機。



圖二十八：拍翼機右側視圖(a)及左前視圖(b)

表五：拍翼機各部位之詳細資料

名稱	解釋
主體	使用atom 3D印表機、藍色PLA線材印製，輔以密集板製作而成；此結構在第二代拍翼機時已定型，觀察第四代拍翼發現鄭齒輪轉動時會造成主體扭曲。於是在第五代拍翼機時為求更穩定之結構，將翅膀轉軸改為斜向固定設計，並將連桿1之轉軸部分增厚。
馬達	小型直流馬達，於光華商場購得。標示使用電壓為6 V。約重20 g，佔總中2/3。
蝸桿	模數0.5、孔徑1.9 mm、外徑6 mm之塑膠蝸桿，於光華商場購買。
正齒輪	模數0.5、36齒、厚1.5 mm之塑膠製正齒輪，第五代之後的拍翼機才使用此規格。於距離軸心7 mm處打一個孔徑1 mm的洞，作為栓銷固定之用，原先苦惱如何打出如此小的洞，因為能取得的最小鑽頭仍然太大，後來突發奇想以縫紉用的針作為鑽頭才成功打出與栓銷緊配的孔洞。
栓銷	為一直徑1 mm之碳纖維棒，與正齒輪之軸心距離7 mm。
連桿1	與本體為相同材質，使用迴紋針作為轉軸。
連桿2	使用麥拉片裁減而成，下端夾在連桿1中間並以碳纖維棒貫穿作為固定轉軸，上端則使用膠帶環繞細鐵絲作為轉軸。
翅膀轉軸	使用迴紋針作為軸棒。
連接器	PLA 3D列印印製而成，原先cad供夾緊翅膀之凹槽因列印誤差導致薄薄的凹槽開口處擴大，成為一個V自行的凹槽，不過倒也剛好足夠讓後續加強結構之碳纖維棒固定。第四、五代加工木材作為翅膀轉軸與碳纖維棒之連結器，第六代為配合印製的翅脈，改為3D列印。
翅膀	翅脈使用PLA 3D列印製成，厚0.3 mm，翼面使用兩片薄紙夾在翅脈兩側並以膠水黏合。實際拍翅後發現翼根附近的剛性不足，倒置高速振翅下行彎曲過大，因而在翼前緣加裝長度為一半翼展之0.5 mm碳纖維棒。第五代以前皆是第六代改成使用以大鳳蝶翅膀為模仿對象之翅膀。於翼尖畫上紅色標記、翼後緣畫上藍色標記以利標點。
潤滑膏	使用印表機用之潤滑膏。此為在第六代才增加的元素，效果相當不錯，第五代便是因為齒輪磨耗過大而遇到瓶頸，遲遲無進展，第六代使用潤滑膏後，不再需要

持續更換磨損的齒輪，然而高速旋轉下油膏會漸漸被甩出而減少，因此經過幾次拍翼便須補充，以確保齒輪接觸面的潤滑。

細鐵絲 從鐵紗網抽出鐵絲而得。

(三) 觀察拍翼機的拍翼動態與流場

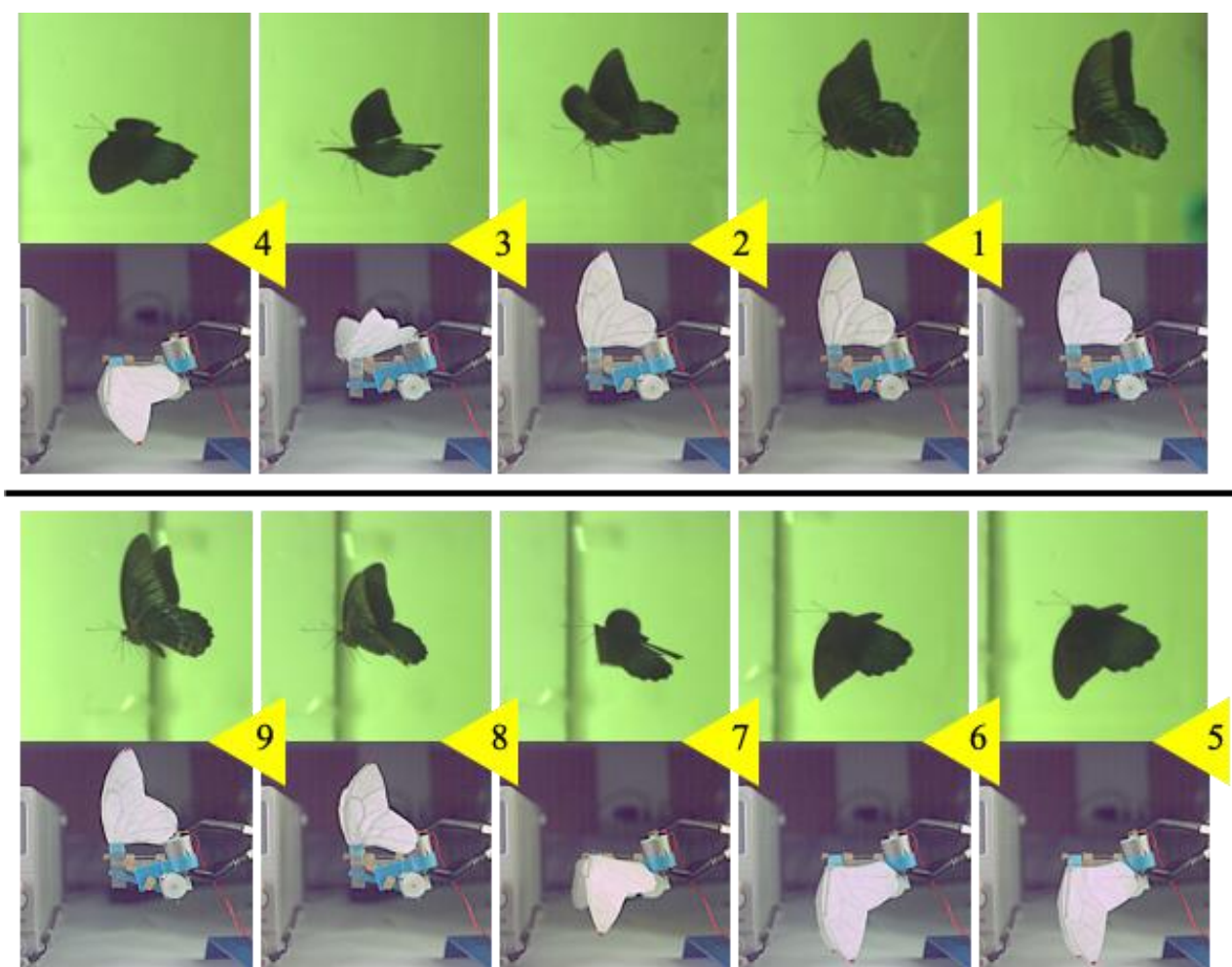
1、拍翼機之拍翼動態

當電壓為15 V時雖下拍時間比符合真實蝴蝶，且當電壓增加到20 V時，下拍佔比降到57%，為，然而隨著電壓上升DSP並沒有持續下降，反而上升。

20 V供電下產生的頻率較接近參考對象大鳳蝶之拍翼頻率，卻產生較低的下拍佔比。雖然此頻率下的下拍佔比偏離大鳳蝶的下拍佔比最多，卻已相當接近，僅相差5%。拍翼振幅則超過160°。

表六：拍翼機之拍翼動態數據

V	P	f	DSP	Φ
15 V	1.6 W	5.9 Hz	62.7 %	160°
20 V	3.1 W	8.0 Hz	56.9 %	160°
25 V	4.9 W	9.3 Hz	58.0 %	170°
27 V	6.1 W	10.0 Hz	62.0 %	170°



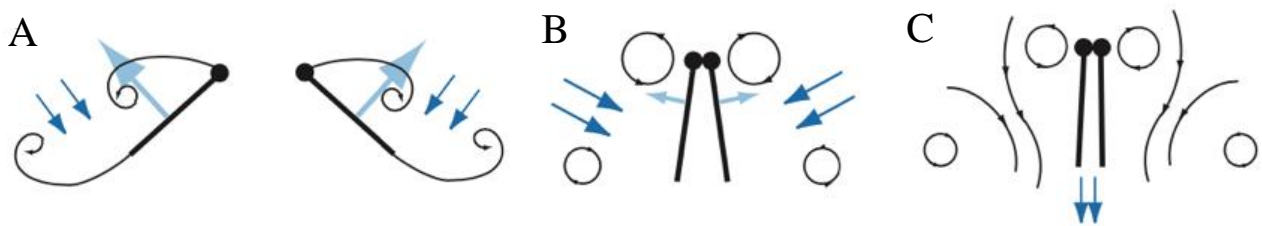
圖二十九：大鳳蝶與拍翼機之拍翼時序圖，圖中各畫格之間相隔1/9週期
(蝴蝶之數據取用0831_3_10, T=126 ms, DSP=62%；拍翼機數據取用20V, T=125 ms, DSP=57%)

2、拍翼機之流場不同

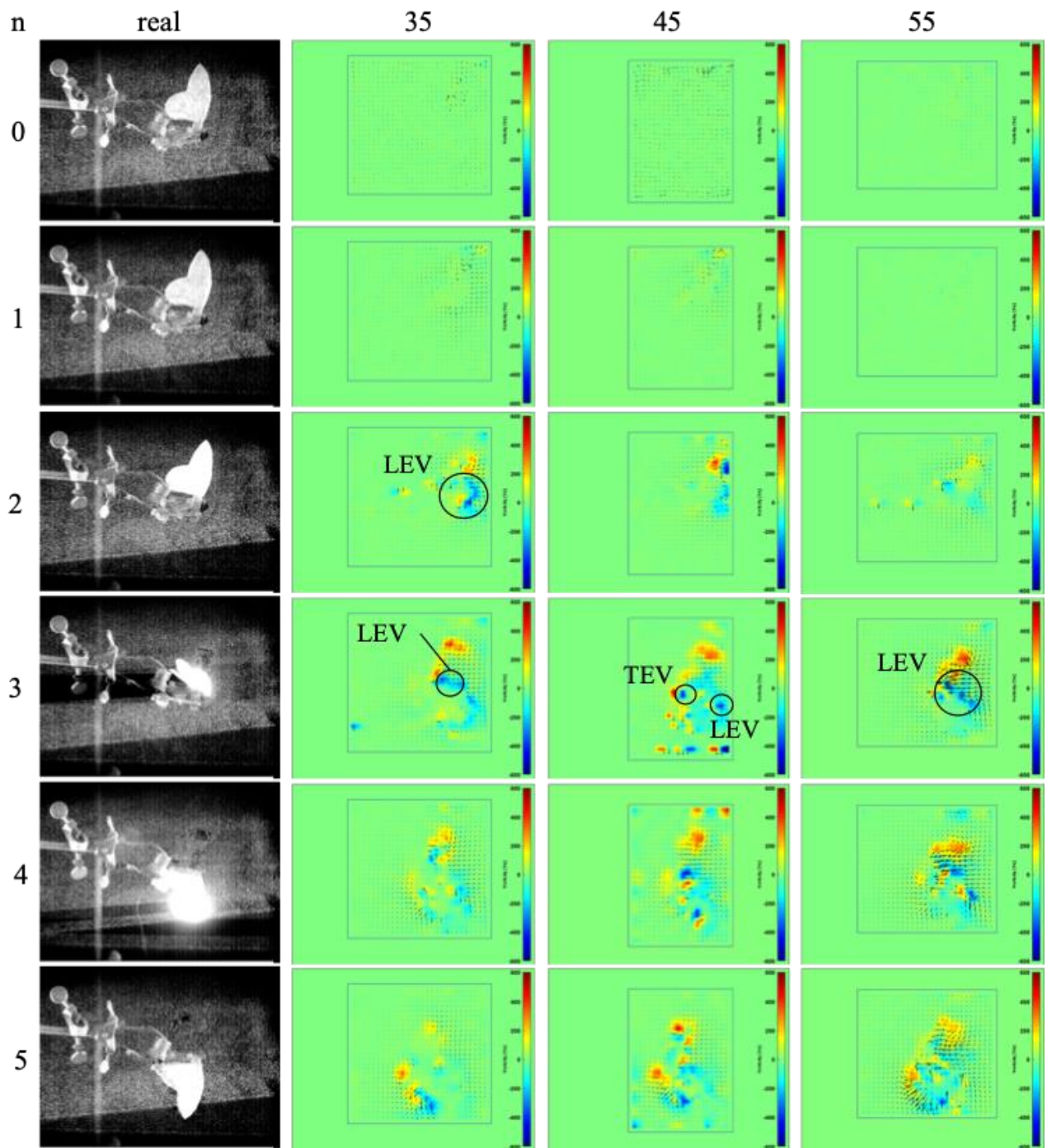
圖三十一及圖三十二為頻率8 Hz、下拍佔比61%的拍翼機之流場時序圖，第一排為投入PIVlab分析的原圖，右邊三排則是經過分析得到的渦度及流速圖，由左至右分別為距離翼根3, 5, 45, 55 mm的平面流場分析，其中紅色渦度為正藍色為負，一渦旋若順時針旋轉其渦度為正。最右側的數字為搭下時間除以週期再乘以11而得，以下以n代稱之。

許多研究指出翼前緣渦(Leading Edge Vortex, LEV)旋貼附為昆蟲飛行時之一重要元素，其有穩定氣流的效果而使其得以以高攻角飛行卻不失速(Percin, 2015; Shyy, Aono, Kang, & Liu, 2013)，翼前緣渦旋穩定貼附亦有增加升力之作用，其會於翅膀上方形成一低壓區使翅膀上下壓力差增大，進而提升升力。由圖三十一中n=2, 3的渦旋圖可見翼前緣確實有一有穩定的逆時針渦旋。

當 $n=11$ 時，一次的拍翼週期結束，此時拍翼機的雙翅之翼前緣首先碰觸，翼後緣隨之併攏，此動作稱為夾翼，此時雙翼之間的氣流被擠壓而向外流出，產生一強勁的噴流，進而提供強大的推力(Sane, 2004)，於圖三十二中 $n=11$ 的渦旋與氣流向量圖可見翅膀上拍後於翅膀後方有一朝拍翼機後上方之強大氣流，本實驗中之拍翼機拍翼時固定於原地，因此產生之氣流偏向上方而無法提供升力，然而蝴蝶在飛行時會透過腹部改變其重心，進而使上拍時拍翼軸之仰角增加，此噴射氣流因此轉向後下方，提供強勁的推力與升力。夾翼動作雖能產生強大的推力，然而有使用此機制的昆蟲並不多，可能是因為高速振翅下使翅膀相撞容易使翅膀損壞，而蝴蝶之振翅頻率較低，因此使用此機制。

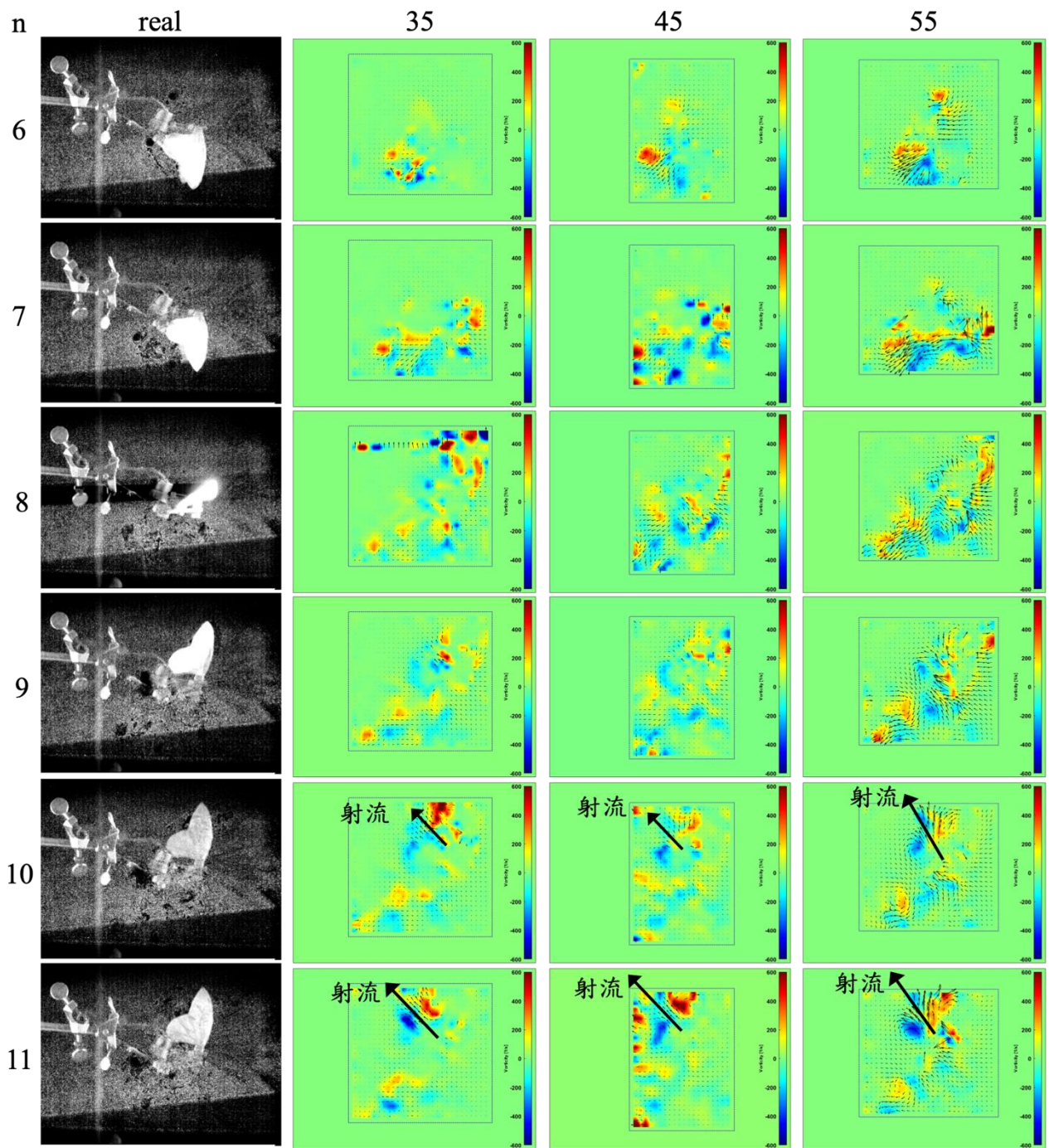


圖三十：夾翼機制之示意圖(Sane, 2004)

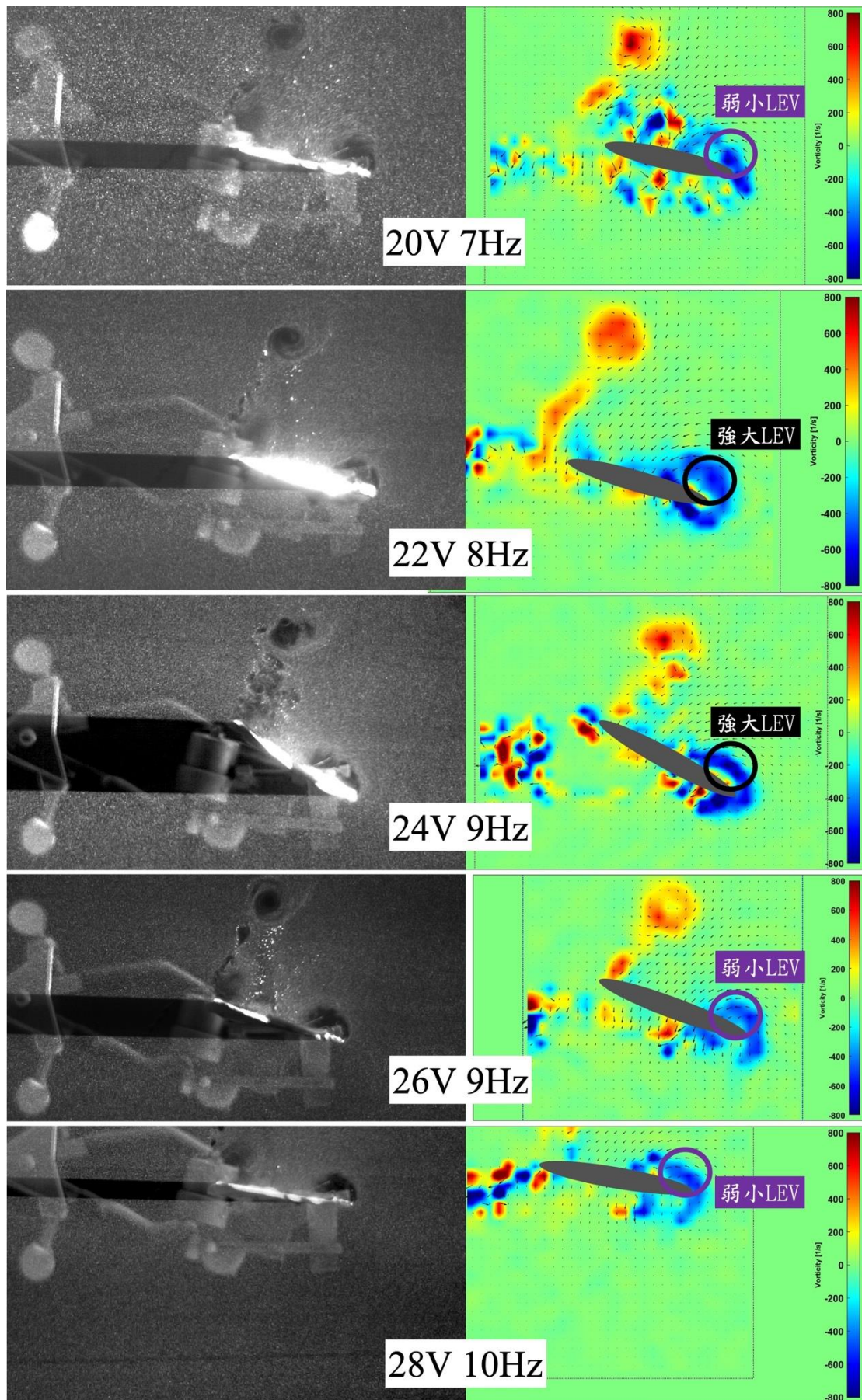


圖三十一：拍翼機之流場時序圖（ $f=8$ Hz, DSP=61 %）

（第一排為原始圖像，剩下三排由左至右分別為距離翼根35、45、55 mm 的平面之流場與渦度圖，越紅代表順時針渦度越強，越藍代表逆時針渦度越強）



圖三十二：接續上圖（圖三十一）



圖三十三：拍翼機在不同頻率下之流場（左為原始影像、右為渦度流場圖，越紅代表順時針渦度越強，越藍代表逆時針渦度越強）

3、拍翼機在不同頻率下之流場

本研究使用相同的拍翼機供給22, 24, 26, 28 伏特的電壓並分別進行流場分析，結果如圖三十三所示。由結果可以發現拍翼機在拍撲過程中都有良好的翼前緣貼附，然而拍頻越高貼附的效果並不一定越好，當頻率約為8 Hz時（22, 24 V）貼附的效果最顯著，渦旋的強度最強，而此頻率正是模仿對象大鳳蝶的拍撲頻率。

當頻率高過適當的數值，速度太快會導致流場凌亂且破碎而無法長出穩定且大的渦旋。

由此實驗，透過流場觀察翼前緣貼附現象可以知道，蝴蝶的拍翅頻率已在漫長的演化之路中最佳化，若要以蝴蝶為基礎製作仿生拍翼機，除了翅形、體重，拍翅頻率也必須納入考量，應使用最適當的頻率，也就是蝴蝶本身的拍頻。

五、結論

本研究以仿生微飛行器為出發點，以蝴蝶為仿生對象，期望妥善發揮其低振翅頻率、高靈敏度等優點，以此製作拍翼機並討論其流場。

本研究首先對蝴蝶進行動態分析，總共分析17組完整拍翅週期，其中包含8種蝴蝶且大部分為鳳蝶與斑蝶。拍攝並追蹤翼根、翼尖、翼後緣與尾端以進行動態分析，結果顯示前飛的蝴蝶的振翅頻率平均為10 Hz、下拍時間約為上拍的兩倍、前飛速率平均為1.3 m/s、拍翅震幅平均為94°、腹部角之震幅平均為46.6°、展弦比平均為1.4。並可總結蝴蝶的飛行策略為下拍時向下拍翅產生向上的升力，上拍時透過仰角的拉升而向後拍翅產生向前的推力，而其仰角的改變為透過腹部的擺動調整重心使然。

接著，選取大鳳蝶為拍翼機設計之藍圖，大鳳蝶體積較大、拍翅頻率較低在製作上較容易，且其雷諾數相對高，偏向層流狀態，方便流場分析。經過一系列嘗試與改良，製作出與大鳳蝶拍翼相符合的拍翼機，符合前面所觀測之大鳳蝶的拍翅頻率、振幅、上下拍時間比，使用的翅膀亦與大鳳蝶相同。

最後，使用PIV流場可視化技術解析拍翼機拍翅時之流場變化，觀察流場圖可發現翼前緣渦旋貼附現象及夾翼所造成的強勁噴流；拍撲頻率越高並不一定能產生更大的升力，每一種蝴蝶有期最適當的拍撲頻率，過快或過慢都會造成翼前緣渦旋貼附的現象減弱，進而使升力與穩定度下降。

六、未來展望與應用

本研究已完成與大鳳蝶之拍翼相當吻合的拍翼機，並分析其流場。以下條列未來可進行之延伸研究與應用：

- ❖ 針對更多不同種類的蝴蝶進行動態分析，探討不同種類蝴蝶的飛行策略。
- ❖ 探討蝴蝶使用什麼機制改變飛行軌跡如前飛、爬升、懸停、旋轉等。
- ❖ 設計機構探討拍翼機在不同俯仰動作下之流場及所產生之空氣動力。
- ❖ 主動控制拍翼機軌跡與俯仰以複製蝴蝶的飛行動態，以此彌補蝴蝶飛行之不可再現性，幫助細究其飛行時之空氣動力。
- ❖ 減輕蝴蝶重量與改善重心以促使其自由飛行。
- ❖ 探討不同撓性的翅膀對蝴蝶飛行之影響
- ❖ 對蝴蝶的流場做定量分析。

本研究旨在為未來為飛行器之發展提供參考與依據，而微飛行器之應用極為廣泛，尤其在救災時，小而輕巧的微飛行器能代替人類進入危險、狹小且複雜的空間中協助搜救。

七、參考資料

- Chen, B.-H., Chen, L.-S., Lu, Y., Wang, Z.-J., & Lin, P.-C. (2016). Design of a Butterfly Ornithopter. *Journal of Applied Science and Engineering*, 19(1), 7-16. doi:10.6180/jase.2016.19.1.02
- Fei, Y.-H. J., & Yang, J.-T. (2016). Importance of body rotation during the flight of a butterfly. *Physical Review E*, 93(3), 033124. doi:10.1103/PhysRevE.93.033124
- Fujikawa, T., & Kikuchi, C.K. (2019). Development of a butterfly-style flapping robot with a posture control mechanism by varying the ratio of down and up stroke times. *Journal Of Japan Society For Design Engineering*, 54(3), 199-210. doi:10.14953/jjsde.2018.2797
- Percin, M. (2015). *Aerodynamic Mechanisms of Flapping Flight*. Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4d535d87-d11e-4916-9143-5e6762c56152>
- Sane, S. (2004). The aerodynamics of insect flight. *The Journal of Experimental Biology*, 206, 4191-4208. doi:10.1242/jeb.00663
- Shyy, W., Aono, H., Kang, C.-K., & Liu, H. (2013). *An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tanaka, H., & Shimoyama, I. (2010). Forward flight of swallowtail butterfly with simple flapping motion. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(2), 026003. doi:10.1088/1748-3182/5/2/026003
- Yang, L.-J. (2012). The Micro-Air-Vehicle Golden Snitch and Its Figure-of-8 Flapping. *Journal of Applied Science and Engineering*, 15(3), 197-212. doi:10.6180/jase.2012.15.3.01

【評語】 100017

本作品以仿生微飛行器為出發點，以蝴蝶為仿生對象，以影像辨識技巧，取得大鳳蝶的飛行動態資訊，再透過拍翼機設計製作與飛行進行流場與動態分析。依照 17 組實驗設計與成果已趨近於吻合大鳳蝶的飛行動態，倘若能夠模擬亂流風向之飛行動態，將更能說明仿生作品之延伸應用。此研究非常符合探究與實作精神，建議作者持續研究，改善精進，讓作品更完整。