

2016 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160031

參展科別 物理與天文學

作品名稱 蝴蝶體型與翅形對飛行姿態與飛行效能之
影響

得獎獎項 大會獎：四等獎

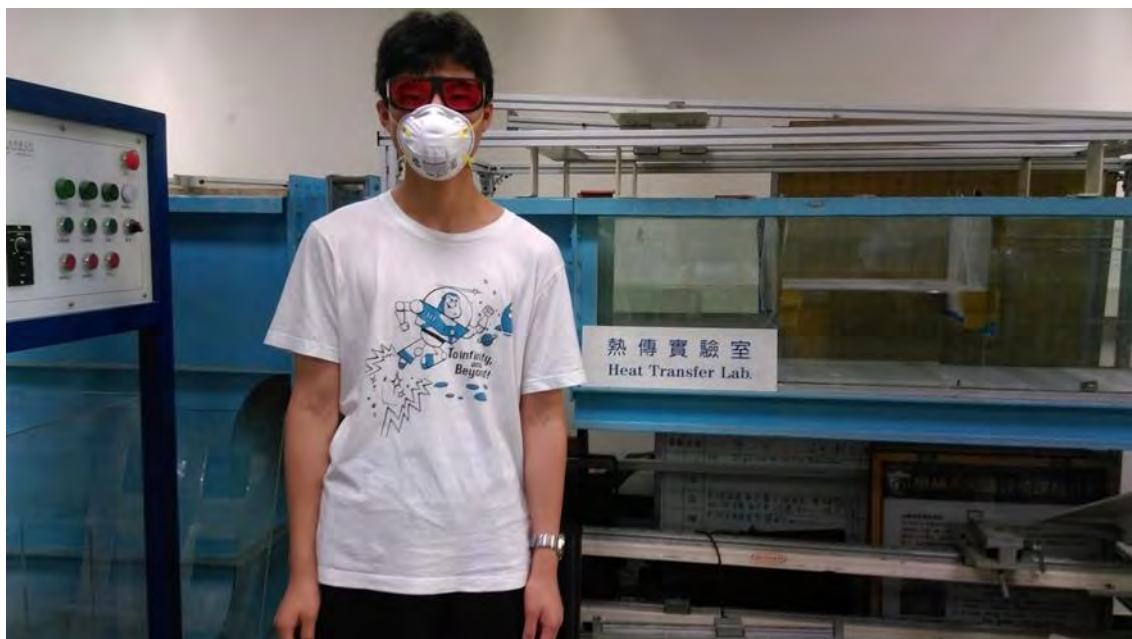
就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 張良肇、馮愛蓮

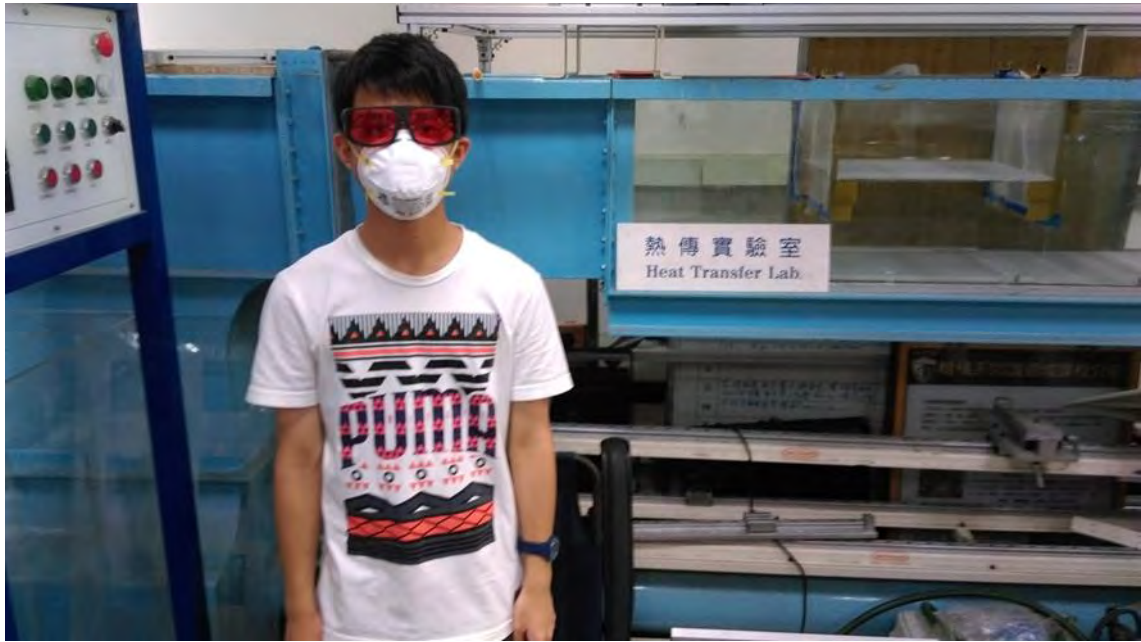
作者姓名 張耕銘、陳俊仲

關鍵字 蝴蝶、流場可視化(PIV)、拍撲

作者簡介



我是張耕銘，目前就讀麗山高中二年級。好奇心強，喜歡胡思亂想，因此常常能想出一些怪點子，或是一些新奇的想法。因為我國中時就對科學有著極高的興趣與好奇，所以我就努力考上了有著科學高中名號的麗山高中，並且考上了麗山的數理資優班，也因此開始了我的專題研究。我從高一就開始全心全力的開始做這個專題，到現在，已經花了整整一年的時間，一路上披荊斬棘，終於有了成果。



我是陳俊仲，現在就讀麗山高中二年級。專長是數理科，尤其是數學，不過我常常在計算上粗心而錯誤。我很喜歡科學，所以選填志願時選擇麗山高中。對數學也很有興趣，因此考上了麗山的數理資優班。最後我選擇了物理專題，開始研究蝴蝶飛行的研究。我們的研究通過了青少年人才培育計畫，也通過了國際科展初試，希望在複試上也會有很好的表現。

摘要

本研究透過高速攝影機與流場可視化技術拍攝不同體型蝴蝶在自由飛行時之流場與飛行姿態，並分析不同蝴蝶體型、拍撲頻率與飛行姿態上之關係。相較於人類的發明的飛行器，蝴蝶的飛行更加的複雜、省力且優美，其主要原因為蝴蝶以拍擊翅膀產生渦漩來達到巧妙的飛行操控；由蝴蝶飛行流場發現，蝴蝶在飛行時會不斷的改變身體角度來控制渦漩環產生的方向，下拍時主要產生向下的渦漩環，蝴蝶此時主要產生向上升力；而上拍時蝴蝶產生往後的渦漩環，並藉此產生推力，透過此特殊的動力產生方式，蝴蝶飛行軌跡呈現類似 Z 字形。進一步透過研究不同種類的蝴蝶飛行發現，不論體型大小之蝴蝶，其翅膀單位面積之負重比皆落在 $0.01\sim 0.02\text{ g/cm}^2$ 之間，且當蝴蝶體型被放大時，可以較低的拍撲頻率進行飛行，然而飛行軌跡變化則較劇烈，此研究之成果可做為未來拍撲微飛行器尺寸設計之依據。

Abstract

This study experimentally analyzes the flight performance of butterflies in different sizes via the high speed camera and flow visualization technique. Compared to the man-made aircraft, the flying of butterflies are more complex, efficiency and graceful. Flapping the wings in the air, butterflies generate the vortex rings in each flapping stroke. From our results, it was observed that butterfly control the angle of the body during flight, and create the vortex rings into different directions. Butterflies flap their wings downward and create lift force during downstroke. In upstroke, butterflies clap their wings backward and create a thrust force. The unique aerodynamic force generated lead to the flight trajectories of butterflies are similar to the Z shape. By analyzing the flight dynamic of different butterflies, the results further indicate that the wing loading of all butterflies falls between $0.01 \sim 0.02\text{ g/cm}^2$. The large butterflies can generate enough lift force with smaller flapping frequency, however, the variations of the flight trajectory is significant in the flight of large butterflies. This results revealed in this study could be valuable to the MAV (micro aerial vehicle) designing in the future.

一、前言

自然界中，生物透過數千萬年物競天擇的演化，發展出各式各樣的器官或行為來適應惡劣的生存的環境，然而，所有的飛行生物皆不約而同地採用「拍撲」作為在空氣的中移動的方式，相較於人類發明之飛行器，拍撲飛行潛在的優點一直是科學家們感興趣的問題。在飛行生物中，蝴蝶展現優美的飛行姿態，且在飛行時能進行優良的飛行操控，再加上較低的拍翅頻率，蝴蝶之飛行被認為是微飛行器(micro aerial vehicle, MAV)設計上優良的典範，然而蝴蝶的種類繁多，個體間在翅型、大小上的差異甚大，這些差別可能導致飛行行為及空氣動力學上的差異，因此本研究期望透過了解不同種的蝴蝶在飛行時姿態與流場之差異，本研究利用拍攝蝴蝶飛行時的 PIV 來研究飛行時的姿態與周圍的流場，並利用 Insight3G 軟體來計算蝴蝶飛行時的流場變化。結合蝴蝶的姿態變化、飛行流場、翅膀大小、身體重量、拍翅頻率及蝴蝶種類等變因，推算出這些變因如何影響蝴蝶的飛行，以了解蝴蝶的飛行原理，也可做為未來製做微飛行器的參考。

二、研究目的

飛行器的飛行方式大致上分為三種，分別是定翼式、旋翼式、與拍撲。但是定翼飛行需要龐大的體積，因此無法應用於微飛行器。旋翼好控制，卻會消耗很多能量。在大自然中，有許多飛行動物，而且大部分的飛行動物都是以拍撲做為飛行方式。這些動物的體積不大，因此我們認為以拍撲做為飛行方式可以使微飛行器達到體積小且耗能少的狀態。而為甚麼我們選擇蝴蝶做為我們的研究對象呢？因為蝴蝶是所有昆蟲中拍翅頻率最低的，比較符合現代馬達可以承受的範圍。而我們研究的結果也就是各項變因與飛行的關係，可以提供我們日後製作微飛行器參數的參考。

優缺點 飛行方式	優點	缺點	適不適用做微飛行器
定翼式	飛行器最普遍的飛行方式	1. 操控性不佳 2. 需要較大體積	不適用 原因：1. 定翼式飛行器無法在體積小時飛行 2. 定翼式飛行器操控性不佳
旋翼式	操控性佳	1. 飛行速度慢 2. 消耗能量多	不適用 原因：微飛行器能源問題
拍撲	1. 操控性佳 2. 可利用渦流節省能量	拍撲飛行器不普遍	適用 原因：飛行昆蟲就是拍撲微飛行器最好的典範

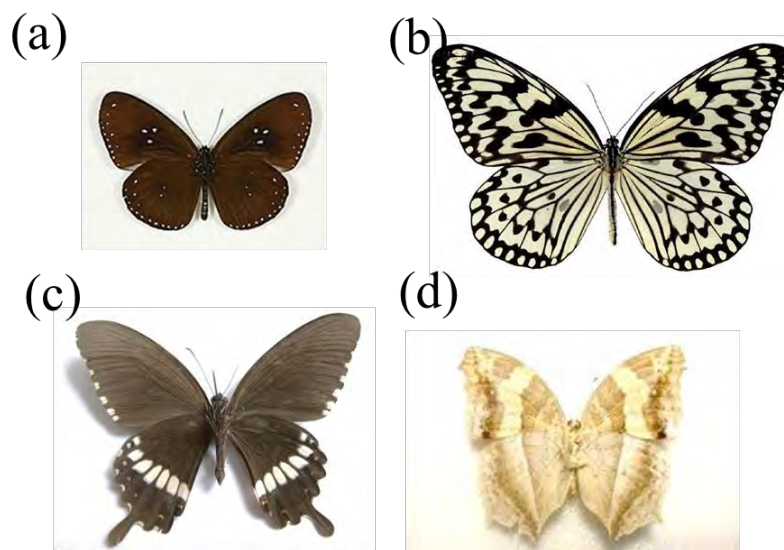
(表一). 飛行方式優缺點比較表

三、研究方法與過程

(一)、蝴蝶幾何、重量及拍撲頻率之量測

1. 實驗物種介紹

為了比較不同尺寸之蝴蝶在飛行表現上之差異，本實驗採用以下四種蝴蝶作為實驗對象(如圖一)，分別為(a)紫斑蝶(b)大白斑蝶(c)玉帶鳳蝶及(d)枯葉蝶，其中，紫斑蝶體型最小，拍翅頻率較快；而大白斑蝶為四者中體型最大、拍翅頻率最慢；玉帶鳳蝶體型及拍翅頻率皆為中等，且翅膀尾端有凸出；枯葉蝶體型中等、而拍翅頻率為四者中最快。



(圖一). 實驗物種 (a)紫斑蝶(b)大白斑蝶(c)玉帶鳳蝶及(d)枯葉蝶

2. 量測重量

由於購買來的蝴蝶為活體，因此不能直接量測蝴蝶之體重，於是我們先把蝴蝶和包裝紙至於電子秤(precisa XS3250c)上一起量測重量(如圖二)，然後再扣除包裝紙的淨重量來得到蝴蝶的體重。

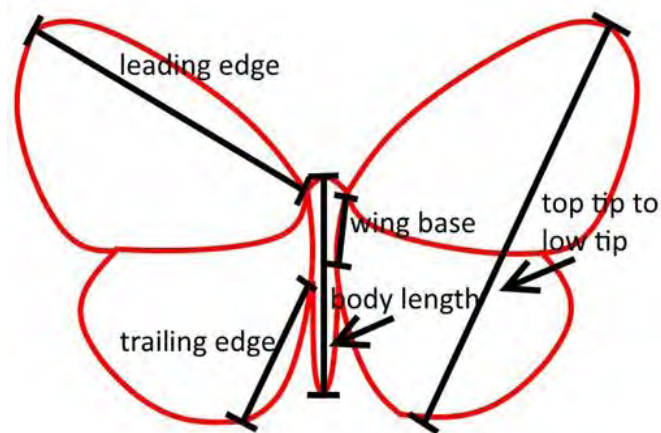


(圖二). 蝴蝶重量量測過程

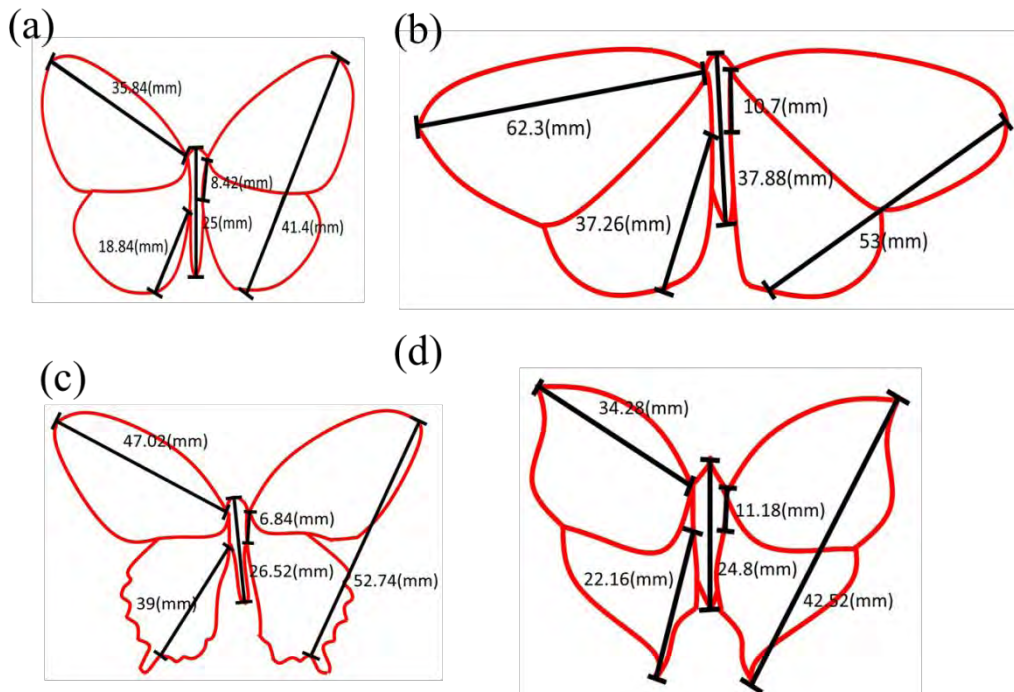
由量測結果可得到:紫斑蝶的平均體重為 0.16 g，大白斑蝶的平均體重為 0.42 g，玉帶鳳蝶的平均體重為 0.29 g，枯葉蝶的平均體重為 0.24 g。

3. 翅膀大小之估計

如圖三所示，先找出蝴蝶翅膀上的翼前緣、翼後緣、前翅根、後翅根，並連線，得出兩個四邊形，再算出邊長。分別為 leading edge(翼前緣到前翅根)、wing base(前翅根到後翅根)、trailing edge(後翅根到翼後緣)、top tip to low tip(翼前緣到翼後緣)，四個長度，再把這些長度代入海龍公式 $\sqrt{(S-a)(S-b)(S-c)(S-d)}$ (經測量求得其四邊形接近圓內接四邊形)，便可求出翅膀面積。



(圖三). 蝴蝶幾何特徵定義示意圖



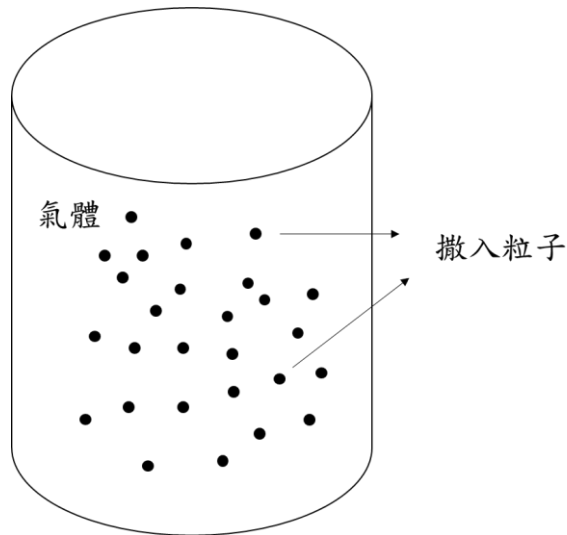
① (圖四). 四種蝴蝶翅膀測量結果示意圖

② 將這四種蝴蝶的長度代入海龍公式求得結果如下:

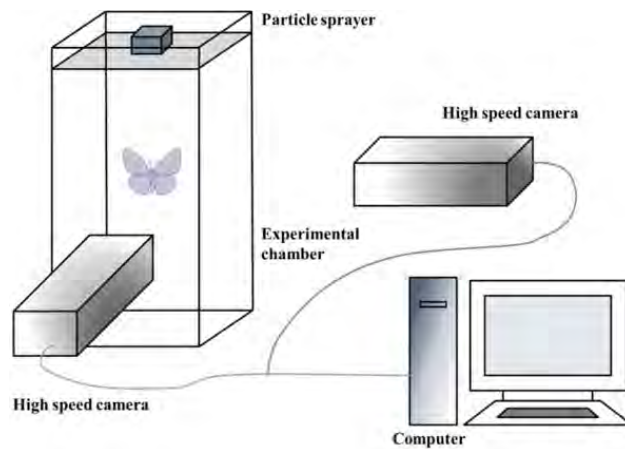
- ③ 紫斑蝶的翅膀面積約為 510.60 mm^2
大白斑蝶的翅膀面積約為 1319.73 mm^2
玉帶鳳蝶的翅膀面積約為 1073.75 mm^2
枯葉蝶的翅膀面積約為 613.89 mm^2

(二).流場可視化與粒子影響測速法

由於空氣是無色之氣體,無法直接透過肉眼觀察到蝴蝶飛行造成之氣體流動,因此流場可視化(flow visualization)技術是流體力學領域中顯示流體流動之技術,此技術之概念是在空氣中均勻的撒入重量極輕且帶反光性的粒子(下圖五所示),而當蝴蝶拍翅或移動時,會帶動周圍之懸浮顆粒一起移動,藉此即可觀察到蝴蝶飛行時產生的氣流。



(圖五). 流場可視化技術之概念



(圖六). 實驗儀器架設圖

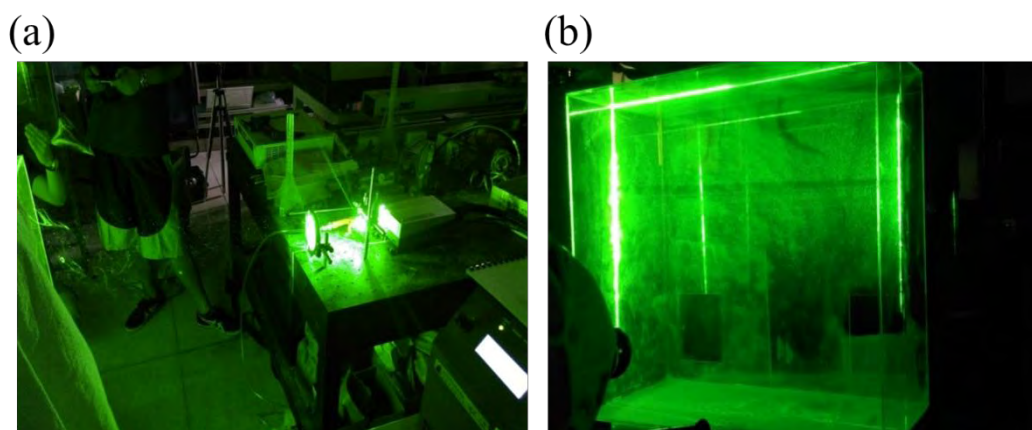
實驗架設圖如上圖六，吾人將粒子撒入實驗箱中，待粒子穩定後放入蝴蝶，並讓它在箱中自由飛行，透過高能量的雷射(7 W)通過透鏡產生一光亮的雷射頁面，能將粒子進一步凸顯出來，並利用高速攝影機以每秒一千張之速(1000 張/秒)度將蝴蝶飛行之姿態與周圍顆粒之移動拍攝下來，此技術稱為粒子圖像測速法(Particle Image Velocimetry, 簡稱 PIV)

使用材料	示蹤粒子	雷射	高速攝影機
內容	鋁粉(粒徑約 3 μm)	Physics Spectra 公司所出產 氬離子雷射(Argon ion laser)， 型號為 Stabilite 2017-AR	Phantom v310，設定解 析度為 800×600 pixels

(表二). 實驗儀器與材料內容表

實驗步驟詳述如下:

1. 首先，在實驗開始前先穿戴護目鏡，避免雷射強光造成眼睛受傷，並戴口罩避免吸入鋁粉。
2. 架設攝影機以及光路，以 7W 的雷射利用凹透鏡與分束器在壓克力箱中製造出雷射光頁(下圖七(a))。
3. 將鋁粉撒入壓克力箱中，使用壓縮空氣槍將鋁粉在壓克力箱中散布平均。待流場穩定後放入蝴蝶，並以樹枝逗弄使他飛行(下圖七(b))。
4. 當蝴蝶飛過雷射光頁時按下攝影機按鈕，錄製蝴蝶飛行之流場與姿態。
5. 等待影片存檔，並不斷重複以上步驟至各種蝴蝶皆有足夠之數據。



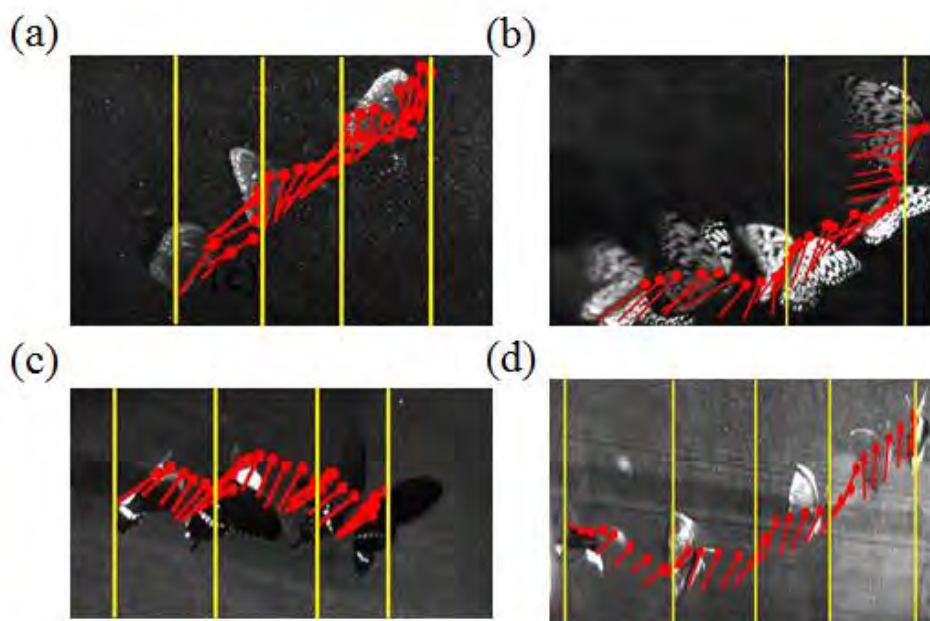
圖七. (a)凹透鏡與分束器製造雷射光頁以及(b)光幕以及高速攝影機

(三). 蝴蝶拍翅頻率之量測與疊合圖之製作

1. 蝴蝶的拍翅頻率

我們將拍攝完的蝴蝶圖片，利用疊圖畫出了蝴蝶的飛行位置變化圖。

紅色圓點為蝴蝶的頭部位置，紅色線段則是蝴蝶身體位置，黃線為蝴蝶拍翅每一週期的分隔線。根據這些圖片，我們可以求出蝴蝶的拍翅頻率。



(圖八). 四種蝴蝶之飛行疊合圖

紫斑蝶的翅頻率為 10 Hz

大白斑蝶的翅頻率為 5 Hz

玉帶鳳蝶的翅頻率為 8.3 Hz

枯葉蝶的翅頻率為 13.3 Hz

2. 蝴蝶翅膀的平均負重

為了找出蝴蝶重量、翅膀面積與拍翅頻率的關係，我們要求出蝴蝶翅膀的平均負重。

我們用的平均負重的單位為 g/cm^2

算出紫斑蝶翅膀的平均負重為 $5.106 \text{ g}/\text{cm}^2$

大白斑蝶翅膀的平均負重為 $13.1973 \text{ g}/\text{cm}^2$

玉帶鳳蝶翅膀的平均負重為 $10.7375 \text{ g}/\text{cm}^2$

枯葉蝶翅膀的平均負重為 $6.1389 \text{ g}/\text{cm}^2$

3. 量化蝴蝶 PIV

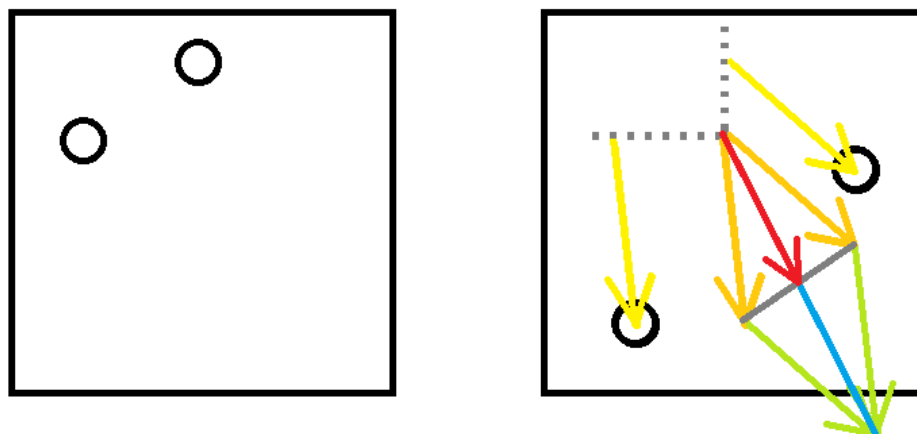
我們利用 TSI insight 3G



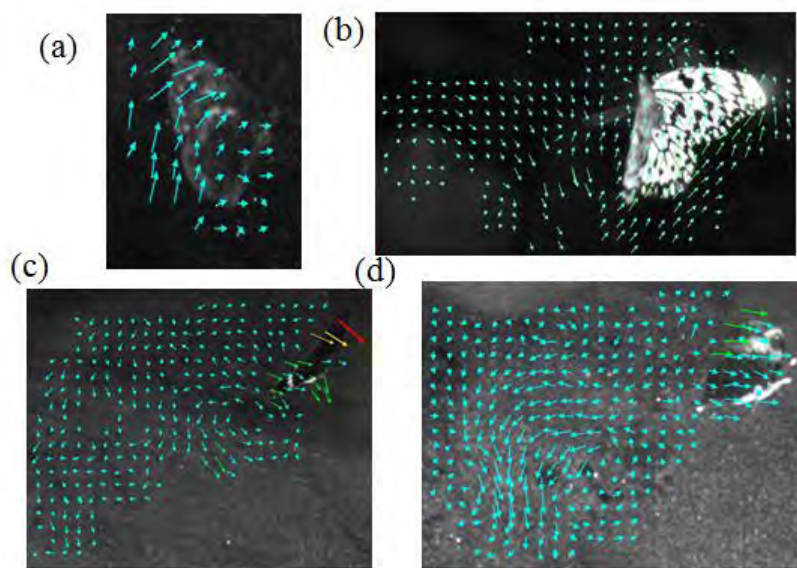
計算原理是藉由連續比對 PIV 照片上一張與下一張粉粒密度、位置的變化，來計算出蝴蝶飛行時周圍流體的速度變化。

這個程式的計算方法，就是將照片切割成非常小的方格子，並且將格子內的粉粒，

比對上一張照片的粉粒位置，求出時間內粉粒的位移。如圖，假設這個格子內有兩顆粉粒，在下一張照片時，粉粒產生了位移(如圖九亮黃色箭頭)。把兩位移向量進行和向量，便形成了代表這一格粉粒位移的平均向量(如圖紅色箭頭)。由此，便可以畫出蝴蝶的飛行流場圖形。

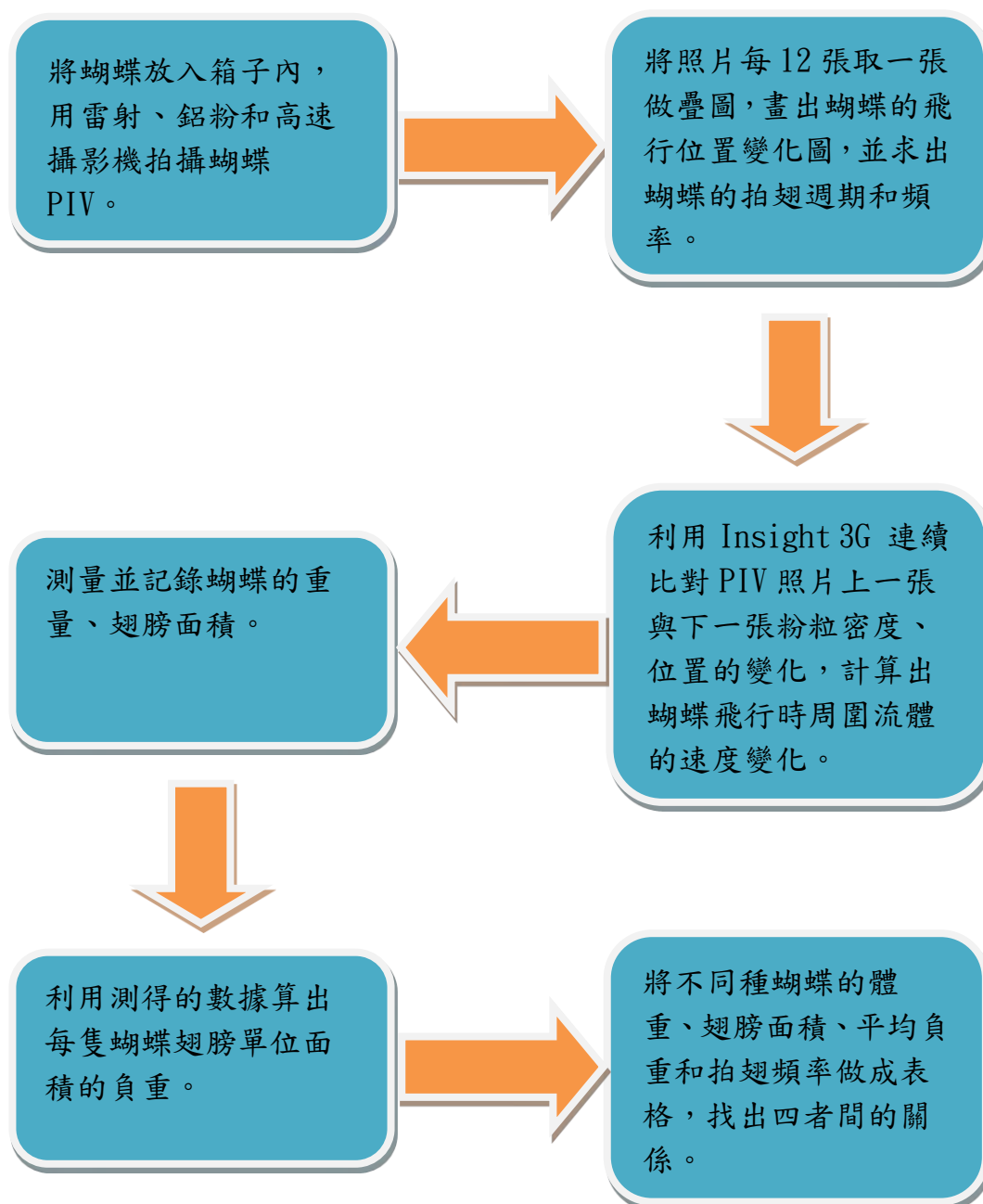


(圖九). TSI insight 3G 向量計算示意圖



(圖十). PIV 計算結果圖

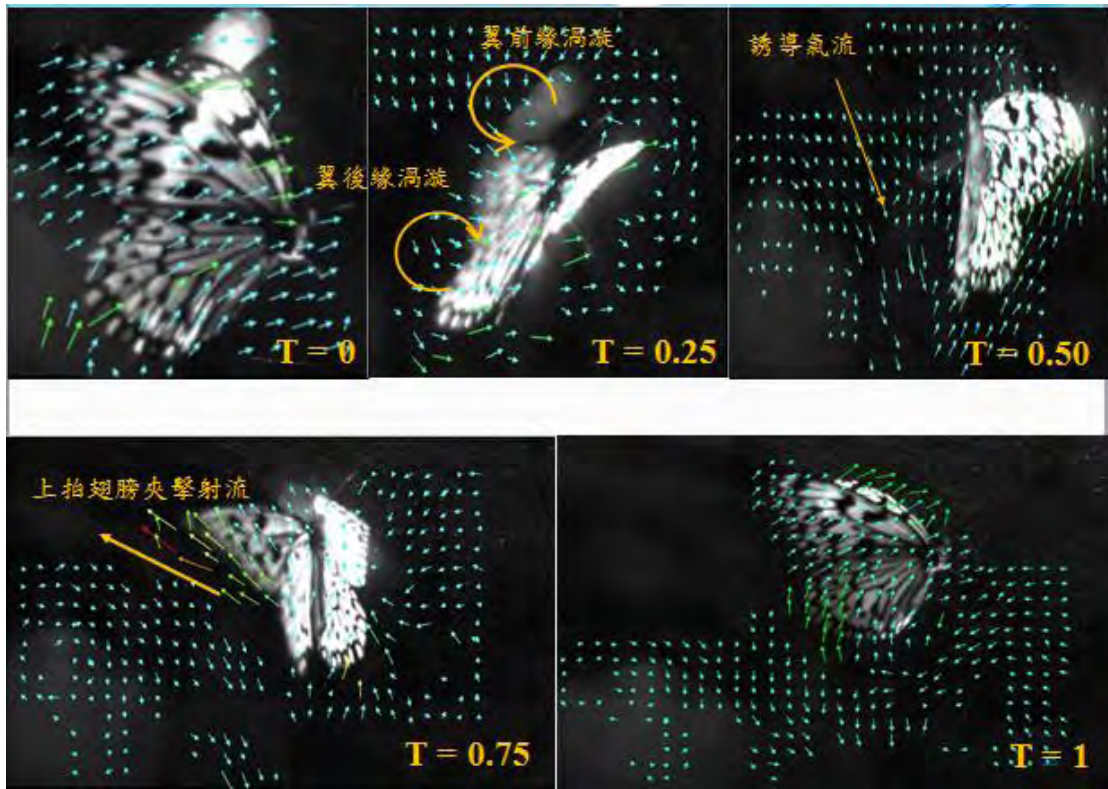
蝴蝶幾何、重量及拍撲頻率之量測之實驗流程圖



(圖十一). 蝴蝶幾何、重量及拍撲頻率之量測流程圖

四、研究結果與討論

根據我們所拍攝的蝴蝶飛行PIV照片並透過程式Insight 3G 計算出蝴蝶飛行時所產生的流場後，可得以下流場圖。(每一隻蝴蝶都有計算結果，在此僅舉一份作說明。)經過流場可視化之分析發現(圖十二)，當蝴蝶在拍翅週期 $T=0.25$ 時，由於翅膀快速的向下揮動，會使翅膀上方形成低壓區，並造成翅膀下方壓力大於上方，使下方的氣體經由翼前緣與翼後緣翻到翅膀上方，形成翼前緣渦旋與翼後緣渦旋。蝴蝶在拍翅週期 $T=0.50$ 時，由於翅膀由上往下揮動，會使上方的氣流順勢被往下帶，形成向下的誘導氣流。而當蝴蝶在拍翅週期 $T=0.75$ 時，由於翅膀向上揮動，會夾擊後方的氣體，使後方的氣體向後噴射，形成向後的射流。

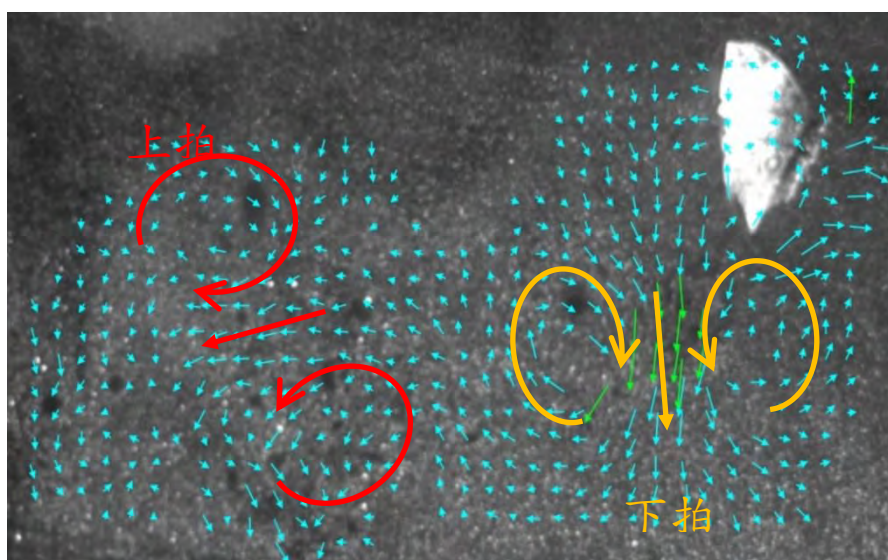


(圖十二). 大白斑蝶飛行流場示意圖

週期	揮動方向	現象	產生的渦漩或氣流
T=0.25	向下揮動	翅膀上方形成低壓區，造成翅膀下方壓力大於上方，使下方的氣體經由翼前緣與翼後緣翻到翅膀上方。	形成翼前緣渦漩與翼後緣渦漩
T=0.50	向下揮動至最底部	翅膀由上往下揮動，使上方的氣流順勢被往下帶。	形成向下的誘導氣流
T=0.75	向上揮動	翅膀向上揮動，夾擊後方的氣體，使後方的氣體向後噴射。	形成向後的射流

(表三). 蝴蝶拍翅時的動作與現象對照表

在分析枯葉蝶的飛行流場時，我們發現，由於枯葉蝶的翅膀力量大，形成的流場也特別明顯。因此我們看到了相較於其他蝴蝶所形成的較明顯的渦漩環。



圖十三. 流場中上拍及下拍之渦漩環圖

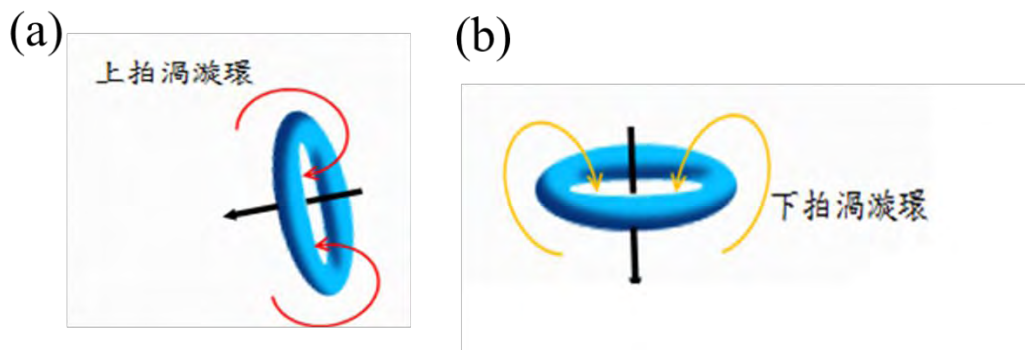
經由以上分析可了解：

1. 蝴蝶在上拍時，會在它的身體後方，產生一個垂直的渦漩環，而此渦漩環會產生向後的氣流。由於作用力與反作用力的關係，會使蝴蝶向前移動。
2. 蝴蝶在下拍時，會在它的身體下方，產生一個水平的渦漩環，而此渦漩環會產生向下的氣流。由於作用力與反作用力的關係，會使蝴蝶向上移動。
3. 由此可推知蝴蝶飛行時的軌跡為(上拍)向前，(下拍)向上，以此循環，呈現Z字型的軌跡

動作	下拍	上拍
渦旋環產生處	身體下方	身體後方
渦旋環角度	水平	鉛垂
渦旋環產生的氣流	向下的氣流	向後的氣流
作用力	作用力與反作用力	作用力與反作用力
對蝴蝶飛行的影響	向上移動	向前移動

(表四). 蝴蝶下拍與上拍渦旋環比較表

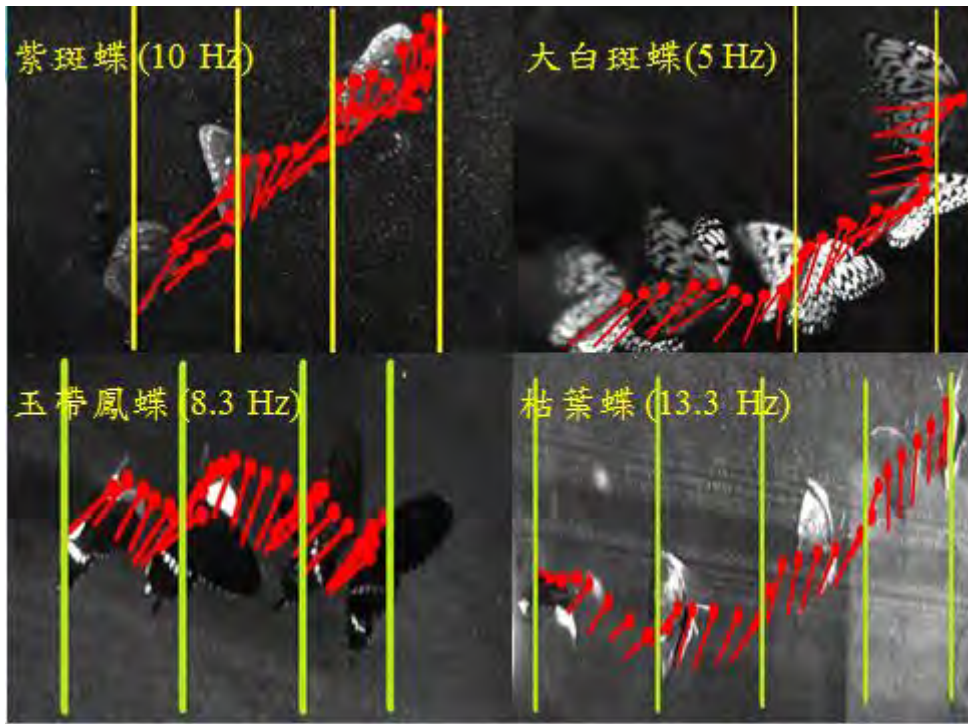
4.由於拍攝 PIV 是一個面的流場影像，所以渦旋環在圖中會看起來像被切片的甜甜圈一樣，形成環形的一圈。



(圖十四). 蝴蝶(a)上拍及(b)下拍之渦旋環示意圖

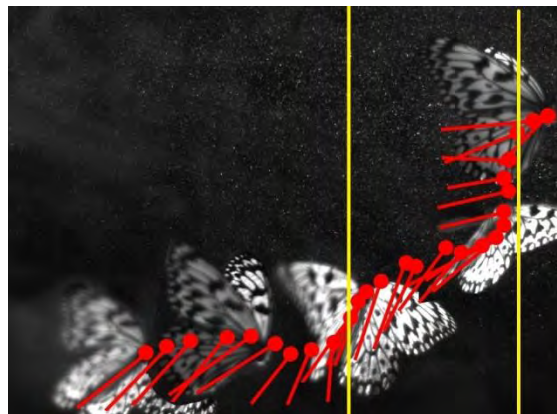
(二)、蝴蝶飛行疊合圖

接著我們將蝴蝶 PIV 之照片每 12 張取 1 張，用紅色標出蝴蝶身體位置並疊合，做出疊合圖，並用黃色標出每個週期。



(圖十五). 蝴蝶飛行疊合圖

1. 由此疊合圖可以算出紫斑蝶、大白斑蝶、玉帶鳳蝶、枯葉蝶的拍翅頻率分別為 10Hz、5Hz、8.3Hz、13.3Hz。



圖十六.蝴蝶飛行時呈現 Z 字形軌跡移動

2. 由圖十六可再次驗證蝴蝶的飛行軌跡是呈現 Z 字形軌跡移動。

3. 由圖中的紅線可看出蝴蝶拍翅的上拍與下拍階段，身體擺動分為：

一、下拍(翅膀由身體上方向下拍翅到身體下方):

身體角度逐漸減少轉為 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

二、上拍(翅膀由身體下方收翅回到身體上方):

身體角度由 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 拉升回初始角度。

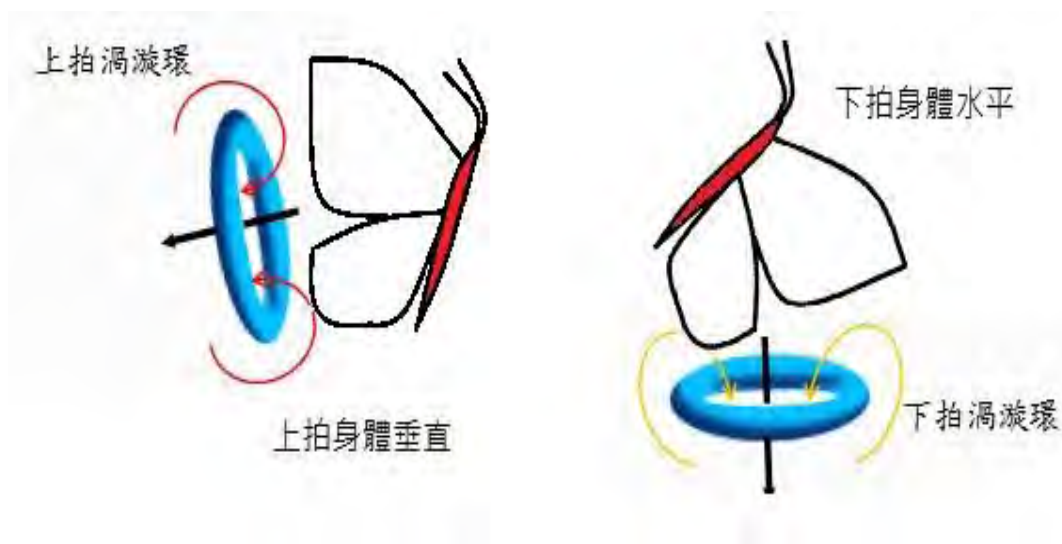
我們推測蝴蝶改變身體角度的原因是因為要配合渦旋環所產生的作用力，

上拍時，渦旋環的力是往水平方向，此時，蝴蝶需要將身體角度調成垂直以較大的面積接受向前的作用力。

下拍時，渦旋環的力是往垂直方向，此時蝴蝶需要將身體角度調成水平以較大的面積接受向上的作用力。

動作	下拍	上拍
內容	翅膀由身體上方向下拍翅到身體下方。	翅膀由身體下方收翅回到身體上方。
身體角度變化	身體角度逐漸減少轉為 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。	身體角度由 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 拉升回初始度。
推測原因 (為配合渦旋環)	上拍時，渦旋環的力是往水平方向。此時蝴蝶需要將身體角度調成垂直，以較大的面積接受向前的作用力。	下拍時，渦旋環的力是往垂直方向。此時蝴蝶需要將身體角度調成水平，以較大的面積接受向上的作用力。

(表五).蝴蝶上拍與下拍身體角度比較表



(圖十七).蝴蝶身體角度與渦旋環之關係示意圖

(三)、蝴蝶體型大小與飛行表現之討論

我們將實驗中不同種的蝴蝶的相關數據整理如下表一，其中包括蝴蝶之重量、翅膀面積、單位面積翅膀負重以及拍翅之頻率。

由表六可發現，四種蝴蝶儘管體型、重量相差甚大，但是單位翅膀面積之負重皆非常相似，皆落在 $0.01\sim 0.02\text{ g/cm}^2$ 之間，說明蝴蝶透過拍撲所能承受的附載有一定的值，且不論體型大小，附載上限皆差不多，而此數值能作為微飛行器設計參考之依據，在工程上設計拍撲微飛行器時之理想附載應該落在此範圍之內。

種類	紫斑蝶	大白斑蝶	玉帶鳳蝶	枯葉蝶
平均體重(g)	0.16	0.42	0.29	0.24
翅膀面積(cm^2)	5.11	13.20	10.74	6.14
平均負重(g/cm^2)	0.016	0.016	0.014	0.02
拍翅頻率(Hz)	10.0	5.0	8.3	13.3

(表六). 蝴蝶數據表格

進一步比較紫斑蝶與大白斑蝶之各項數據，紫斑蝶為本實驗中體型最小、體重最輕之蝴蝶，而大白斑蝶的體積最大，體重最重；巧妙的是，牠們單位翅膀面積的負重比卻皆約為 0.016 g/cm^2

然而，紫斑蝶的拍翅頻率比大白斑蝶的多上一倍，且紫斑蝶的飛行軌跡也比大白斑蝶起伏變化明顯來的小，由此現象可推估，如果將蝴蝶重量與翅面積等比例放大，蝴蝶可以較低的拍翅頻率產生足夠的空氣作用力進行飛行，然而，每一下拍翅所造成的移動軌跡起伏變化也更為顯著，造成這些現象的主要原因為較大的蝴蝶具有較大的翅膀面積，因此在單次拍撲時能產生較大的空氣作用力，因此導致飛行軌跡之劇烈變化。

種類	紫斑蝶	大白斑蝶
翅膀面積	實驗中最小	實驗中最大
平均體重	實驗中最輕	實驗中最重
平均負重(g/cm^2)	0.016	0.016
拍翅頻率(Hz)	10.0	5.0
飛行軌跡	起伏小	起伏大

(表七). 紫斑蝶與大白斑蝶比較表

五、結論與應用

本研究以實驗方法探討蝴蝶之拍撲飛行流場與特殊飛行方式，並比較不同種蝴蝶由於體型、重量以及拍撲頻率等特行對飛行造成之影響。

蝴蝶透過不斷拍及翅膀來產生複雜的渦漩結構及射流，來提供飛行時所需的動力，當蝴蝶在下拍時，蝴蝶身體角度由垂直降到 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，以較大的面積接受向上的作用力，此時翅膀周圍會形成翼前緣渦漩與翼後緣渦漩，且由於翅膀之運動產生向下的誘導氣流，並且在它的身體下方產生一個水平的渦漩環，此渦漩環會產生向下的氣流，由於作用力與反作用力的關係，會使蝴蝶向上移動。而在上拍時，蝴蝶的身體角度由 $45^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 拉升至接近垂直，以較大的面積接受向前的作用力，此時翅膀快速往後方收攏，此時蝴蝶翅膀夾出一往後的射流，並且在它的身體後方，產生一個垂直的渦漩環，而此渦漩環會產生向後的氣流，並推使蝴蝶向前移動，透過此特殊的推進方式，蝴蝶的飛行軌跡呈現類似 Z 字形的移動。

本文在第二部分探討不同種蝴蝶由於體型差異對飛行造成之影響，由實驗量測可發現儘管各蝴蝶尺寸、重量差異甚大，但各蝴蝶之單位面積翅膀負重皆落在 $0.01\sim 0.02\text{ g/cm}^2$ ，說明蝴蝶負重與體型大小並無關係，此數值可作為微飛行器尺寸及重量設計時重要的參考準則。由測量數據進一步可發現，如果將蝴蝶重量與翅面積等比例放大，其拍翅頻率便可降低，然而較大的空氣作用力產生，使每一次拍翅的移動軌跡起伏變化將會增加。

六、參考資料

1.王相博碩士論文，國立台灣大學機械工程研究所
蝴蝶撲翼姿態對飛行影響之研究

102/6/25

2.伍庭曄

<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/040113.pdf>

昆蟲振翅最大垂直升力及相關參數研究

98/07

3.林巧曦、游舒淳、呂雨蓉、陳盈如

<http://our.hlvs.ylc.edu.tw/science/senior/0408/040812.pdf>

大自然的飛行家—蝴蝶飛行之初步探討

94/05

【評語】 160031

1. 實驗設計優良，能進行高速動態現象之研究。
2. 能利用相關軟體處理動態流場的分布，分析不同蝴蝶之飛行姿態。
3. 宜就實驗主題，對蝴蝶之“飛行效能”進行更定量的探究。
4. 宜就實驗結果，對所提出的相關應用，能緊密及合理的解釋。