

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

偏離角與攻角對於豆娘(短腹幽螳)

飛行表現與功率之影響

The Influence of Deviation Angle and Angle of Attack on

Flight Performance and Power Consumption

of *Euphaea formosa*

蔡子珩

Tzu-Hen Tsai

指導教授：楊鏡堂 博士

Advisor: Yang, Jing-Tang, Ph.D.

中華民國一〇八年七月

July 2019



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

偏離角與攻角對於豆娘(短腹幽螳)飛行表現與功率之影響

The Influence of Deviation Angle and Angle of Attack on Flight  
Performance and Power Consumption of *Euphaea formosa*

本論文係蔡子珩君 (R06522104) 在國立臺灣大學機械工程學系  
完成之碩士學位論文，於民國 108 年 7 月 9 日承下列考試委員審查通  
過及口試及格，特此證明

口試委員：

招鏡堂

(簽名)

(指導教授)

楊瑞珍

江永雄

蔡奕志

葉思沂

系主任

黃美嬌

(簽名)



## 誌謝

謝謝指導教授楊鏡堂博士給予我們研究生充足的研究環境及經費，並在過程中不斷地督促、提醒及建議，在研究碰到瓶頸時指導我們研究的方向並討論可行的方法，才能讓本研究得以順利完成。感謝我母親一直以來在經濟上與心靈上給我的支持，讓我可以心無旁騖的研究，完成這篇論文。

兩年的研究生生活都在 BeamLab 這個大家庭裡度過，受到了很多人的幫助與陪伴，已經畢業的家銘、佩沂、培瑄、宇太、志斌學長，繼續讀博士的勝凱與有駿學長，謝謝你們指導我這麼多知識，把實驗室的技術傳承給我們。也感謝跟我同屆的歆庭、子嘉、源甫、閔齊，不管是在碩一的課業還是碩二的研究，都一起互相討論，讓我們都更有效率的研究。謝謝實驗室的助理祈嘉、禹靜，幫我們處理實驗室的行政事務，也有對於我們的論文給予一些建議。謝謝一起與我們進這間實驗室的博班學長渝翔，把我們當作同屆的朋友一般，與我們一起做研究、討論，也讓我獲益良多。最後謝謝學弟妹筠雅、士傑、睿甫、東穎一路上的陪伴，BeamLab 的技術就交給你們傳承下去了。

特別感謝葉文琪先生在研究初期給予我們這麼多關於豆娘的知識與題目的靈感，帶我們進入豆娘的世界一探究竟，若沒有您大方地分享豆娘的相關知識以及熱心的提供我們靈感，我們的研究在初期就會碰到很大的瓶頸，再三感謝您。

研究的路上其實非常艱辛，有時碰到瓶頸會極度不安，趕進度時子嘉、歆庭與渝翔也常常一起留在實驗室研究並討論到半夜。這篇論文得以完成，正是因為有你們的支持、幫助與陪伴，若是少了你們，這篇論文將會處處碰壁，甚至無法完成。在這裡特別感謝你們，讓我在這兩年的研究生生活中更加精采。



## 摘要

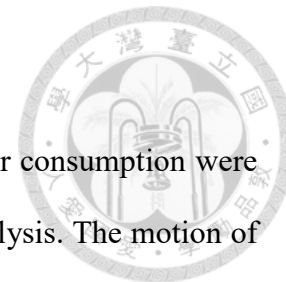
本研究藉由高速正交攝影技術擷取豆娘(短腹幽螳)前飛時翅膀與身體的動作，並以此建立三維非穩態數值分析模型，利用實驗室前人研究的自由飛行速度數值分析，探討偏離角的改變對於豆娘的飛行速度、翅膀升阻力、飛行軌跡以及功率等因素的影響，並且從固定來流、自由飛行、單翅或雙翅各方面切入探討，以期望未來應用於無人飛行器之設計上。

偏離角為翅膀偏離拍撲平面的角度，因此改變偏離角就會改變翅膀的拍撲軌跡。本研究主要分為後翅 8 字形拍撲與後翅 O 字形拍撲，前翅則動作固定，比較後翅改變偏離角後對於升阻力的影響。數值分析結果顯示 O 字形拍撲在上拍時拍撲軌跡與拍撲平面平行，且從豆娘前飛影片中擷取到的 O 字形拍撲在上拍時攻角會接近垂直，兩個因素造成 O 字形拍撲有最好的推力，而且消耗功率較低，因此在前飛比較常見；一般文獻提到的 8 字形拍撲，本研究的分析結果與文獻相似，升力較高，但也發現其推力不如 O 字形拍撲，消耗功率也比較高，利於上升飛行，且 8 字形在上拍攻角接近垂直時，攻角已經極高，再增加有效攻角將無法產生更高的升力。

偏離角振幅將會影響拍撲軌跡的寬窄，因此本研究也對於 8 字形拍撲與 O 字形拍撲模式分別調整偏離角振幅的影響，偏離角振幅將會影響該字形的寬度。而結果顯示 8 字形在偏離角振幅越大時，升力也會提高，但耗功也會增加，且效率會減少；而 O 字形在偏離角振幅越大時，升力反而減少，且耗功也會增加，因此效率大幅遞減。所以推斷在應用時，若有必要可以增加 8 字形的偏離角振幅以提昇升力，但 O 字形則約在偏離角振幅為 3 度時比較理想。

本文藉由偏離角的各種情況與參數的數值分析結果，整理出在各個飛行模式下如前飛與上飛時最理想的偏離角函數，可作為拍撲型無人飛行器機構的動作參考。

**關鍵詞：**豆娘飛行、偏離角、拍撲軌跡、功率、拍撲型無人微飛行器



## Abstract

The effects of deviation angle on flight performance and power consumption were studied by high speed photography and 3-D transient numerical analysis. The motion of *Euphaea Formosa*, a damselfly species, was recorded by two orthogonally-aligned high speed video cameras. In this study, the single-hindwing model and the tandem-wings model based on the recorded motion were used in 3-D numerical simulations of static, fixed and freestream flow fields. The results could be helpful for the design of MAVs (Micro-aerial-vehicles).

Deviation angle is the angle of the wings deviating from the stroke plane. Adjusting deviation angle leads to the change of wing flapping trajectory. This study mainly discussed the ellipse and figure-eight shaped flapping trajectories of the hindwings. The motion of forewings is fixed, as recorded by the cameras. The results show that the thrust of ellipse flapping trajectory model was greater and the power consumption was lower than those of the figure-eight shaped flapping trajectory model, and thus should be applied in forward flight.

In the up stroke, the direction of the ellipse flapping trajectory was parallel to the stroke plane. In addition, the recorded videos revealed that the angle of attack in ellipse flap was nearly perpendicular in the upstroke. We discovered that these two factors contributed to the thrust of ellipse flapping trajectory model. Besides, the results showed that the figure-eight shaped flapping trajectory model had greater lift, which had been suggested by the literature. We also found when the angle of attack in the figure-eight shaped flapping trajectory was almost vertical, it would not generate more lift due to excessively high angle of attack.

The amplitude of the deviation angle was also discussed in the figure-eight shaped model and ellipse model respectively. The amplitude influences the width of the trajectories. The results showed that lift and power consumption increased as the

amplitude of the deviation angle in the figure-eight shaped model increased, and thus could be applied to the MAVs when lift was urgently needed. However, increasing the amplitude of the deviation angle in the ellipse model increased power consumption and reduced lift. Therefore, there was no benefit from taking this action in the ellipse model.

**Keyword: damselfly flight, deviation angle, flapping trajectory, power consumption, flapping micro aerial vehicle**



## 符號說明

$A$	翅膀面積(m <sup>2</sup> )
$AR$	展弦比
$C_D$	阻力係數
$C_L$	升力係數
$C_P$	功率係數
$\bar{c}$	平均弦長(m)
$F_D$	阻力(N)
$F_L$	升力(N)
$F_h$	水平推力(N)
$F_v$	垂直升力(N)
$Fr$	福祿數
$f$	拍翅頻率(Hz)
$g$	重力(m/s <sup>2</sup> )
$J$	推進比
$m$	質量(kg)
$N_m$	無因次質量
$P$	壓力(Pa)
$P_o$	功率(kg·m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
$Re_c$	雷諾數
$s$	單翅展長(m)
$t$	時間(s)
$\frac{t}{T}$	無因次時間
$U_\infty$	飛行速度(m/s)



$U_t$	翼尖速度(m/s)
$V_y$	水平飛行速度(m/s)
$V_z$	垂直飛行速度(m/s)
$dV_y$	水平加速度(m/s <sup>2</sup> )
$dV_z$	垂直加速度(m/s <sup>2</sup> )
$y$	水平位移(m)
$z$	垂直位移(m)
$\beta$	拍撲平面傾斜角(degree)
$\Gamma$	環流量(m <sup>2</sup> /s)
$\bar{\Gamma}$	平均環流量(m <sup>2</sup> /s)
$\gamma$	方向角(degree)
$\theta$	偏離角(degree)
$\lambda$	拍撲角振幅(degree)
$\mu$	黏滯係數(kg/m·s)
$\nu$	動黏滯係數(m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	流體密度(kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	前後翅相位差
$\phi$	拍撲角(degree)
$\psi$	旋轉角(degree)
$\omega$	角速度(radius/s)





## 目錄

誌謝 .....	i
摘要 .....	ii
Abstract.....	iii
符號說明 .....	v
目錄 .....	vii
圖表目錄 .....	x
第一章 前言 .....	1
第二章 文獻回顧 .....	3
2-1 微飛行器介紹 .....	4
2-1.1 飛行器種類.....	4
2-1.2 微飛行器的發展與小結.....	5
2-2 名詞介紹 .....	6
2-2.1 翅膀的名詞定義.....	6
2-2.2 翅膀動態角度.....	6
2-2.3 其他名詞介紹.....	8
2-3 拍撲翼飛行物理機制 .....	9
2-3.1 渦旋環理論 (Vortex Ring Theory) .....	9
2-3.2 庫塔-儒可夫斯基定理(Kutta-Joukowski theorem) .....	10
2-3.3 翼前緣渦旋(Leading edge vortex) .....	10
2-3.4 翼尖渦旋(Tip Vortex) .....	11
2-3.5 Wagner effect.....	12



2-3.6 準穩態模型.....	12
2-3.7 尾流捕捉、附加質量及翅膀旋轉.....	12
2-3.8 夾翼與拋翼.....	15
2-4 相關文獻回顧.....	16
2-4.1 前後翅交互作用.....	16
2-4.2 偏離角.....	17
2-4.3 小結.....	19
第三章 研究方法.....	20
3-1 動態捕捉.....	21
3-1.1 研究物種.....	21
3-1.2 動態捕捉設備.....	22
3-1.3 翅膀動作取樣與分析.....	25
3-1.4 翅膀動態定義.....	26
3-1.5 無因次分析.....	28
3-2 數值模擬.....	31
3-2.1 統御方程式.....	31
3-2.2 軟體介紹.....	31
3-2.3 網格與動網格.....	32
3-2.4 求解器設定.....	36
3-2.5 使用者自訂函數(User Defined Function).....	36
3-3 模擬參數設定.....	38
3-3.1 網格設定.....	38



3-3.2 網格驗證.....	38
3-3.3 豆娘模型.....	39
3-3.4 翅膀動態.....	40
第四章 結果與討論.....	44
4-1 動態分析與討論.....	45
4-1.1 豆娘身體動態.....	45
4-1.2 翅膀動作分析.....	47
4-2 拍撲軌跡與攻角之數值分析.....	51
4-2.1 單翅模型靜止流場數值分析.....	51
4-2.2 固定來流數值分析.....	55
4-2.3 模型間之比較與小結.....	59
4-2.4 前後翅交互作用與流場分析.....	62
4-2.5 三維非穩態自由飛行數值分析.....	68
4-3 偏離角振幅之數值分析.....	72
第五章 結論與未來展望.....	75
5-1 結論.....	75
5-2 未來展望.....	77
5-3 甘特圖.....	78
第六章 參考文獻.....	79



## 圖表目錄

圖 2-1 文獻回顧架構圖 .....	3
圖 2-2 翅膀名詞示意圖 .....	6
圖 2-3 翅膀角度示意圖 .....	7
圖 2-4 翅膀旋轉角示意圖 .....	7
圖 2-5 翅膀運動軌跡示意圖 .....	8
圖 2-6 翼前緣渦旋流場示意圖(a)翅膀上拍結束正要下拍，此時上拍的翼前緣渦旋被甩離翅膀，(b)下拍中程，翼前緣渦旋緊貼翅膀(c)下拍結束，翼前緣渦旋仍然貼附於翅膀，並正準備於轉換上拍之後脫離。(圖片來源：Ellington <i>et al.</i> , 1996).....	11
圖 2-7 尾流捕捉示意圖，其中 A 到 C 為下拍，D 到 F 為上拍。 .....	13
圖 2-8 左圖為旋轉相位示意圖，黑色線為翅膀側面；右圖為量測之升力值，其上拍與下拍的開始點以白點標記，結束點以黑點標記。(參考圖源：Dickinson <i>et al.</i> , 1999) .....	14
圖 2-9 夾翼與拋翼示意圖(參考圖源：Sane, 2003) .....	15
圖 2-10 機構示意圖(圖片來源：Hu & Deng, 2014) .....	16
圖 2-11 不同的翅膀軌跡對於升力造成的影響(圖片來源：Luo <i>et al.</i> , 2017).....	17
圖 3-1 研究方法架構圖 .....	20
圖 3-2 Phantom v7.3 高速攝影機.....	22
圖 3-3 Phantom v310 高速攝影機.....	23
圖 3-4 實驗架設示意圖 .....	24
圖 3-5 豆娘側視圖(每 0.1 週期 1 張).....	25
圖 3-6 豆娘模型圖，紅色為 x 軸，綠色為 y 軸，藍色為 z 軸.....	26
圖 3-7 拍撲平面角度示意圖 .....	27



圖 3-8 網格示意圖 .....	32
圖 3-9 流場網格示意圖 .....	38
圖 3-10 網格驗證垂直速度圖，其中黑線為 600 萬網格，紅線為 800 網格，.....	39
圖 3-11 豆娘翅膀模型。左圖為前翅，右圖為後翅。 .....	40
圖 3-12 前翅旋轉角 .....	41
圖 3-13 後翅旋轉角 .....	41
圖 3-14 前翅拍撲角 .....	42
圖 3-15 後翅拍撲角 .....	42
圖 3-16 前翅偏離角 .....	43
圖 4-1 結果與討論架構圖 .....	44
圖 4-2 前翅旋轉角 .....	47
圖 4-3 後翅旋轉角 .....	48
圖 4-4 旋轉角曲線擬合，左邊為前翅，右圖為後翅 .....	48
圖 4-5 拍撲角曲線擬合，左圖為前翅，右圖為後翅 .....	49
圖 4-6 白痣珈螳的拍撲角 (圖片來自梁家銘，2017) .....	49
圖 4-7 後翅偏離角，紅色為 8 字形，藍色為 O 字形。 .....	50
圖 4-8 後翅翼前緣軌跡側視圖，左圖為 6 號樣本 8 字形拍撲，右圖為 7 號樣本 O 字形拍撲。圖中紅色星號代表翼根原點。 .....	51
圖 4-9 一般旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖，靜止流場。 ...	53
圖 4-10 不對稱旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖，靜止流場。 .....	53
圖 4-11 O 字形及 8 字形拍撲軌跡模型的功率對時間圖，靜止流場。左圖為一班旋轉角，右圖為不對稱旋轉角。 .....	53
圖 4-12 一般旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖， .....	55
圖 4-13 不對稱旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖， .....	55

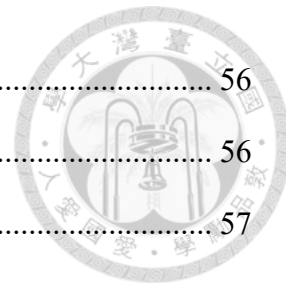


圖 4-14 一般旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的 .....	56
圖 4-15 不對稱旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的 .....	56
圖 4-16 不對稱旋轉角之後翅 O 字形拍撲示意圖。 .....	57
圖 4-17 一般旋轉角之後翅 8 字形拍撲示意圖。 .....	58
圖 4-18 後翅 O 字形拍撲模型，雙翅存在與拔除前翅兩個模型的後翅受力比較。左圖為水平力，右圖為垂直力。 .....	63
圖 4-19 後翅 8 字形拍撲模型，雙翅存在與拔除前翅兩個模型的後翅受力比較。左圖為水平力，右圖為垂直力。 .....	63
圖 4-20 固定來流 $U_{\infty} = 0.8 \text{ m/s}$ ，後翅 8 字形拍撲模型流場圖。左上圖為後翅下拍起始，右上圖為下拍中程，左下圖為上拍起始，右下圖為上拍中程。f 與 h 分別代表前翅與後翅。 .....	64
圖 4-21 固定來流 $U_{\infty} = 0.8 \text{ m/s}$ ，後翅 O 字形拍撲模型流場圖。左上圖為後翅下拍起始，右上圖為下拍中程，左下圖為上拍起始，右下圖為上拍中程。f 與 h 分別代表前翅與後翅。 .....	65
圖 4-22 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，上拍中程( $t/T = 0.1$ )， .....	66
圖 4-23 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，下拍中程( $t/T = 0.6$ )， .....	66
圖 4-24 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，下拍中程( $t/T = 0.6$ )， .....	66
圖 4-25 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之垂直速度比較 .....	69
圖 4-26 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之水平速度比較 .....	70
圖 4-27 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之軌跡比較 .....	70
圖 4-28 O 字形拍撲軌跡轉 8 字形拍撲軌跡模型之自由飛行數值分析， .....	72
圖 4-29 偏離角振幅示意圖 .....	73
圖 4-30 O 字形拍撲模型下拍中程流場圖比較，左圖為偏離角振幅 3 度模型， ...	74
表 2-1 微飛行器規格表(參考來源：(Pines & Bohorquez, 2006)) .....	4



表 3-1 短腹幽螳的科學分類表 .....	21
表 3-2 高速攝影機規格表 .....	23
表 3-3 輸入參數 .....	29
表 3-4 輸出變數 .....	29
表 3-5 結構網格與非結構網格之優缺點比較(參考自：費約翰博士論文) .....	33
表 3-6 歪斜度對應的品質對照表(參考自 Fluent 說明) .....	34
表 3-7 模擬使用之豆娘翅膀參數 .....	40
表 4-1 豆娘 1 號樣本標點圖 .....	45
表 4-2 豆娘樣本拍撲平面資訊 .....	46
表 4-3 豆娘樣本運動資訊 .....	46
表 4-4 靜止流場後翅模型之一周期平均垂直力 $F_v$ 比較 .....	59
表 4-5 靜止流場後翅模型之一周期平均水平力 $F_h$ 比較 .....	59
表 4-6 靜止流場後翅模型之一周期平均消耗功率 $P_o$ 比較 .....	59
表 4-7 固定來流 $U_\infty = 0.8$ m/s 後翅模型之一周期平均垂直力 $F_v$ 比較 .....	60
表 4-8 固定來流 $U_\infty = 0.8$ m/s 後翅模型之一周期平均水平力 $F_h$ 比較 .....	60
表 4-9 固定來流 $U_\infty = 0.8$ m/s 後翅模型之一周期平均消耗功率 $P_o$ 比較 .....	60
表 4-10 單獨後翅與雙翅存在之後翅垂直力比較表格 .....	67
表 4-11 單獨後翅與雙翅存在之後翅水平力比較表格 .....	68
表 4-12 單獨後翅與雙翅存在之後翅消耗功率比較表格 .....	68
表 4-13 O 字形拍撲模型調整偏離角振幅之結果比較表 .....	74
表 4-14 8 字形拍撲模型調整偏離角振幅之結果比較表 .....	74



## 第一章 前言

仿生學正是近年來越來越熱門的議題之一，人類雖然發明了多項科技，達到了很多目的與要求，卻發現生物可以利用其自身的構造，以更簡單或更省力的方式，達到如飛行或高速游泳等目的。因此，人類開始從科學的角度來分析生物的行為或構造，如本實驗室前人融合蓮葉效應與玫瑰花瓣效應研發出液珠操控平台，就是仿生學的例子之一。

從以前開始，如同昆蟲與鳥類般遨遊飛翔就是人類的夢想。飛行可以不受拘束且快速移動，然而依靠人天生俱來的能力是不可能的，因此很多人也僅將此視為不太實際的夢想。但是，在四百多年前，達文西就參考了鳥類，畫出了飛行器撲翼機，其機翼的拍打設計正如鳥類一般。18世紀工業革命時期，蒸汽機的改良讓科技往前進了一大步，然而從19世紀出版的《環遊世界八十天》可以得知，人類要移動仍然非常不便。終於，在19世紀末，塞謬爾·蘭利成功試飛了第一架無人飛機，雖然在他過世前沒辦法實現發明載人的動力飛行器的願望，但也給後人留下了許多啟發，他試飛失敗的飛機也在他過世後八年經過一番改造並安裝當時的發動機也終於成功飛行。

如今，飛機已經不再罕見，但人類並不滿足於此。現今的飛機最常見的為定翼機，但是定翼機依靠機翼上下壓力差的方式飛行，需要足夠的速度才能產生，也因此需要極長的跑道加速；而旋轉翼如直升機雖然能夠原地低速起飛，但飛行效率也較差。這時人類又回過頭來看在上億年以前就已經制霸天空的鳥類與昆蟲。

鳥類或昆蟲依靠著自身的構造，以非常省力的方式翱翔於天空中，甚至一些遷徙種可以藉此飄洋過海。而昆蟲又比鳥類更早出現在世界上，雖然昆蟲的飛行高度與速度不如鳥類，但是其機動性、操控性與穩定性卻獨占鰲頭。另外，現今有許多人因為救援、軍事、醫療或民生要求，也希望將飛行器微小化，也就是 MAV (micro aerial vehicles)。因此，越來越多人開始研究昆蟲是如何以如此小的身軀，達到這麼高機動性的飛行以逃避捕食者或獵食。而近年來，四翅的昆蟲如蜻蛉目的蜻蜓與豆



娘，因為其翅膀各自的獨立性以及自由的操縱性，加上前後翅交互作用，飛行又更加自由與高效率，其中豆娘更是拍撲頻率可低達十幾赫茲，就可以做到懸停、加速前飛、甚至倒退飛行。然而，豆娘的研究卻不如蜻蜓完整。另外，翅膀的偏離角與運動翅膀軌跡鮮少有人研究，雖然有人整理出幾個運動翅膀軌跡的效應，但卻是單翅的，若套用到蜻蛉目，翅膀的前後交互作用將會大大的影響流場以及升阻力與功率。

本研究希望透過高速攝影技術觀測豆娘在各種飛行模式下的翅膀運動軌跡與偏離角，並利用數值模擬與動態網格技術，對於不同的偏離角振幅配合不同的翼尖運動軌跡，以及上下拍時間的不對稱進行分析，藉此觀察前後翅的交互作用對於升阻力與功率造成的影響，期望能夠提供微飛行器更好的飛行策略。



## 第二章 文獻回顧

本研究文獻回顧架構圖如下，首先介紹微飛行器的定義與發展，再來會對一些名詞及豆娘的身體構造做介紹與解釋，接下來討論昆蟲飛行力學的機制，最後會回顧前人所做的飛行研究，並對於本研究為何著重於偏離角，以及研究對象為豆娘這幾點做說明。

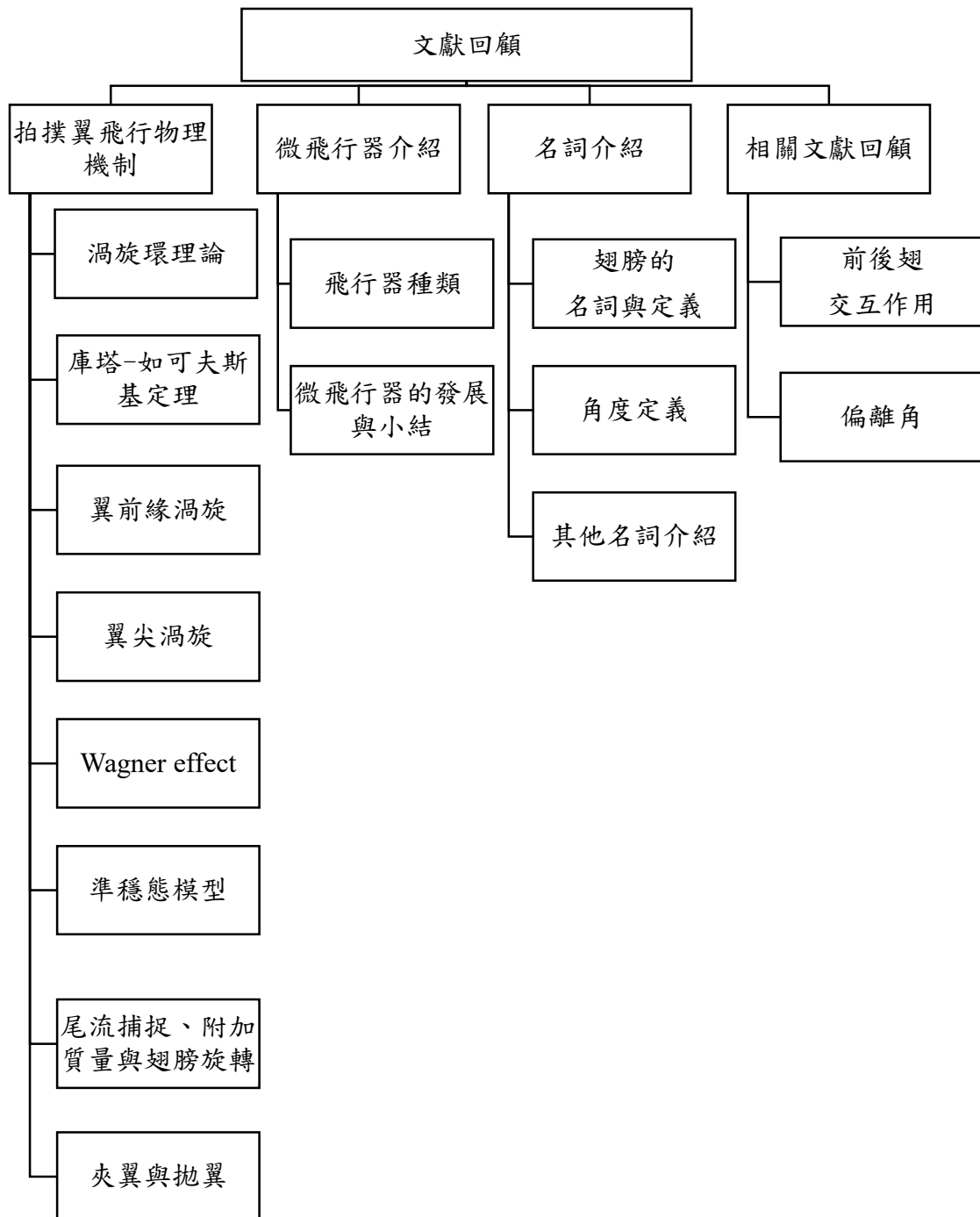


圖 2-1 文獻回顧架構圖



## 2-1 微飛行器介紹

19 世紀末賽謬爾蘭利造出了第一個無人載具，開創了飛行器的歷史。隨後萊特兄弟也做出了人類史上第一架外部動力的飛行機，實現了人們遨遊天際的願望。而在飛行器發展越來越成熟的二十世紀末，人們開始因為醫療、軍事、救援以及物流等需求，開始轉往研究無人飛行器。其中如果能造出體積較小或重量輕，又有高操控性或機動性的微飛行器，更能在節省資源的情況下達到目的。1997 年，DARPA (U.S. Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 首先提出了微飛行器的概念；Pines & Bohorquez (2006) 也提到一些微飛行器的規格如下表，例如機身尺度不超過十五公分、重量大約一百公克左右以及飛行速度 15 m/s，這些規格大部分的昆蟲皆符合。

表 2-1 微飛行器規格表(參考來源：Pines & Bohorquez, 2006))

Specification	Requirement	Details
Size	<15.24 cm	Maximum dimension
Weight	~100 g	Objective GTOW
Range	1 to 10 km	Operational range
Endurance	60 min	Loiter time on station
altitude	<150 m	Operational ceiling
Speed	15 m/s	Maximum flight speed
Payload	20 g	Mission dependent
Cost	\$1500	Maximum cost

### 2-1.1 飛行器種類

飛行器大致上可以分成三種，以下介紹三種飛行器的差異與優缺點：

#### (1) 旋轉翼飛行器

旋轉翼飛行器利用螺旋槳旋轉對流體製造向下的動量使自身得到升力，由於可以藉由螺旋槳的角度來改變飛行方向，因此操控性高，但是旋轉翼的飛行效率低，



常見的旋轉翼飛行器有直升機，另外現今最常見的微飛行器為多軸飛行器，也是屬於旋轉翼飛行器。

### (2) 固定翼飛行器

目前最常見的飛行器種類，一般的載客用飛機、軍用機、超音速飛機都是屬於定翼機。定翼機倚靠引擎提供推力，達到足夠的速度時，因為伯努利定律使上下有足夠的壓力差而可得以起飛，其優點是速度快，載重高，但相對的因為需要一定的速度才能起飛，需要較長的跑道以及風向的配合，且操控性並不好，因此不適合做為微飛行器。

### (3) 拍撲翼飛行器

自然界的生物如昆蟲、鳥類等大多皆採用拍撲翼的飛行方式，利用拍翅產生氣流與渦流造成的壓力差來提供升力。此種飛行方式可以原地起飛，也有極高的效率、操控性與自由度，是目前最熱門的研究目標，其中包括鳥、蜜蜂、果蠅、豆娘與蜻蜓等。

## 2-1.2 微飛行器的發展與小結

現今最多的微飛行器為多軸飛行器，屬於旋轉翼飛行器，其穩定性高，現在也發展得很成熟。但是如前文所說，旋轉翼效率低，加上大眾普遍因為射槳的可能性而對於多軸機的安全性有很大的疑慮，因此發展上還是有困難，使用地點也受到限制。而昆蟲結合了固定翼與旋轉翼的優點，效率、自由度、機動性高，然而其變數相當多，如攻角、拍撲角、偏離角、上下拍不對稱等非常繁雜，而且其空氣動力學的機制也非常複雜，因此也成為近二十年相當熱門的研究目標。



## 2-2 名詞介紹

這個單元主要介紹包括關於翅膀和角度常見的定義，以利於對本文的理解。

### 2-2.1 翅膀的名詞定義

圖 2-2 為翅膀的常見名詞，這些定義在翅膀空氣動力學的研究上時常被使用，但每一篇論文的定義(如展長或弦長)不一定相同，因此在這個部分介紹本文使用到的名詞定義。

我們將翅膀靠近身體的一側稱為翼根(root)，將遠離身體的一側尖端稱為翼尖(tip)，而翼根到翼尖的距離為展長(span)，符號為  $s$ 。另外通常身體的頭部視為前方，翅膀的前側為翼前緣(leading edge)，後側則是翼後緣(trailing edge)。由於翼前緣與翼後緣有很多個點，因此本文定義弦長時，以翼前緣至翼後緣且平行於身體的最大距離視為弦長(chord)，符號為  $c$ ，另外翅膀面積除以翼展長為平均弦長，符號為  $\bar{c}$ 。

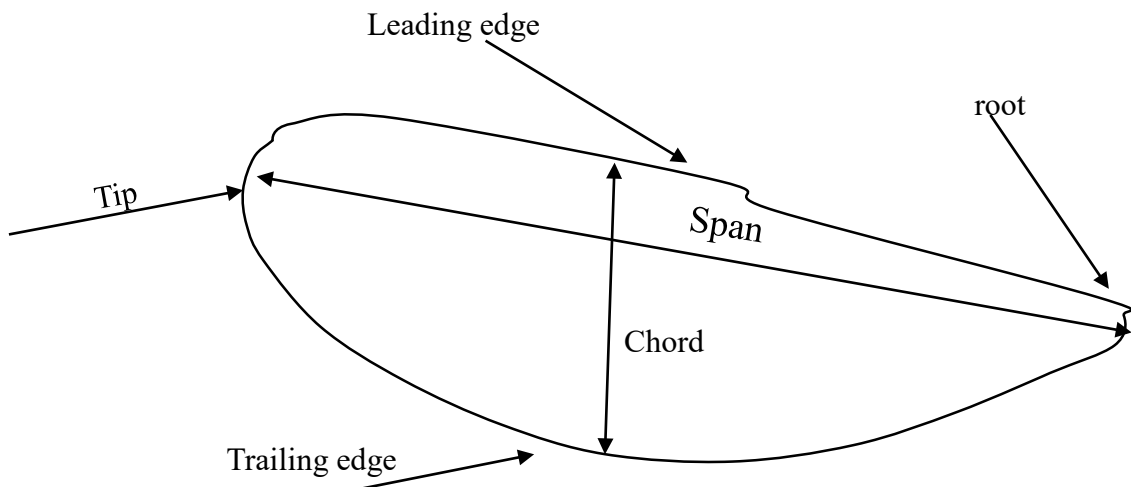


圖 2-2 翅膀名詞示意圖

### 2-2.2 翅膀動態角度

為了方便觀察，可以將豆娘飛行時根據翅膀的動態定義出四種角度，分別是翅膀拍撲角(stroke angle)、旋轉角(rotational angle)、偏離角(deviation angle)以及傾斜角(inclined plane angle)。以下就以大部分學者常用的定義來介紹這四種角度。

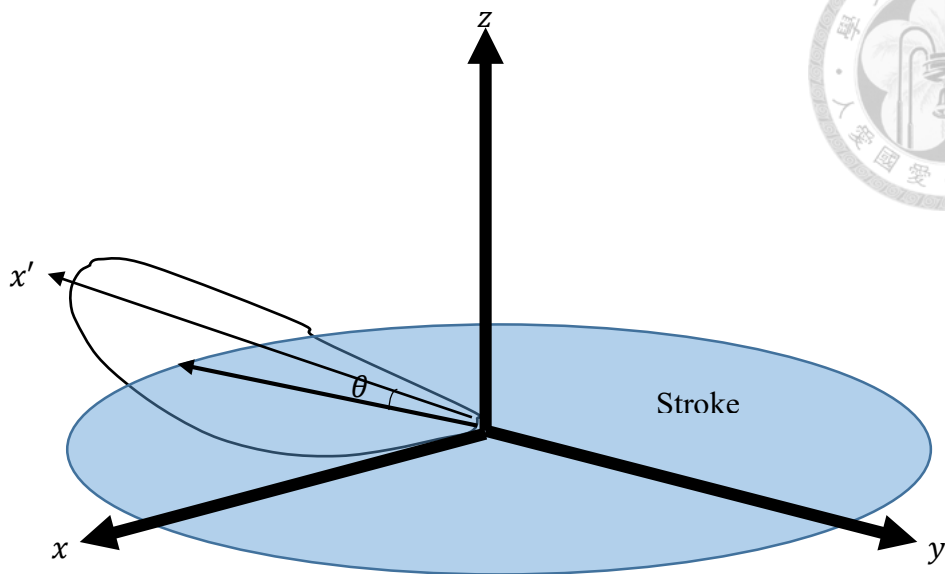


圖 2-3 翅膀偏離角示意圖

(1) 拍撲角(stroke angle)

當翅膀拍撲時，翅膀對身體旋轉所做的角度即為拍撲角。拍撲角越大代表拍翅振幅越大。

(2) 旋轉角(rotational angle)

圖 2-3 為翅膀的側視圖。拍撲平面為豆娘翅膀往復拍撲的平均平面。豆娘會沿著拍撲平面做拍撲動作，此時翅膀也會以翼展為軸做旋轉，而翅膀與拍撲平面的夾角即為旋轉角。在大部分的情況下，來流方向為拍撲方向的反方向，因此旋轉角也會是攻角(angle of attack)。

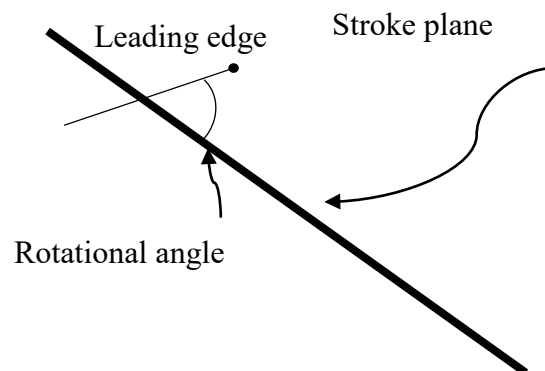


圖 2-4 翅膀旋轉角示意圖



### (3) 偏離角(deviation angle)

當豆娘翅膀拍撲時，翅膀有時不會與拍撲平面重合，此時翼展與拍撲平面的夾角稱為偏離角。通常豆娘拍撲時的偏離角會有週期性的變化，由側面來看可以畫出豆娘的翅膀運動軌跡(如圖 2-5)。常見的豆娘翅膀運動軌跡有直線、八字形以及橢圓形(O 字形)，而這個角度是本文探討的重點之一。

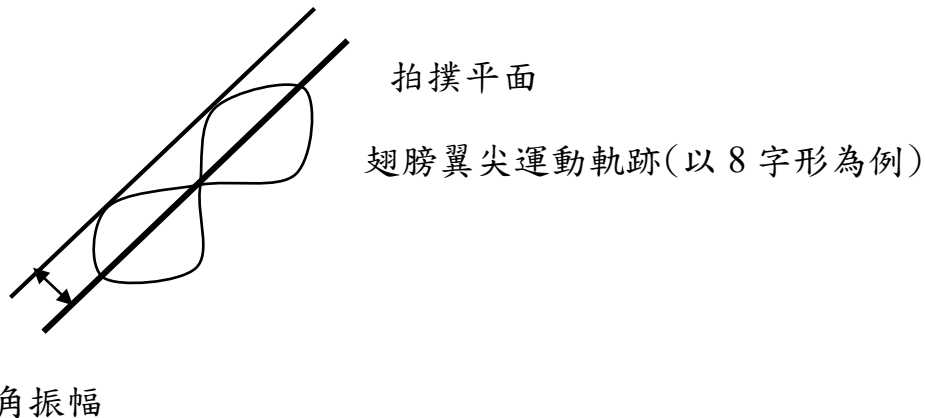


圖 2-5 翅膀運動軌跡示意圖

### (4) 傾斜角(inclined plane angle)

豆娘與一般昆蟲構造不同，其翅膀肌肉有很大的彈性與很高的自由度，因此他可以任意改變拍撲平面與水平的夾角。而這個夾角本文將其定義為傾斜角。

## 2-2.3 其他名詞介紹

### (1) 展弦比(aspect ratio)

展弦比為一無因次參數，其定義為

$$AR = \frac{s^2}{A} \quad (2-1)$$

其中 AR 為展弦比， $s$  為翼展長， $A$  為翅膀面積。在本文中因為有定義平均展弦比  $\bar{c}$ ，因此上式又可簡化為

$$AR = \frac{s}{\bar{c}} \quad (2-2)$$



## (2)進速比, $J$ (advance ratio)

進速比為判斷昆蟲飛行模式重要的無因次參數，其定義為

$$J = \frac{\text{昆蟲飛行速度}}{\text{平均翅膀速度}} \quad (2-3)$$

當進速比較大時，代表昆蟲正在前飛，而進速比較小時，可視為昆蟲慢速前飛或懸停(hovering)。

## 2-3 拍撲翼飛行物理機制

這個單元將介紹拍撲翼造成的一些流場物理機制以及相關的名詞解釋，由於拍撲翼相對於固定翼與旋轉翼來說，動作與機制更為複雜，因此在近三十年來許多學者的努力下終於發現並整理了一些拍撲翼特有的物理機制，讓後人可以站在巨人的肩膀上，去研究更詳細的物理現象。

### 2-3.1 渦旋環理論 (Vortex Ring Theory)

渦旋環(vortex ring)為飛行生物的動力來源之一，而渦旋環理論則是將複雜的尾流區簡化成形狀似甜甜圈的尾流場，以便於理解渦旋結構並藉此計算出流體作用力。在渦旋環周圍，由於渦旋之帶動，在中心會生成一射流(jet flow)，進而給予生物一個推進力。因此當昆蟲拍撲時，會產生一渦旋環，使用 PIV 可以測得其渦旋強度，並藉此算出推進力。假設二維截面上存在一對旋轉方向相反的的渦旋結構且強度分別為 $\Gamma_1$ 與 $\Gamma_2$ ，則渦旋環內動量為

$$M = \rho A \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2} = \rho A \bar{\Gamma} \quad (2-4)$$

其中  $M$  為渦旋環內動量、 $\rho$  為密度、 $A$  為 $\frac{\pi D^2}{4}$ ， $D$  為兩渦旋間距， $\bar{\Gamma}$  為平均渦旋量，而利用動量變化量除以週期就可以得到週期平均作用力，即

$$F = \frac{\Delta M}{T} = \frac{\rho A \bar{\Gamma}}{T} \quad (2-5)$$

藉由這樣的方法，我們就可以算出生物因為渦旋所受到的作用力大小。





### 2-3.2 庫塔-儒可夫斯基定理(Kutta-Joukowski theorem)

為空氣動力學的基本定理，其假設前提為二維且穩定的不可壓縮流。若置一物體在來流速度為  $U$  的均勻流場，且環繞物體表面的環流量為  $\Gamma$ ，則物體升力  $L$  可由 Kutta-Joukowski theorem 計算得出

$$L = -\rho U \Gamma \quad (2-6)$$

而環流量  $\Gamma$  定義為流體速度沿著物體表面的路徑做向量內積的積分，逆時針為正。

### 2-3.3 翼前緣渦旋(Leading edge vortex)

以前在拍撲翼物理機制尚未被發現的情況下，許多學者嘗試著利用傳統機翼的飛行力學理論來分析拍撲翼，卻發現其估出來的作用力完全不足以讓昆蟲維持飛行。因為定翼機的攻角一旦超過一定值，機翼的後方就會形成非常不穩定的流場及卡門渦街，造成失速(stall)；然而三維的昆蟲拍撲往往可以達到極大的攻角，甚至有時可以接近 90 度而不會失速。這個問題最終被 Ellington 研究團隊給解開了。Ellington 等人於 1996 年在 Nature 上發表了一篇論文(Ellington *et al.*, 1996)，他們建了模仿蛾類的拍撲機構，並且灌入煙霧來觀察拍撲翼的流場，發現拍撲翼的後方不會產生卡門渦街，而是翼前緣渦旋會緊貼在翅膀後方，直到拍撲轉換時才會被甩離翅膀。如此一來，翅膀後方流場會維持穩定，且渦旋會持續提供低壓區，讓翅膀維持足夠的升力飛行。

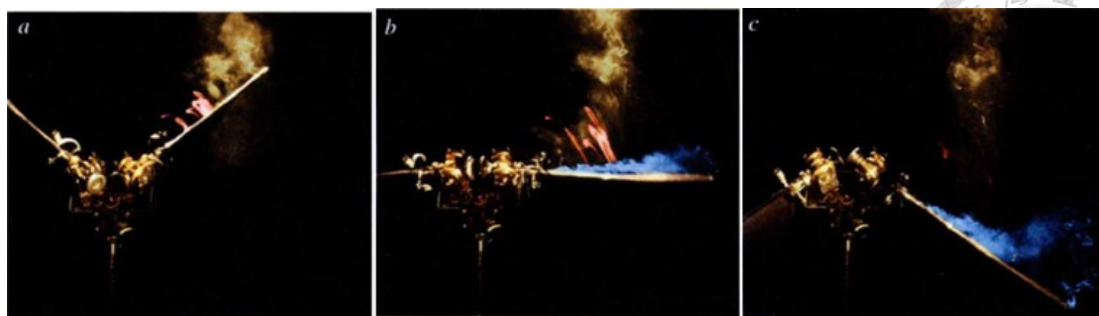


圖 2-6 翼前緣渦旋流場示意圖(a)翅膀上拍結束正要下拍，此時上拍的翼前緣渦旋被甩離翅膀，(b)下拍中程，翼前緣渦旋緊貼翅膀(c)下拍結束，翼前緣渦旋仍然貼附於翅膀，並正準備於轉換上拍之後脫離。(圖片來源：Ellington *et al.*, 1996)

### 翼前緣渦旋穩定性的原因

由於翅膀拍撲為對身體做旋轉運動而非直線平移運動，因此翼尖速度較快，這導致了翅膀的展向流(span-wise flow)。Ellington 等人為首的一些學者認為此展向流會使翼根渦旋被帶向翼尖，維持著渦旋的能量不脫離翼表面而穩定貼附。然而 Birch & Dickinson 卻不認同，他們發現仿果蠅懸停的機構模型下展向流速度僅平均翼尖速度的 2~5%，影響應該微乎其微。為了驗證這個說法，他們在機構上加裝了隔板以阻止展向流，發現翼前緣渦旋貼附現象仍然存在，因此他們認為展向流不是使渦旋穩定貼附的機制(Birch & Dickinson, 2001)。而 Birch & Dickinson 也進一步發現氣流流經翼尖有下洗氣流，因此他們認為這樣的下洗氣流降低了有效攻角，才使的渦旋穩定貼附於翅膀表面。

### 2-3.4 翼尖渦旋(Tip Vortex)

翅膀拍撲時上方產生低壓區使其有足夠的升力可以飛行，而空氣有高壓流向低壓的趨勢，因此在三維的翅膀上，翼尖會有一個向上的渦旋。由於動量守恆，這個渦旋會相對產生一個下洗氣流，使翅膀升力受到影響而降低。越高的展弦比，翼尖渦旋的影響會越低，也就越能以較小功率得到最大升力，然而昆蟲往往展弦比都比機翼要小許多，因此翼尖渦旋的影響會較為顯著。



### 2-3.5 Wagner effect

當飛機起飛時，其環流量不會馬上趨於穩定，其停滯點也不會上移至機翼後緣滿足 Kutta condition，往往都必須要一段時間等到上述條件都滿足，定翼機才能起飛穩定飛行。這個現象由 Wagner 於 1925 年發現(Wagner, 1925)並在後來 1931 年被 Walker 實驗(Walker, 1931)，因此稱為 Wagner effect。

Wagner effect 對於定翼機的起飛造成負面的影響，因此定翼機需要足夠的起飛距離與速度。然而拍撲翼為往返運動的暫態效應，且有學者發現拍撲翼的低雷諾數及高攻角性質使的 Wagner effect 影響很小，因此後來學者在研究生物拍撲翼時往往都將此效應給忽略以將更多的心力投入到其他的暫態效應上。

### 2-3.6 準穩態模型

現在的電腦效能極高，讓大部分的人都可以個人電腦模擬出三維的流場，並觀察一些特有的現象。然而在早期電腦沒辦法做到時，由於昆蟲的流場有低雷諾數的特性，不能夠忽略黏性，這使的流場統御方程式相當複雜，依靠人力很難解出解析解，因此必須採用簡化過的模型。

當拍撲翼在某一瞬間受到了作用力，可以近似成在穩態相同條件下物體受力。如此一來將所有暫態的瞬間都近似成穩態，最後再把計算結果全部串連，即為準穩態模型，這也成了較早期許多文獻會使用的模型。

準穩態模型使升力的預估變得容易許多，然而也往往低估了升力，因此有學者提出需要加上一些暫態機制，如翅膀旋轉、附加質量等，做修正來提高準確度。後面將分別介紹這些暫態機制。

### 2-3.7 尾流捕捉、附加質量及翅膀旋轉

拍撲翼與固定翼之間最大的區別在於拍撲翼為翅膀往返運動，必須用暫態機制來解釋，而固定翼則是穩態機制就可以解釋。下面將對拍撲翼的暫態機制中最重要的尾流捕捉、附加質量及翅膀旋轉(或 Kramer effect)來做說明，這些機制在拍撲



翼機制中往往不會單獨出現。

### 尾流捕捉

翼尖渦旋與翼前緣渦旋會使的後方產生誘導的下洗氣流，因此定翼機需要想辦法避開前方機翼產生的尾流，否則會造成不穩定甚至失速的現象。然而昆蟲的為連續拍翅，因此產生的渦旋影響是不可避免的，然而生物可以利用拍撲翼巧妙的運用這些渦旋，反而產生一些有益的效果，這個機制稱為尾流捕捉。由圖 2-7 可以看到當翅膀下拍結束轉上拍時(C 到 D)，下拍產生的渦旋還存在於流場，而上拍過程中(E)翅膀因為遇到了下拍流下的渦旋而產生了更大的作用力。

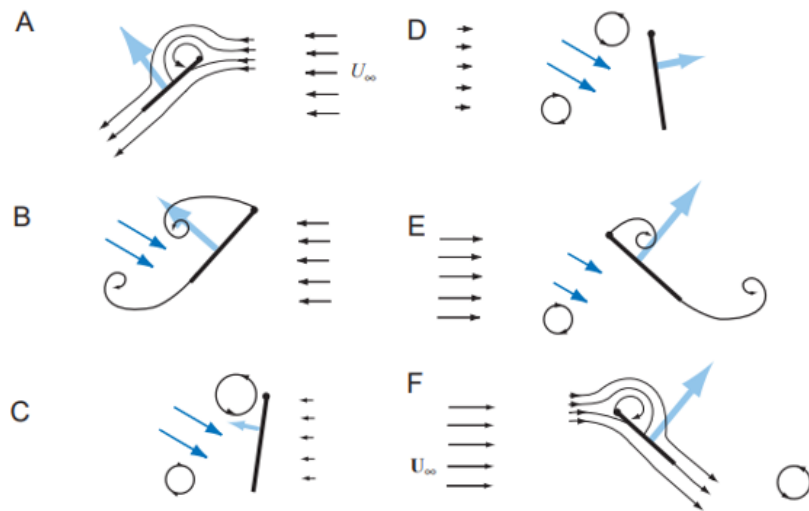


圖 2-7 尾流捕捉示意圖，其中 A 到 C 為下拍，D 到 F 為上拍。(參考圖源：Sane, 2003)

### 附加質量

當翅膀在做加速或減速運動時，勢必會帶動周遭的空氣改變慣性，如同這些空氣附著在翅膀上使其變重一樣，因此稱為附加質量效應(Minotti, 2002; Sane & Dickinson, 2002; Vogel, 1996)。這個效應在利用準穩態模型預估升力時必須要被加上，才能夠提高準確度(Sane, 2003)。

### 翅膀旋轉

生物在上下拍時會不停的做翅膀旋轉，而翅膀旋轉除了改變攻角以外，還會因

為旋轉本身造成的環流量變化影響空氣作用力。翅膀旋轉時，翅膀周遭的流體會造成極大的變化，而原本穩定在翼後緣的第二停滯點也無法立即反應。這時為了重新滿足 Kutta condition，翅膀周圍會產生一個環流量使第二停滯點重新回到新的翼後緣位置，這個現象最早由 Kramer 於 1932 年提出(Kramer, 1932)，因此稱為 Kramer effect。Kramer effect 對升力造成的影響可能增加也可能減少，取決於環流產生的方向，而環流方向又會因為飛行方向或翅膀旋轉方向而有所不同。若環流產生方向與原本飛行時的環流方向相同，則會增加升力；反之則會減少。

圖 2-8 為 Dickinson 等人於 1999 年模仿果蠅的翅膀做出一個機構，並將翅膀旋轉時機分成領先、同時與落後拍撲，再量測對應的受力。他們發現不論上拍下拍，在起始與結束的位置都會有一個升力的峰值，他們將其分別做白點與黑點標記。黑點的部分為 Kramer effect 造成的影響，至於白點較有爭議性，Dickinson 認為是尾流捕捉造成的(Dickinson *et al.*, 1999)，而 Sun 認為是附加質量造成的結果(Sun & Tang, 2002)，後來 Sane 則在其 review 中(Sane, 2003)表示這兩種效應應該都對白點的升力峰值有所貢獻。

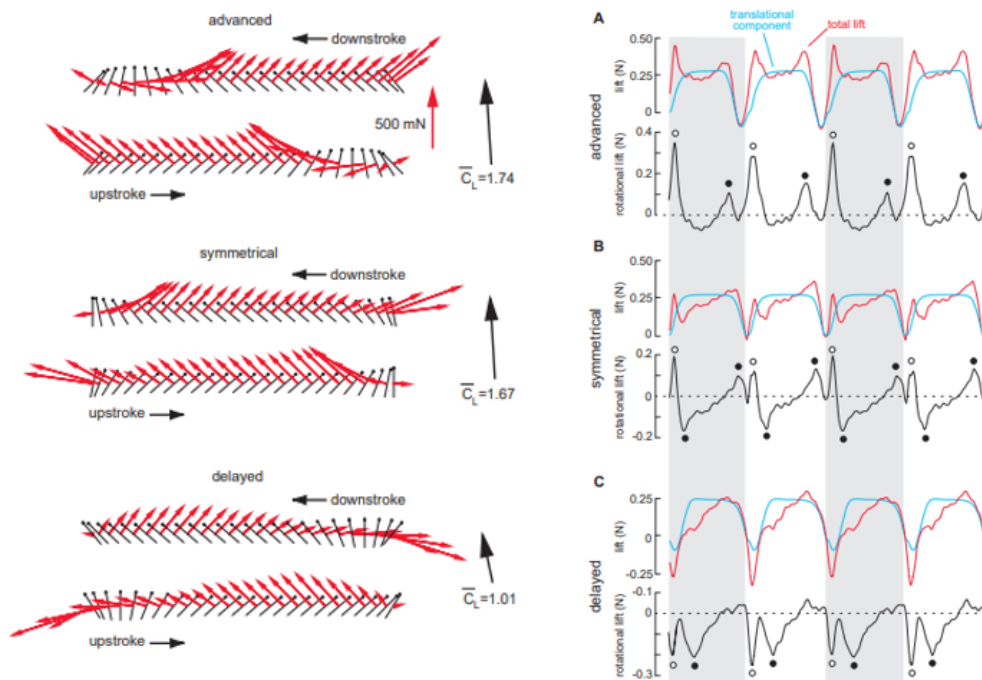


圖 2-8 左圖為旋轉相位示意圖，黑色線為翅膀側面；右圖為量測之升力值，其上拍與下拍的開始點以白點標記，結束點以黑點標記。(參考圖源：Dickinson *et al.*, 1999)



### 2-3.8 夾翼與拋翼

昆蟲在拍撲飛行時，左右兩翅會互相靠近或遠離，此時牠們會以特別的拍翅模式來提升升力或推力，這個機制被稱為夾翼與拋翼(clap and fling)

這個機制最早是由 Weis-Fogh 於 1973 年從一種蜂類觀察到的特殊飛行機制(Weis-Fogh, 1973)。當翅膀互相靠近時，會將流體從翅膀中的縫隙往外擠，這個將翅膀夾起來的步驟稱為夾翼；而在翅膀分開時，兩翅之間會產生一個低壓區造成吸力，而後快速產生一個渦旋，形成一個大且穩定的低壓區，這個步驟則稱為拋翼。後來也有許多研究者開始著手研究這個領域(Bennett, 1977; Lighthill, 1973; Maxworthy, 1979; Spedding & Maxworthy, 1986)。

然而夾翼與拋翼只在尺寸較小的昆蟲中才容易被觀察到，大尺寸的只有蝴蝶與豆娘(Sunada *et al.*, 1993)，且在自由飛行中這些昆蟲也很少使用夾翼與拋翼。有學者認為夾翼與拋翼對翅膀的受損可能較大，且需要大角度的拍撲角，可能比較沒有飛行效率，因此比較少昆蟲會採用這個機制。

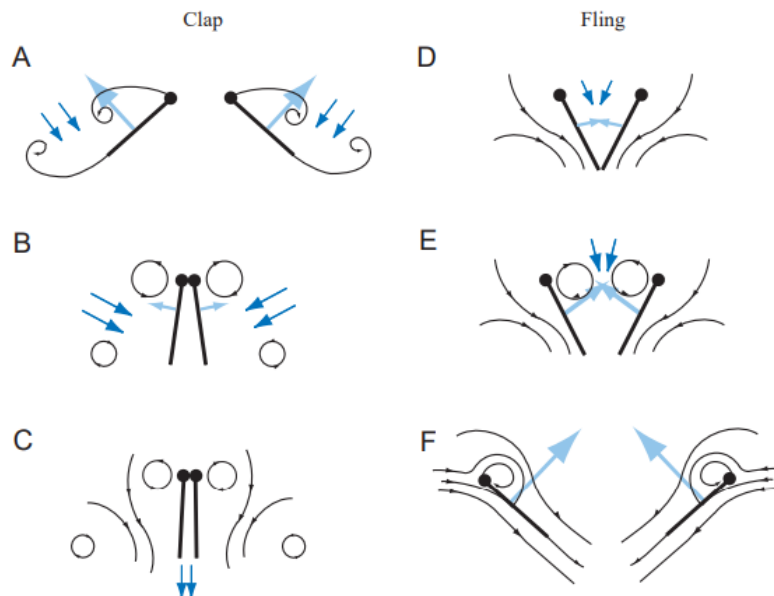


圖 2-9 夾翼與拋翼示意圖(參考圖源：Sane, 2003)



## 2-4 相關文獻回顧

昆蟲有時擔任狩獵者的角色，需要捕食，有時也擔任被狩獵者，需要盡全力逃跑。有些昆蟲需要遷徙，必須以最省力的方式向前飛行，有時又需要找棲息地降落，以最高效率的方式懸停。因此昆蟲做為無人飛行器的參考非常適合，有快速前飛、慢速前飛、起飛、降落、懸停、滑行、轉彎飛行等等，非常多種飛行模式。在前一個單元介紹了這麼多昆蟲的飛行物理機制之後，在這個單元將整理前人對於昆蟲的飛行有什麼樣的發現或突破，本研究也是參考這些前人的研究，站在巨人的肩膀上，以便可以看得更遠。

### 2-4.1 前後翅交互作用

前後翅交互作用為雙翅昆蟲與單翅昆蟲最大的差異之一，從 1994 年 Dickinson 發現後(Dickinson, 1994)，也有許多人開始著手研究前後翅交互作用。

Hu & Deng 使用仿蜻蜓的機構，利用聚酯薄膜做為翅膀，並使用兩隻翅膀分別代表蜻蜓的前後翅去做模擬。為了簡化機構他們將偏離角給省略了，但是改變了前後翅的相位差，並研究不同的相位差會有什麼樣的交互作用(Hu & Deng, 2014)。

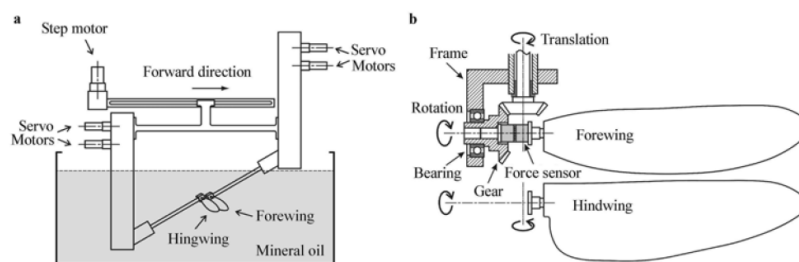


圖 2-10 機構示意圖(圖片來源：Hu & Deng, 2014)

由於翅膀比一般蜻蜓大，他們使用油來當作流體以符合雷諾數，並且利用氣泡來拍攝 PIV，結果發現在零度相位差時，後翅產生的翼前緣渦旋會使前翅受到上洗氣流影響提升升力，而前翅上拍產生的下洗氣流由於後翅也在上拍，上拍時攻角幾乎垂直，也就是翅膀平行於下洗氣流，沒有因此影響到升力；而在 180 度相位差



時，前翅上拍產生的下洗氣流會使正在下拍的後翅升力下降，因此得出了同相位的前後翅交互作用升力會比反相位好。因此他們的結論是在高速前飛或爬升的時候，蜻蜓會偏向同相位，而懸停的時候會採取反相位的方式以提升穩定性。然而他們的結果沒有考慮翅膀旋轉相位，也沒有考慮到偏離角，其攻角與拍撲角也是固定的，因此並不適用所有的情況。

## 2-4.2 偏離角

Luo 參照果蠅的翅膀建模，使用電腦去做數值模擬，針對四種不一樣的翅膀軌跡去做模擬，分別是直線但是維持正 10 度的偏離角去做拍撲、U 字形拍撲、橢圓形(O 字形)拍撲以及 8 字形拍撲，並與沒有偏離角的情況下去做升力的比較，他們從結果發現了偏離角對於升力的影響大致可以分成兩個效應來討論，一個是附加翼旋轉效應(added-rotation effect)，另一個則是有效攻角改變(Luo *et al.*, 2017)。

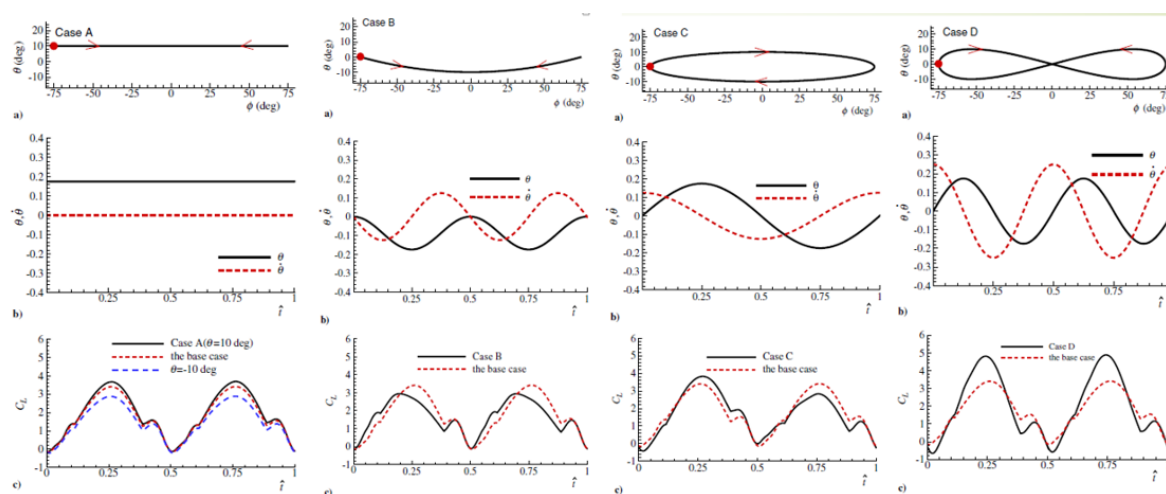


圖 2-11 不同的翅膀軌跡對於升力造成的影響(圖片來源：Luo *et al.*, 2017)

他們的結果與 Sane & Dickinson 使用機構量測出來的結果差異不大(Sane & Dickinson, 2001)，但是在 Case A，也就是以正 10 度的偏離角直線往返拍撲的升力比在拍撲平面上的直線往返拍撲要來的大，於是他們又額外做了以負 10 度的偏離角，相同動作的拍撲發現升力又比較小，因此他們提出了附加翼旋轉效應。從尤拉角的公式可以推出，當偏離角為正的時候，即便在攻角不變的情況下，翅膀會有一



個正向翼旋轉(pitch up);反之當偏離角為負時,翅膀會有反向翼旋轉(pitch down),而早已有文獻提出過正向翼旋轉會增加升力(Lan & Sun, 2001)。偏離角速度為負的時候,有效攻角會因為來流速度方向不同而增加,角速度為正時則有效攻角會減少。

在功率方面,他們用耗功除以升力比來比較,發現 Case D 雖然相較於其他情形增加了很多升力,但是增加了更多的功率消耗,因此效率較差,這是因為有效攻角增加的效應會增加耗功。

因此他們的結論是,偏離角為正或偏離角速度為負時會升力會增加,反之會減少。因此昆蟲在懸停時應該偏向於水平拍撲,而在比較激烈的上升飛行或加速前飛應該為 8 字形拍撲。這個結果對於偏離角效應做了很好的整理,但是他們是針對果蠅的翅膀去做模擬,而豆娘與蜻蜓翅膀較不一樣,更重要的是有前後翅交互作用的影響,這很可能會增加較多的不確定性因素。

Kim 在 2019 年發表了一篇討論偏離角效應的文獻(Kim *et al.*, 2019)。他們利用單邊單翅的機構,以及準穩態模型,分別觀察偏離角造成的影響。他們比較了機構與準穩態模型的結果,發現偏離角效應都存在,但其中有一些誤差。而準穩態模型會忽略一些暫態的效應,因此有誤差是可以理解的。

Xu *et al.* (2006)也對於蜻蜓的拍撲軌跡討論過,他們將拍撲軌跡調整成 8 字形、雙 8 字形、以及 O 字形去做比較,並且也改變他們的偏離角振幅,然而發現僅 8 字形的升力係數與推力優於水平拍撲,也就是偏離角振幅為零。然而他們採用的模擬是蜻蜓單翅的模型,也完全忽略了前後翅可能造成的影響。已經有很多文獻對於前後翅交互作用或是偏離角做出討論,並且得到的結果都是會有影響昆蟲的升力或推力(Hu & Deng, 2014; Lehmann & Pick, 2007; Sun & Huang, 2007; Sun & Lan, 2004; Sun *et al.*, 2017; Wang & Sun, 2005; Xu *et al.*, 2006; Zhang & Lu, 2009), 因此豆娘的偏離角效應仍然有很多討論的空間。

### 2-4.3 小結

從前面提到關於偏離角的文獻我們可以得知，偏離角與拍撲軌跡對於升阻力以及功率消耗有不容忽視的影響，大部分的文獻主要皆針對 8 字形拍撲與 O 字形拍撲去做研究，並幾乎都得出 8 字形拍撲的升力比較理想此一結論；而 O 字形拍撲也有不少文獻提到，但是都沒有得到很明確的結論。透過這些文獻留下來的結果、發現與基礎知識，本研究將對於豆娘在前飛時所常見的拍撲軌跡去做更進一步的研究與解釋。

有相當多文獻研究蜻蜓的模型與拍撲，卻很少學者研究豆娘作為飛行器的動作參考，更少人會去了解豆娘的前後翅交互作用與偏離角。雖然蜻蜓與豆娘十分相似，卻還是有生理上的不同，導致動作上也有些不同。由頻率來看，豆娘的拍撲約為 10~25 Hz，而蜻蜓卻是 30~40 Hz，豆娘的頻率明顯較低，若能夠成功參考並模仿，便能減少功率消耗以及飛行器零件的耗損。另外豆娘的翅膀肌肉組織更富含彈性，可以觀察到豆娘的拍撲比蜻蜓有更多不同的方式，而本研究便是希望透過高速攝影機採樣，再利用軟體模擬並分析豆娘前後翅的偏離角與拍撲軌跡不同，對於豆娘翅膀周圍的流場以及前後翅交互作用會有什麼樣的變化，進而影響豆娘整體的升阻力、速率甚至消耗的功率，找到在不同的飛行模式下，屬於豆娘最佳的偏離角與拍撲軌跡。



### 第三章 研究方法

本文的研究方法架構圖如下圖。本研究使用高速攝影機，搭配正交攝影技術得到豆娘飛行影片，並將其標點取得動態，再利用數值模擬搭配動態網格技術對於豆娘的翅膀偏離角進行分析，觀察偏離角或翅膀拍撲軌跡對於升阻力與功率的影響，並歸納出各個飛行模式的最佳策略以便於應用至無人拍撲翼飛行器上。



圖 3-1 研究方法架構圖



### 3-1 動態捕捉

#### 3-1.1 研究物種

本文的研究對象為豆娘(damselfly)，與蜻蜓相似均屬蜻蛉目，其左右各有一對前後翅，且豆娘的肌肉組織允許四翅皆為獨立動作，使豆娘有非常多種飛行動作，而本文要研究的偏離角便是其中的一個特色。

而本文要研究的豆娘屬於台灣特有種，名稱為短腹幽蟴(*Euphaea Formosa*)，大約四月開始常見於晴天溪邊，並持續至十一月。短腹幽蟴的特徵在於翅膀大面積為黑褐色，末端為透明色，成蟲大約 4~5 公分長，雄蟲腹部略比雌蟲短，雄蟲的胸部為黑色帶橙色條紋，雌蟲則為較亮的黃色，且側視腹部有一條黃色的紋路。本研究取得豆娘的時間在 2018 年 9 月~10 月，地點在新北市新店區北宜路二段，以及新北市新店區銀河路的青潭溪分支。在早晨抓完豆娘後，由於豆娘的活力在數小時內逐漸降低，因此會將其與該溪流的樹枝、樹葉等一起放入昆蟲箱並立即返回實驗室做拍攝的準備。每次抓取豆娘約取成蟲五到六隻，其餘外觀上尚未成熟的豆娘會就地放生，以尊重大自然。

在拍攝結束後，會對豆娘的身體與翅膀做測量，取得翅膀與身體質量、展長、弦長、身長等數據，以便於後續實驗模擬時使用。

表 3-1 短腹幽蟴的科學分類表

界	動物界	Animalia
門	節肢動物門	Arthropoda
綱	昆蟲綱	Insecta
目	蜻蛉目	Odonata
科	幽蟴科	Euphaeidae
屬	幽蟴屬	<i>Euphaea</i>
種	短腹幽蟴	<i>Euphaea formosa</i>

### 3-1.2 動態捕捉設備

本研究採取高速正交攝影技術來捕捉動態，並將照片標點得到豆娘動態以放入數值模擬軟體做模擬。我們將豆娘置入一透明壓克力箱，其大小為 $50 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$ ，並置入一些當地的樹枝、樹葉等做擺飾，讓豆娘棲息。豆娘由一端置入，並在另一端放置光源，利用昆蟲的趨光性引誘豆娘做飛行動作。使用的兩台高速攝影機分別為 Phantom v7.3(配 50 mm Nikon-standard lens)和 Phantom v310(配 60 mm Nikon micro lens)，其中 Phantom v7.3 為黑白攝影機，拍攝俯視視角，解析度設定為 $800 \times 600$ (最高 $800 \times 600$ )，v310 則為彩色攝影機，解析度設定為 $1024 \times 768$ (最高 $1280 \times 800$ )，拍攝側視視角。高速攝影機設置正交且同步，由於豆娘拍翅頻率範圍在 $10 \sim 25 \text{ Hz}$ ，因此我們設定攝影機的取樣頻率為 $2000 \text{ fps}$ ，曝光時間為 $490 \mu\text{s}$ ，在這樣的設定下攝影機一次最多可以拍攝七秒鐘。本實驗架設兩台攝影機，因此僅擷取豆娘直線飛行、懸停等飛行於同一平面上的片段，再利用 ImageJ 生物分析圖像軟體做標點，以獲得豆娘的翅膀動態。



圖 3-2 Phantom v7.3 高速攝影機



圖 3-3 Phantom v310 高速攝影機

表 3-2 高速攝影機規格表

	Phantom v310 CMOS camera	Phantom v7.3 CMOS camera
resolution	1280×800 pixels	800×600 pixels
Max. frame rate	500000 fps	190476 fps
Pixel size	20 μm	22 μm
Sensitivity	ISO 7000 mono, 2100 color	ISO 4000 mono, 1200 color
Shutter	Global electronic shutter	Global electronic shutter
Exposure mode	Extreme Dynamic Range (EDR)	Extreme Dynamic Range (EDR)
Lense mount	G-mount, F-mount, PL-mount (Nikon)	F-mount (Nikon and Canon)
Sensor aspect ratio	8:5	4:3
Software	Phantom PCC	Phantom PCC

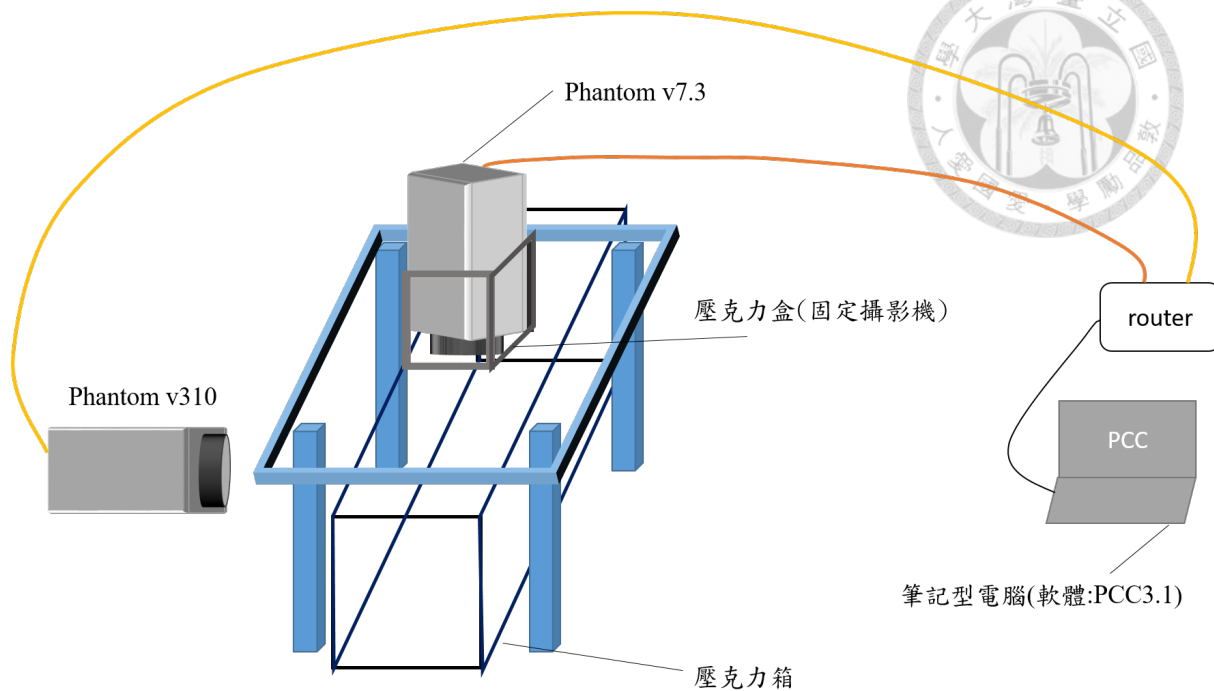


圖 3-4 實驗架設示意圖





### 3-1.3 翅膀動作取樣與分析

經過高速攝影機的正交攝影之後，豆娘的影像會分成側視與俯視畫面。我們將此影片檔分解轉存成 tiff 圖片檔，並輸入至 ImageJ 座標點的動作。本研究在標點的部分是取豆娘翅膀上的五個特徵點，分別是翼根、前翅翼前緣、前翅翼後緣、後翅翼前緣、後翅翼後緣。將每一張圖的特徵點標示完畢後，側視圖及俯視圖分別可以得到兩個座標的資訊，交疊以後便可獲得 x、y、z 三維空間的座標。由於豆娘的翼旋轉軸十分靠近翼前緣，因此本研究以豆娘翼前緣作為翅膀的旋轉軸。將翼根定為原點後，便可將此五個特徵點從實驗室座標轉變為身體座標，進而利用一些數學運算得到旋轉角( $\phi$ )、拍撲角( $\psi$ )、以及偏離角( $\theta$ )。從圖 3-5 可以看到，由於無因次時間定義為前翅下拍起始時為零，後翅此時還在上拍，直到  $t/T=0.3$  時才開始下拍，因此可以得知後翅落後了 0.3 週期。

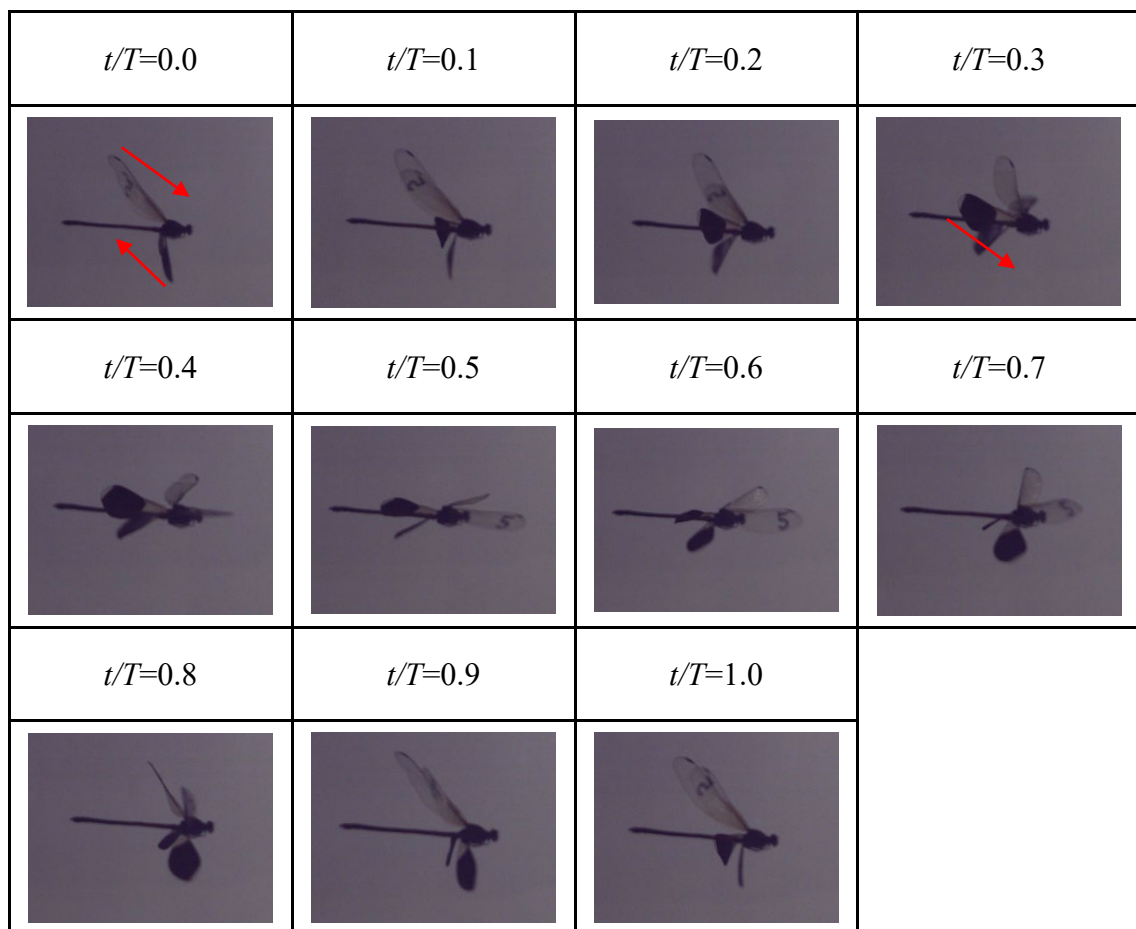


圖 3-5 豆娘側視圖(每 0.1 週期 1 張)





### 3-1.4 翅膀動態定義

#### 座標軸定義

本研究將豆娘身體座標原點固定於翼根上，前翅與後翅的翼根視為重疊，而座標軸的定義為豆娘的身體右側視為  $x$  軸，前進方向為  $y$  軸，上方為  $z$  軸，如圖 3-4 所示。圖 3-5 為豆娘的模型示意圖，上方為前翅的初始拍撲位置，下方為後翅的初始拍撲位置，這裡僅展示右翅的模型。

#### 翅膀角度定義

前一章節提到的翅膀動態角度，經過介紹過取樣與分析方法後，本文在這裡再做詳細的定義。

#### 旋轉角 $\phi$

翅膀旋轉角可視為拍撲平面法向量與翅膀法向量的夾角，而翅膀法向量可利用翼前緣與翼後緣對於翼根原點的向量外積獲得。

#### 拍撲角 $\psi$

拍撲角為翼旋轉軸垂直投影至拍撲平面後，與拍撲零點的夾角。其中拍撲零點本文定義為豆娘身體的正右側，以本文的座標軸為例為正  $x$  方向，詳細定義為拍撲平面與以  $y$  軸為法向量且經過翼根之平面的相交線。

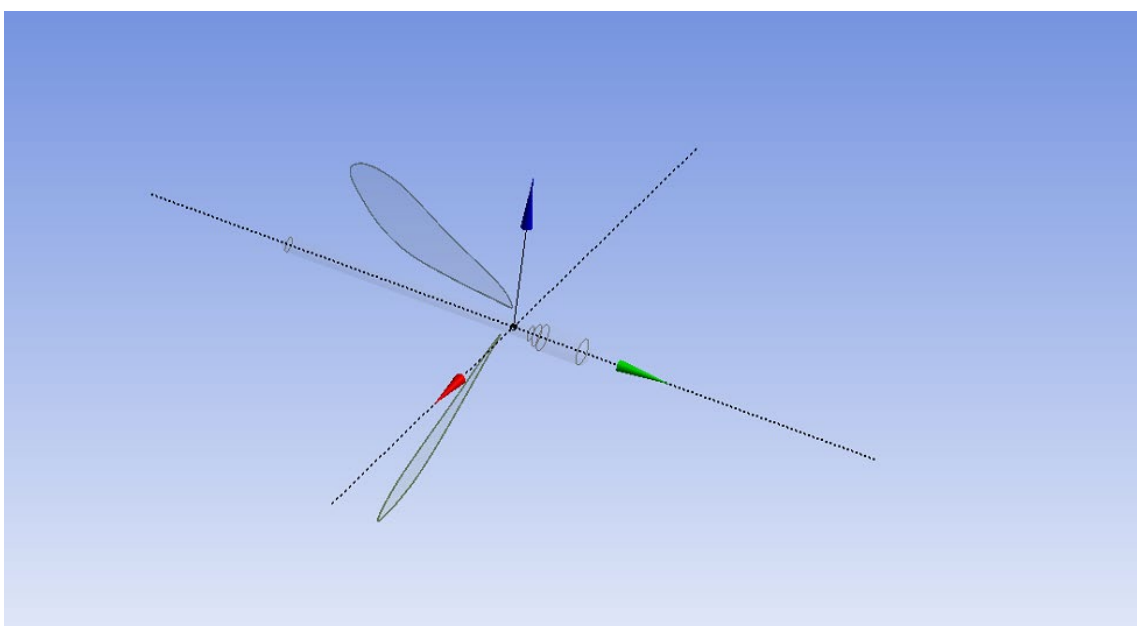


圖 3-6 豆娘模型圖，紅色為  $x$  軸，綠色為  $y$  軸，藍色為  $z$  軸



## 偏離角 $\theta$

偏離角為翼旋轉軸與拍撲平面之夾角，可經由翼前緣向量與拍撲平面法向量夾角的補角取得。

## 拍撲平面傾斜角 $\beta$ 與方向角 $\gamma$

由於豆娘不同於一般昆蟲，其肌肉組織富含彈性而有高自由度的拍撲，使他的拍撲平面並不固定。而除了前面提到的傾斜角以外，豆娘的翅膀軌跡由側視圖來看，往往不會經過翅膀翼根，即拍撲平面並不單純只是向前傾斜(以本研究的座標軸為例，為繞著  $x$  軸傾斜)，因此本研究將拍撲平面先繞  $x$  軸傾斜之後(圖 3-7a)，再繞著實驗室座標的  $z$  軸旋轉(圖 3-7b、c)，並將此角度定義為拍撲平面方向角。如圖 3-7c 所示，其翼根仍然在圓心上，但是翼尖由側視圖來看並不會經過圓心，方位角給予翅膀拍撲更高的自由度，更加貼近了真實情況。前翅方位角通常為正(由上視圖來看為逆時針旋轉)，而後翅方位角通常為負(由上視圖來看為順時針旋轉)，如此一來兩隻翅膀更不容易相撞。

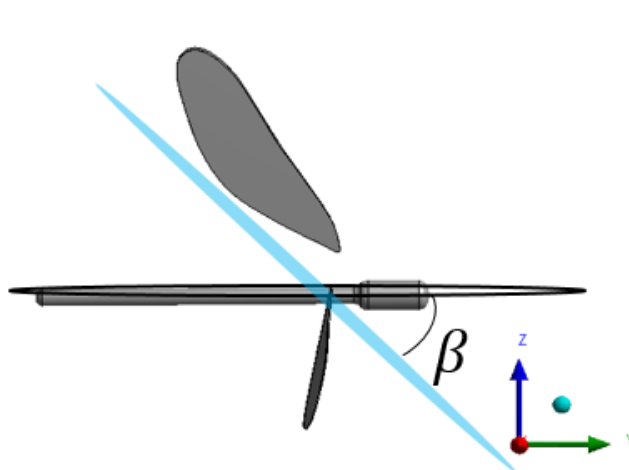


圖 3-7a 拍撲平面傾斜角示意圖，黑色為水平拍撲平面，淺藍色為繞  $x$  軸傾斜後之拍撲平面

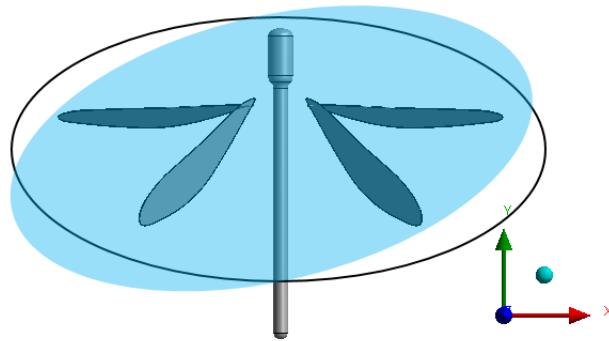


圖 3-7b 拍撲平面俯視圖，黑色為繞 x 軸傾斜後之拍撲平面，藍色為繞實驗室 z 軸旋轉之拍撲平面

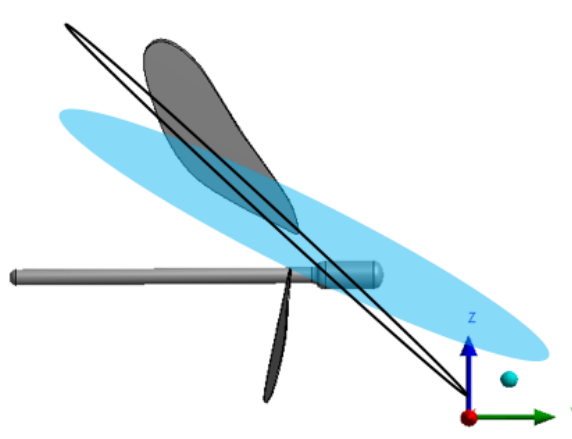


圖 3-7c 拍撲平面側視圖，黑色為繞 x 軸傾斜後之拍撲平面，藍色為繞實驗室 z 軸旋轉之拍撲平面

### 3-1.5 無因次分析

豆娘的飛行表現受到了很多因素的影響，且有些參數並不是那麼容易在固定其他變數的情況下調整，例如流體黏度、密度、溫度往往是相依的變數。如果每一個參數都需要討論，將會非常耗時且繁雜。因此在進行研究的實驗與模擬分析前，將這些參數無因次化，例如改變流體密度、速度等參數變成改變流體雷諾數，便可以大幅簡化實驗流程。首先將影響豆娘飛行表現的參數全部列出來：

表 3-3 輸入參數

變數	符號	因次	變數	符號	因次
展長	$s$	L	拍撲角	$\phi$	無
平均弦長	$\bar{c}$	L	偏離角	$\theta$	無
流體密度	$\rho$	$ML^{-3}$	旋轉角	$\psi$	無
黏滯係數	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$	傾斜角	$\beta$	無
翅膀拍撲頻率	$f$	$T^{-1}$	方向角	$\gamma$	無
質量	$m$	M	前後翅相位差	$\tau$	無
重力	$g$	$LT^{-2}$	拍撲角振幅	$\lambda$	無

表 3-4 輸出變數

變數	符號	因次	變數	符號	因次
升力	$F_L$	$MLT^{-2}$	阻力	$F_D$	$MLT^{-2}$
功率	$Po$	$ML^2T^{-3}$	飛行速度	$U$	$LT^{-1}$

利用白金漢 II 理論進行無因次化：

(a) 將實驗變數以函數表示：

$$F_L = \eta_1(s, \bar{c}, \rho, \mu, f, m, g, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \tau, \lambda) \quad (3-1)$$

$$F_D = \eta_2(s, \bar{c}, \rho, \mu, f, m, g, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \tau, \lambda) \quad (3-2)$$

$$Po = \eta_3(s, \bar{c}, \rho, \mu, f, m, g, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \tau, \lambda) \quad (3-3)$$

$$U_\infty = \eta_4(s, \bar{c}, \rho, \mu, f, m, g, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \tau, \lambda) \quad (3-4)$$

(b) 總變數個數 14 個，基本因次 3 個(M, L, T)，相減後無因次變數剩下 11 個。

(c) 選定密度  $\rho$ 、展長  $s$ 、頻率  $f$  作為重複變數，得到無因次參數  $\Pi_i$  如下：

$$\Pi_1 = \frac{s}{\bar{c}} \quad (3-5)$$



$$\Pi_2 = \frac{\rho(2\lambda fs)\bar{c}}{\mu} \quad (3-6)$$

$$\Pi_3 = \frac{m}{\rho s \bar{c}^2} \quad (3-7)$$

$$\Pi_4 = \frac{(2\lambda fs)}{\sqrt{gs}} \quad (3-8)$$

$$\Pi_5 = \phi \quad (3-9)$$

$$\Pi_6 = \theta \quad (3-10)$$

$$\Pi_7 = \psi \quad (3-11)$$

$$\Pi_8 = \gamma \quad (3-12)$$

$$\Pi_9 = \beta \quad (3-13)$$

$$\Pi_{10} = \tau \quad (3-14)$$

$$\Pi_{11} = \lambda \quad (3-15)$$

(d)得到新的函數關係式：

$$\frac{F_D}{0.5\rho(2\lambda fs)^2(2s\bar{c})} = \eta_1\left(\frac{s}{\bar{c}}, \frac{\rho(2\lambda fs)\bar{c}}{\mu}, \frac{m}{\rho s \bar{c}^2}, \frac{(2\lambda fs)}{\sqrt{gs}}, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau\right) \quad (3-16)$$

$$\frac{F_L}{0.5\rho(2\lambda fs)^2(2s\bar{c})} = \eta_2\left(\frac{s}{\bar{c}}, \frac{\rho(2\lambda fs)\bar{c}}{\mu}, \frac{m}{\rho s \bar{c}^2}, \frac{(2\lambda fs)}{\sqrt{gs}}, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau\right) \quad (3-17)$$

$$\frac{Po}{0.5\rho(2\lambda fs)^3(2s\bar{c})} = \eta_3\left(\frac{s}{\bar{c}}, \frac{\rho(2\lambda fs)\bar{c}}{\mu}, \frac{m}{\rho s \bar{c}^2}, \frac{(2\lambda fs)}{\sqrt{gs}}, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau\right) \quad (3-18)$$

$$\frac{U}{(2\lambda fs)} = \eta_4\left(\frac{s}{\bar{c}}, \frac{\rho(2\lambda fs)\bar{c}}{\mu}, \frac{m}{\rho s \bar{c}^2}, \frac{(2\lambda fs)}{\sqrt{gs}}, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau\right) \quad (3-19)$$

並寫成：

$$C_D = \eta_1(AR, Re_c, N_m, Fr, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau) \quad (3-20)$$

$$C_L = \eta_2(AR, Re_c, N_m, Fr, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau) \quad (3-21)$$

$$C_P = \eta_3(AR, Re_c, N_m, Fr, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau) \quad (3-22)$$

$$J = \eta_4(AR, Re_c, N_m, Fr, \phi, \theta, \psi, \gamma, \beta, \lambda, \tau) \quad (3-23)$$



其中  $C_D$ 、 $C_L$ 、 $C_P$ 、 $J$  分別為阻力係數、升力係數、功率係數與推進比，而  $AR$  為展弦比，即翼展除以平均弦長， $Re_c$  則為有效長度為平均弦長的雷諾數， $N_m$  為無因次質量， $Fr$  為福祿數(Froude number)。

## 3-2 數值模擬

### 3-2.1 統御方程式

豆娘的飛行屬於低雷諾數飛行，其飛行速度也不會超過 10 m/s，因此我們假設流場為層流，不可壓縮，且流體為空氣，可假設為牛頓流體，根據上述條件簡化後的質量守恆方程式與動量守恆方程式如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3-24)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{g} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{a}_i \quad (3-25)$$

其中  $\mathbf{u}$  為速度向量， $P$  為壓力， $\rho$  為流體密度， $\mathbf{g}$  為重力向量， $\mu$  為流體黏度， $\mathbf{a}_i$  為假想的加速度。

### 3-2.2 軟體介紹

本研究使用的軟體為美國 ANSYS 公司開發的軟體 ANSYS Workbench 14.0，在這個軟體內 ANSYS 公司整合了所有工程上相關的數值模擬軟體以處理各式各樣的物理問題，由於一個物理問題往往不會只涉及一個領域，因此該公司研發的這個平台就是為了要使的所有工程上的問題都能夠跨領域合作來解決，可說是目前最完整，應用也最廣泛的商用軟體之一。本研究使用到的是 ANSYS Workbench 中用來計算流體力學的軟體 Fluent，該軟體為 Fluent 公司於 1983 年所開發的流體力

學軟體，在 2006 年被合併到 ANSYS 平台，專門處理流體力學相關的物理問題。

### 3-2.3 網格與動網格

#### 網格

納維爾—斯托克斯方程式為一個雙曲線型非線性微分方程式，即便經過了一些簡化，在計算上仍然難以直接獲得解析解。因此我們必須依靠電腦利用有限體積法將流體區域分成無數個小區塊，這些區塊我們就稱為網格(mesh)。

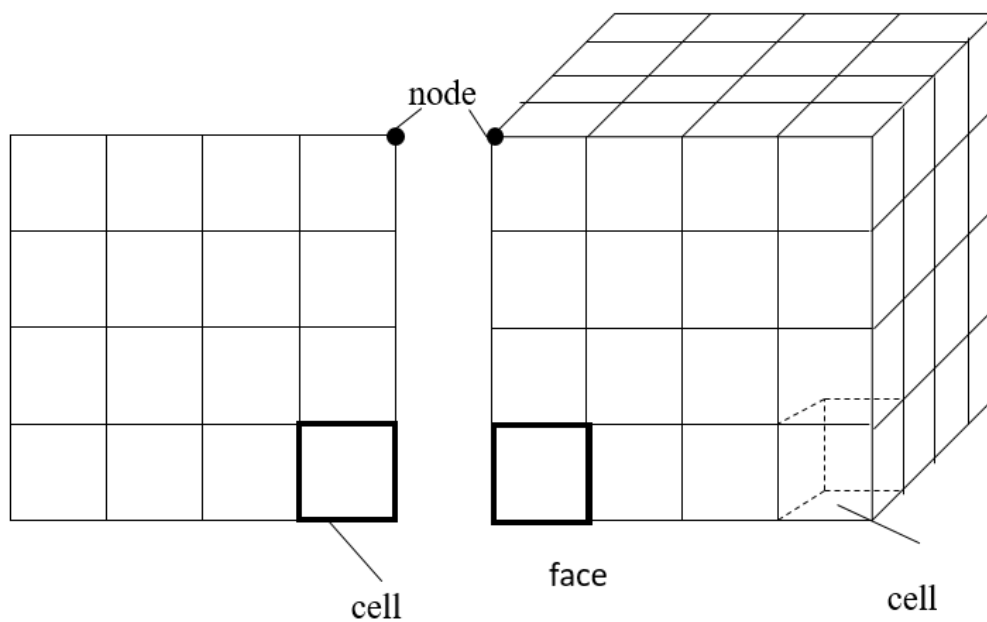


圖 3-8 網格示意圖

網格可分成結構網格(structured grid)與非結構網格(unstructured grid)，結構式網格又稱為映射切割網格，其格點較為井然有序；而非結構式網格又稱為自由切割網格(free mesh)，格點之間比較沒有規則性，只知道相鄰個點的相關位置，因此需要以資料庫的形式儲存個點的位置。其優缺點比較如下表。機械元件的有限元素模擬時常使用非結構網格，因為雖然速度較慢但是比較沒有限制且適用於複雜外型，因此本文使用非結構網格來進行流場模擬分析。

表 3-5 結構網格與非結構網格之優缺點比較(參考自：費約翰博士論文)

	結構網格	非結構網格
優點	網格生成速度快 網格品質較高 數據結構簡單 數值較精準且容易收斂	複雜外型也可以適用 網格大小與密度較不受限制
缺點	對於複雜外型的結構較不適合，僅適合簡單的外型結構	計算儲存需求大 填充效率低 無法很好處理黏性的問題

除了網格的大小與密度會影響到計算結果數值的精準度以外，網格的品質也很重要。在 ANSYS 的 Fluent 中，他們定義了一個參數來評斷網格的品質，那就是歪斜度(skewness)。若為 2D 網格，三邊形最均勻對稱的是正三角形，四邊形則是長方形，上述兩個形狀屬於完美的網格，其歪斜度為 0，否則會有歪斜度。歪斜度的定義如下：

$$\text{skewness} = \frac{\text{optimal cell size} - \text{cell size}}{\text{optimal cell size}} \quad (3-26)$$

網格歪斜度以及數量可以從 Fluent 的網格數據內找到，系統在建立網格之後會自動計算出，我們可以根據歪斜度來決定自己要不要使用這個網格，或是調整參數來改善網格品質。



表 3-6 歪斜度對應的品質對照表(參考自 Fluent 說明)

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 — <1	bad (sliver)
0.75 — 0.9	poor
0.5 — 0.75	fair
0.25 — 0.5	good
>0 — 0.25	excellent
0	equilateral

### 動網格

動網格顧名思義，就是在模擬的過程中，網格會不停的變動，便稱為動網格。由於生物飛行的模擬翅膀會一直拍動，因此翅膀周圍的流體形狀也會跟著改變，網格也勢必需要改變成符合那一瞬間流體形狀的網格，因此本實驗也必須使用動網格的技巧來進行模擬。然而網格在變動的過程中，可能會因為位移量過大而造成網格過度拉伸，這會導致歪斜度大幅增加或是品質驟降，導致計算結果數值無法收斂，或甚至更嚴重的情況下網格與周圍相鄰的網格重疊，導致負體積(negative volume error)的錯誤，而強制停止模擬。Fluent 為了避免這樣的情況發生，提供了三種動網格變動策略，分別是光順(Smoothing)、動態層變(layering)、以及網格重建(remeshing)，而這三種技術有分別適合應用的情況以及優缺點，下面將介紹這三種策略的差別之處。



## 光順法(smoothing)

光順法可以分為擴散光順法(diffusion-based smoothing)與彈簧光順法(spring-based smoothing)，擴散光順法是利用擴散方程式來修正網格點的位置，由於擴散方程式為

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (3-23)$$

其中 $\bar{\mathbf{u}}$ 為網格位移速度，而 $\gamma$ 為擴散係數，又可以寫成

$$\gamma = \frac{l}{d^\alpha} \quad (3-24)$$

其中 $d$ 為標準化邊界距離(normalized boundary distance)， $\alpha$ 為使用者可以輸入的參數。

因此最後我們可以再利用式 3-6 來得到調整後的網格位置。

$$\bar{\mathbf{x}}_{\text{new}} = \bar{\mathbf{x}}_{\text{old}} + \bar{\mathbf{u}} \Delta t \quad (3-25)$$

另一種光順法則為彈簧光順法，其概念大約式將網格上任意兩個節點之間的連線假想為使用一個彈簧去連接，而在最後平衡時，所有兩節點間的彈簧淨力必須為零，依照此概念可以利用虎克定律計算出每個時間點的位移，其中彈性係數可以從軟體內由使用者自行設定。

光順法不會有任何的網格被生成或被淘汰，支援非結構網格，但是此種拉長或壓縮運動中邊界附近的網格方法並不適用於過大變形的運動邊界。

## 動態層變法

此種方法的概念是拉伸到過大的網格破壞並產生新網格，以及將被過度壓縮的網格合併與周圍的網格合併，以避免網格被壓縮至負體積。使用者可以在軟體內設定分裂因子(split factor)以及合併因子(collapse factor)，來控制網格被拉伸及壓縮至什麼程度再進行重構，以保持使用者希望的網格品質。這種方法比較適合應用於計算運動邊界為單純的線性運動，在 Fluent 中支援四邊形與六面體網格。



### 網格重構法

這個方法相較於前面兩個方法，較適合使用在變形量較大的情況下。網格重構法概念類似於動態層變法，Fluent 會將歪斜度或尺寸標準等造成網格品質不合格的網格標記起來，在該次計算結束之後進行局部性重構。使用者在建構網格時會輸入網格單元尺寸的最小值、最大值與網格最大歪斜度，分別就是網格重構法判斷網格是否壓縮、拉伸過度以及網格是否過度變形的判斷條件。這種方法相較於前面介紹的兩種方法較為全面性，但是相對的就，計算所需要耗費的時間就比較長。

本研究使用的方法是彈簧光順法與網格重構法，其中彈簧光順法的彈簧係數設定為 0.001，而 boundary node relaxation 設定為 1，這個參數設為 1 會使的網格位移量依照虎克定律計算出來後不經過任何調整直接套用，其餘參數則為系統預設值。網格重繪法的最大歪斜度則設定為 0.85。

### 3-2.4 求解器設定

本研究使用的求解器為 Fluent 內建的壓力求解器(pressure-based solver)，原因為其適用於計算低流速之不可壓縮流體。其中速度場由動量方程式推得，壓力場由動量方程式與連續方程式推導出的壓力方程式取得，並且將速度場代回壓力方程式做修正以確保速度可以滿足連續方程式。如此不斷的計算，將速度代回連續方程式求出殘值，重複迭代至解答收斂。求解時，對流項使用的離散方法為二階上風法(second-order upwind method)，而在擴散項使用的則是 Green-Gauss Node-Based，而速度與壓力則是 SIMPLE 法(semi-implicit for pressure-linked equation)。

### 3-2.5 使用者自訂函數(User Defined Function)

Ansys FLUENT 提供使用者利用 C 語言寫入自訂函數，透過程式編譯過後製造一個含了程式碼資訊的資料夾，使的這套數值分析軟體可以讀取以套用到更多種流場而較不受限制。以本研究為例，必須要模擬豆娘在空氣中拍撲製造的流場與升阻力，而使用者自訂函數則包括重力的考量、翅膀的動作、翅膀功率、升阻力以



及其他本研究所需資訊的計算，下面將簡單介紹本研究的使用者自訂函數寫入了哪些功能。

### **DEFINE\_INIT**

此函數名稱由來為 initialize，是為了初始化流場及給定初始條件所寫的函數。本研究利用此函數給予流場初始壓力作為流場初始化。

### **DEFINE\_SOURCE**

此函數可以給予流場中的某物體一個動量。以本研究為例，本研究在此函數給予前翅與後翅設定了 Z 方向(垂直方向)的動量，其值為重力造成的動量變化，其目的就是將重力給考量進去。除此之外，由於流場座標為昆蟲飛行的相對座標，昆蟲模型於原點拍撲，而來流速度為 Fluent 計算出昆蟲的前進速度與上升速度。由於此為加速座標系，需要多考慮假想力，這個假想力也是藉著此函數內的程式碼來加入計算。

### **DEFINE\_CG\_MOTION**

昆蟲的運動方式相當複雜，必須利用使用者自訂函數來輸入翅膀運動的軌跡與動作。本研究利用前面提到的高速正交攝影技術並透過 IMAGEJ 標點後得到的動作函數，寫到此函數中以供 FLUENT 讀取。其方法是透過空間轉換將得到的旋轉角、拍撲角、偏離角等動作函數配合拍撲平面傾斜角與方位角等資訊，轉換成以翼根為支點的 X、Y、Z 方向之角速度，FLUENT 得到定點與角速度之後，該翅膀上的每一個質點都會套用，使的翅膀可以照著需要的方式旋轉以進行數值模擬。

### **DEFINE\_EXECUTE\_AT\_END**

此函數會在暫態的數值模擬過程中，每個時間步(time step)結束後執行一次，因此我們將升阻力、功率以及其他我們所需資訊的計算方程式寫在這一個函數內，FLUENT 會彙整所有節點的資訊並幫我們計算出來。另外本研究也利用這個函數，寫指令使所有我們需要的資訊輸出至記事本，並匯入 EXCEL 以便於資料的儲存與運算。



### 3-3 模擬參數設定

#### 3-3.1 網格設定

本研究由於必須使用動網格，因此採用四面體網格來建構流場，總網格數為  $6 \times 10^6$ 。本研究使用四顆共圓心球體包住豆娘，將豆娘置於圓心，使用四顆同心球的目的是為將最內層加密，因此網格密度由外層至內層逐漸提高，如此可以在相同網格數下，讓豆娘周圍的流場更加清晰。最內層球體半徑大小為 8 公分，約豆娘展長 2.5 倍，而最外層則是 40 公分。豆娘的身體與翅膀表面皆為 no-slip condition，並且使用 face sizing 網格加密，其餘網格由身體與翅膀表面延伸至球體最外層，動網格則是只設定最內層球體。

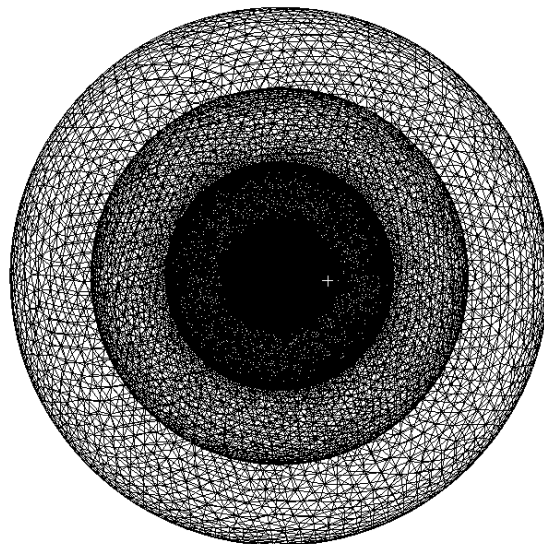


圖 3-9 流場網格示意圖

#### 3-3.2 網格驗證

在模擬開始之前，為了確認網格數量是否足以使收斂的答案正確，我們必須做一個網格獨立性測試。根據實驗室前人的經驗，六百萬以上的結果幾乎是相同的(梁家銘碩士論文, 2017)，為了確認這件事情，本研究也做了一個網格測試，在  $6 \times 10^6$ 、 $8 \times 10^6$  與  $1.2 \times 10^7$  都各做了一個三個週期的測試，看看結果是否相近。結果如圖 3-10 所示，可以看到 600 萬網格的結果與 1200 萬網格的結果非常相近，表示 600 萬

網格數已經有足夠的準確性，因此初步探討飛行表現採用的網格數是 600 萬個。

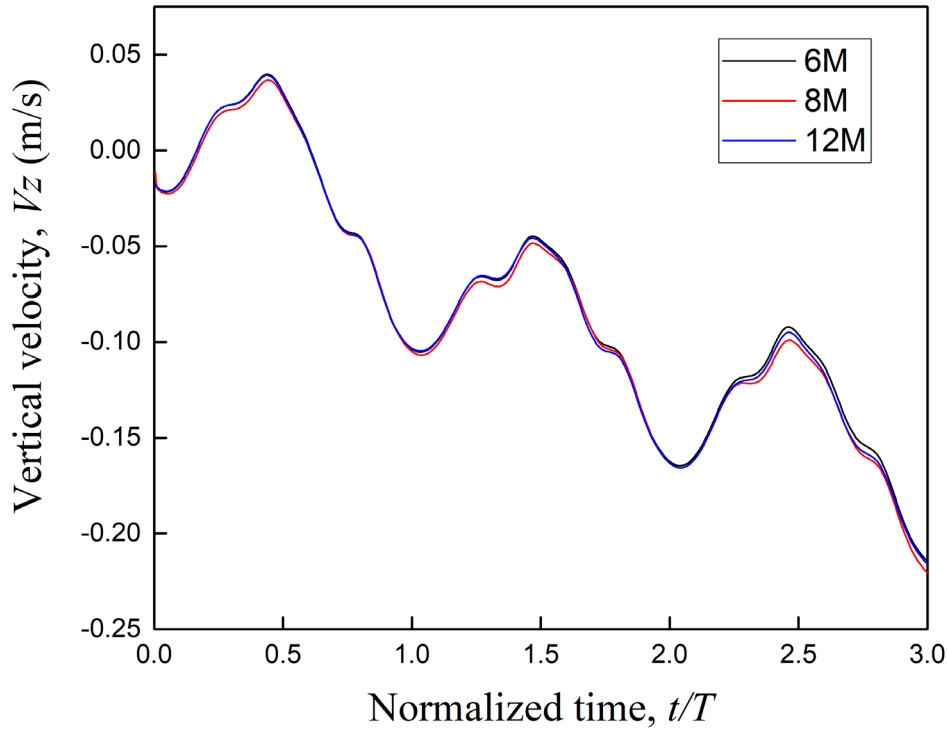


圖 3-10 網格驗證垂直速度圖，其中黑線為 600 萬網格，紅線為 800 網格，而藍線為 1200 萬網格

### 3-3.3 豆娘模型

本研究所使用之豆娘模型為參照真實豆娘之翅膀所繪製而成，將樣本豆娘之前後翅放置於圖片中並放入一把尺作為比例尺，再利用 SolidWorks 軟體繪出真實尺寸與輪廓的豆娘翅膀。前後翅在模擬上厚度設定為 0.2 mm，並在側邊導圓角以利網格建構。前翅與後翅在模型上間隔 0.4 mm 以避免相撞，其餘參數如表 3-1 所示。



表 3-7 模擬使用之豆娘翅膀參數

	統計平均	模擬使用
前翅展長 (mm)	32.5	32.7
後翅展長 (mm)	29.8	29.7
前翅弦長 (mm)	6.4	7.9
後翅弦長 (mm)	7.3	10.1
總重量 (g)	0.1078	0.1078
前翅重量 (g)	$2.03 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$ (2.5%總重量)
後翅重量 (g)	$2.20 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$ (2.5%總重量)

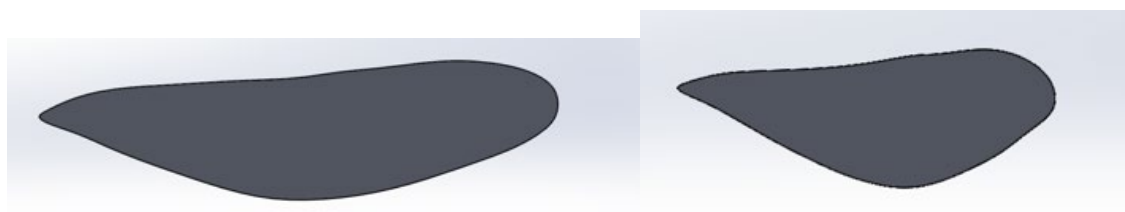


圖 3-11 豆娘翅膀模型。左圖為前翅，右圖為後翅。

### 3-3.4 翅膀動態

經過取樣並利用 ImageJ 標點後，可以輸出 Excel 檔得知標點的座標，因此本研究為了後續處理方便，利用 Matlab 寫了一個程式，用來整合 ImageJ 輸出的兩個實驗室座標，並轉換成以翼根為原點的身體座標。之後，繼續利用 Matlab 將身體座標的翼尖軌跡轉換成本研究需要使用到的角度資訊。將這些資訊平均後取得的角度曲線，再使用曲線擬合(Curve fitting)功能得到一個函數，這便是後續模擬將使用到的函數。



### 旋轉角

經過取樣並處理後的旋轉角如圖 3-12 與圖 3-13，紅色線為平均後的角度曲線，藍色線則為曲線擬合的結果，淺藍色底為一個標準差的誤差線。前後翅的旋轉角使用的曲線擬合樣本函數為二階傅立葉形式，其公式如下：

$$\phi = a + b\cos(\omega t) + c\sin(\omega t) + d\cos(2\omega t) + e\sin(2\omega t) \quad (3-26)$$

其中 a、b、c、d、e 皆為曲線擬合出來的係數。

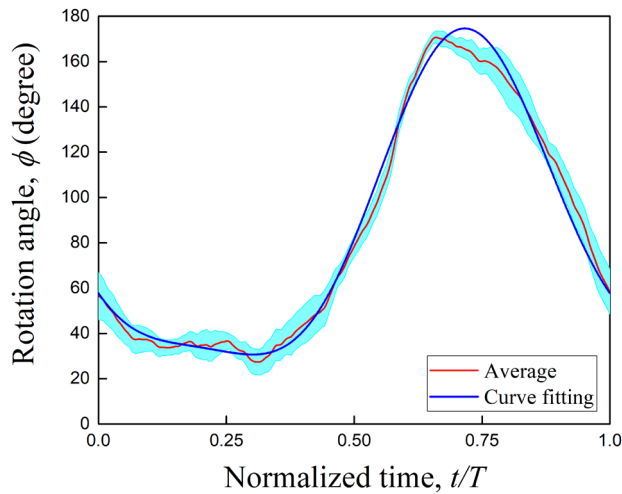


圖 3-12 前翅旋轉角

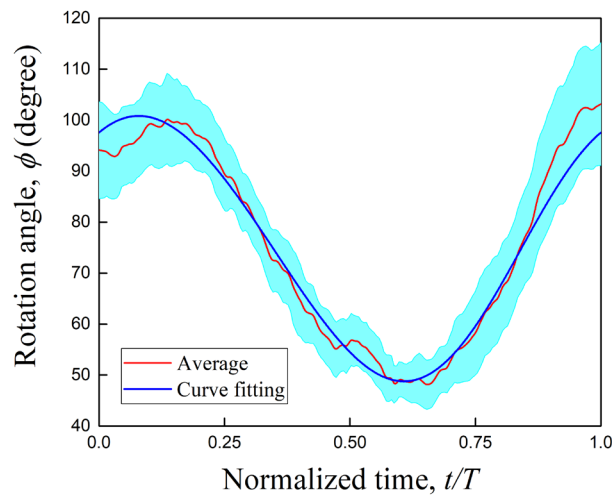


圖 3-13 後翅旋轉角





### 拍撲角

由於拍撲角的平均就已經十分接近單純的三角函數，因此在曲線擬合近似時僅使用一階傅立葉，也就是公式(3-7)但是  $d$  與  $e$  皆為 0 的形式。由圖 3-14、3-15 可以看到，曲線擬合的結果與平均非常相似，且誤差線也較小，因此一階傅立葉是足夠的。另外由拍撲角可以看出，平均出來前後翅的相位差為 0.25 週期。

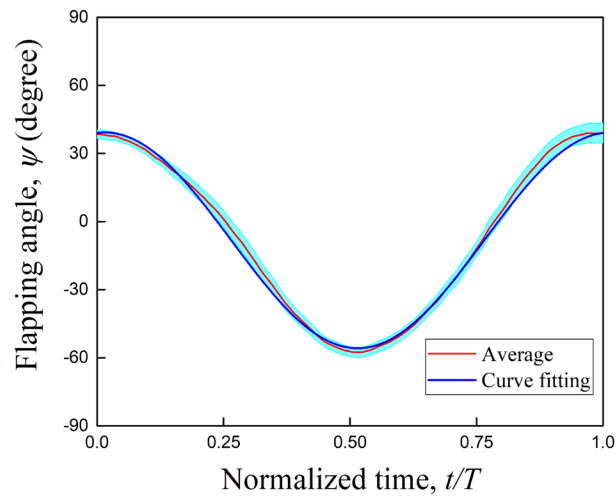


圖 3-14 前翅拍撲角

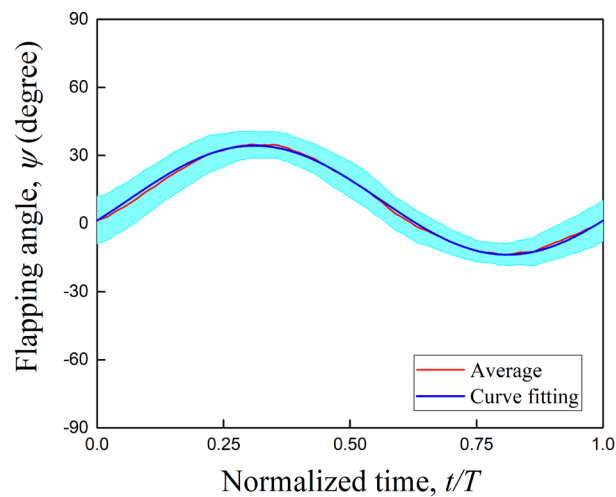


圖 3-15 後翅拍撲角



### 偏離角

偏離角為本研究之重點，取樣後發現前翅的軌跡幾乎皆為 U 字形拍撲，因此與前面兩個角度相同平均後再做擬合，結果如圖 3-16 所示。然而後翅的軌跡較為多樣化，因此原始數據不平均分別做曲線擬合。所有偏離角皆使用二階傅立葉做曲線擬合。

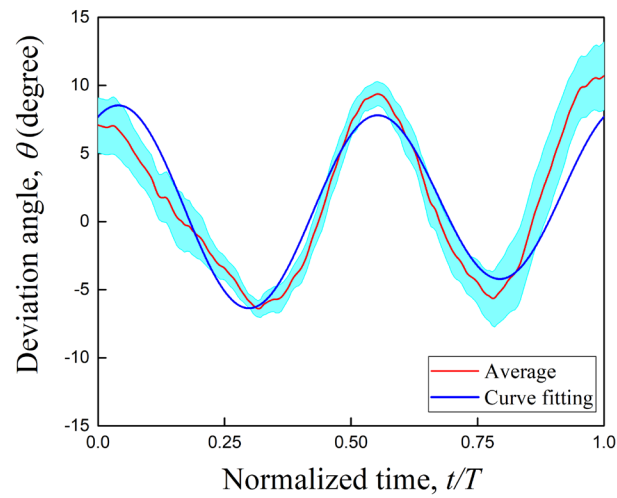


圖 3-16 前翅偏離角



## 第四章 結果與討論

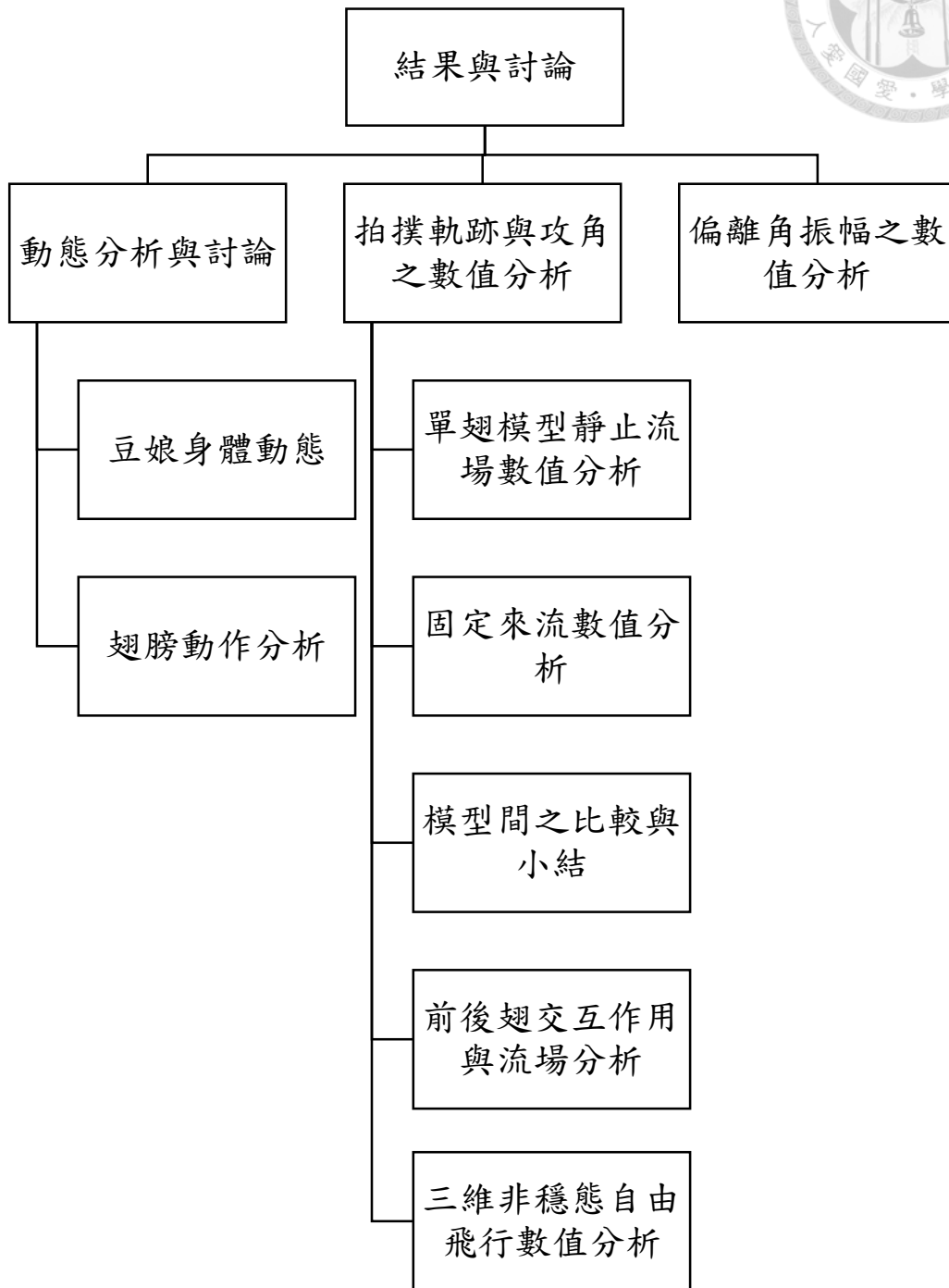


圖 4-1 結果與討論架構圖



#### 4-1 動態分析與討論

經過標點後的數據，可以整理出豆娘身體與翅膀的動態資料，本小節將偏重在實驗觀測的結果，以便於與模擬結果比較。

##### 4-1.1 豆娘身體動態

在標點時除了前面提到的五個翅膀特徵點以外，本研究對於豆娘的頭部與尾部進行標點，並利用這兩個點的位置算出豆娘的前進速度與動態軌跡，進而得出推進比  $J$ 、飛行速度  $U_\infty$  以及其他的資訊，如表 4-1 與表 4-2。其中值得一提的是，編號 2 號的豆娘樣本是屬於前飛轉上升，以及 4 號樣本為上升飛行，其餘皆為等速前飛。

表 4-1 豆娘 1 號樣本標點圖

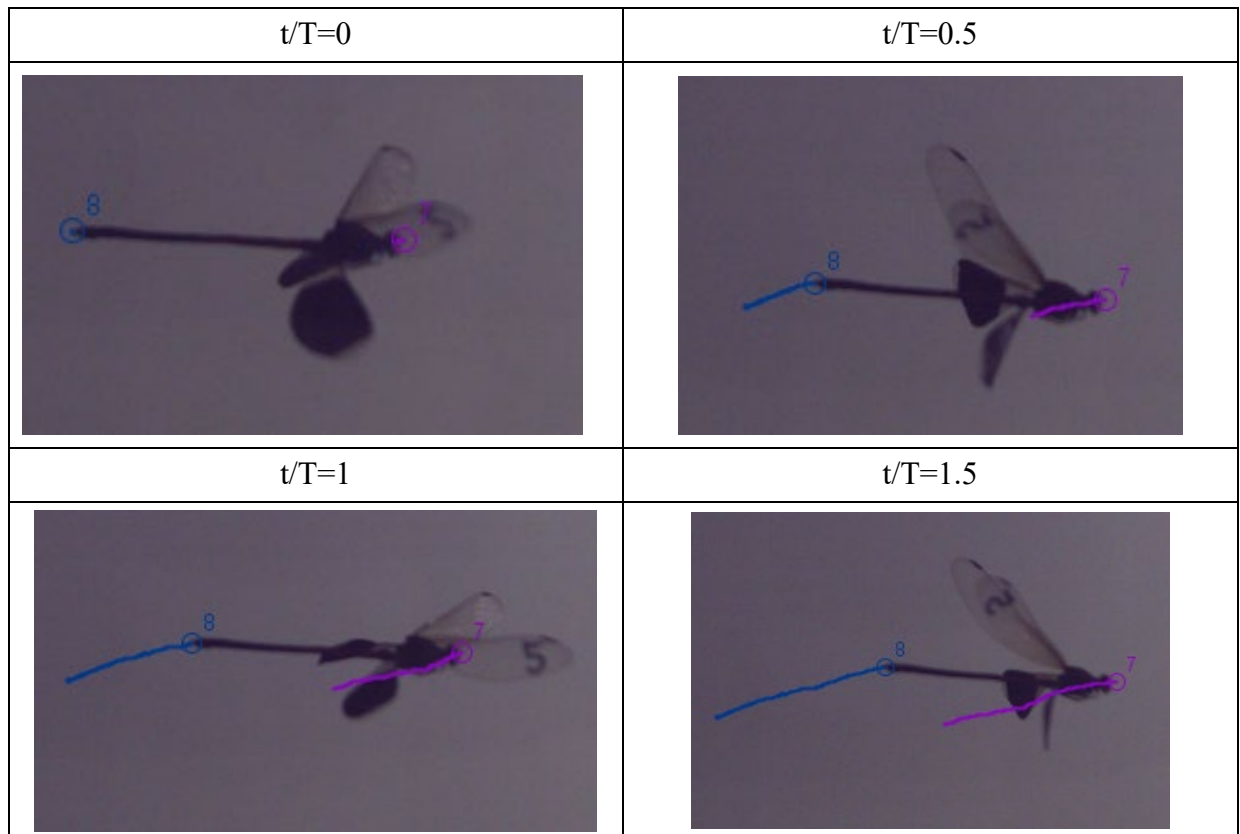


表 4-2 豆娘樣本拍撲平面資訊

樣本編號	前翅方位角, $\gamma$ (degree)	後翅方位角, $\gamma$ (degree)	前翅傾斜角, $\beta$ (degree)	後翅傾斜角, $\beta$ (degree)
1	47.6	-29.9	48.2	27.7
2	50.4	-40	49.5	24.9
3	76	-14.6	58.9	21
4	42.6	-60	29.1	41
5	58.3	-42	54	33.9
6	42.5	-38	54.8	49.7
7	55.7	-47.8	47.4	36.9
Average	53.3	-38.9	48.8	35.6

表 4-3 豆娘樣本運動資訊

樣本編號	拍撲頻率, $f$ (Hz)	飛行速度, $U_\infty$ (m/s)	雷諾數, Re
1	20.7	0.60	915.8
2	23.1	1.36	1086.6
3	21.3	0.86	851.6
4	28.6	0.80	1210.8
5	18.5	0.71	811.0
6	19.4	0.60	978.3
7	22.7	1.03	1123.7
Average	22.0	0.85	996.8

由表 4-2 可以看出在觀測到的樣本中，不論是方位角的絕對值或是傾斜角，前翅幾乎都大於後翅。而表 4-3 可以看到短腹幽螳的頻率大約在 20 Hz 左右，與實驗室前人的白痣珈螳相比，頻率稍微高一些，但與蜻蜓相比仍然低很多。其中第四組樣本頻率較高，但在標點時就已有觀察到這組樣本的上升飛行十分明顯，判斷是因此豆娘才採取較高的拍撲頻率。雷諾數則是使用翼尖速度計算，範圍在 800 到 1250 之間。



#### 4-1.2 翅膀動作分析

##### 旋轉角 $\phi$

在前一章有提到旋轉角與偏離角皆為使用二階傅立葉的形式來做近似擬合，前翅的旋轉角較為一致，標準誤差也比較小，但是有一組數據較為突出而排除不平均，因此僅六個角度做平均曲線擬合。前翅的旋轉角振幅大約為 80 度左右，且每組數據大致相同，相較之下，後翅旋轉角看起來較為不重合，其振幅也較不一，因此標準誤差比較大。另外最大的振幅也不超過 40 度，由圖中很明顯可以看到前翅的旋轉角振幅皆比後翅旋轉角大。前後翅的旋轉角曲線擬合公式分別為：

$$\begin{aligned} \text{前翅} \quad \phi &= 79.79 - 11\cos(\omega t) - 66.99 \sin(\omega t) \\ &\quad - 19.27\cos(2\omega t) + 11.47\sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \text{後翅} \quad \phi &= 74.84 + 21.82\cos(\omega t) + 16.97*\sin(\omega t) \\ &\quad + 1.26*\cos(2\omega t) + 0.78*\sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (4-2)$$

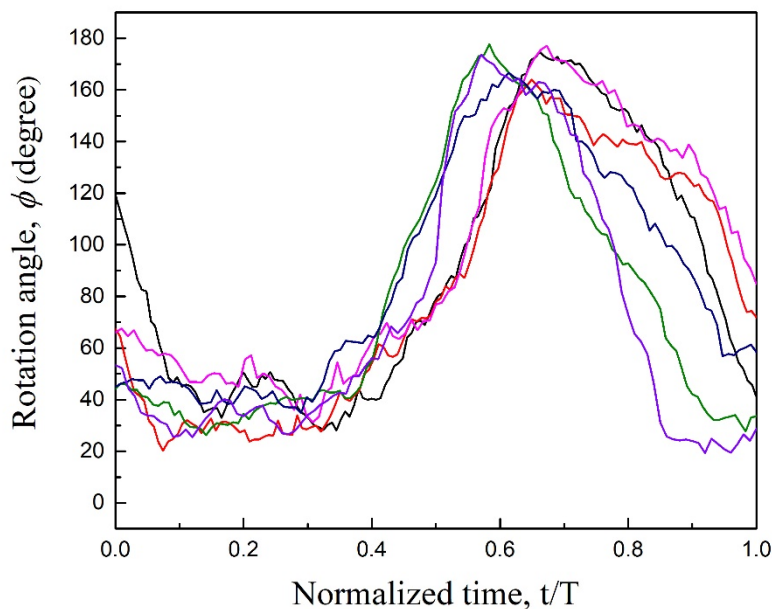


圖 4-2 前翅旋轉角

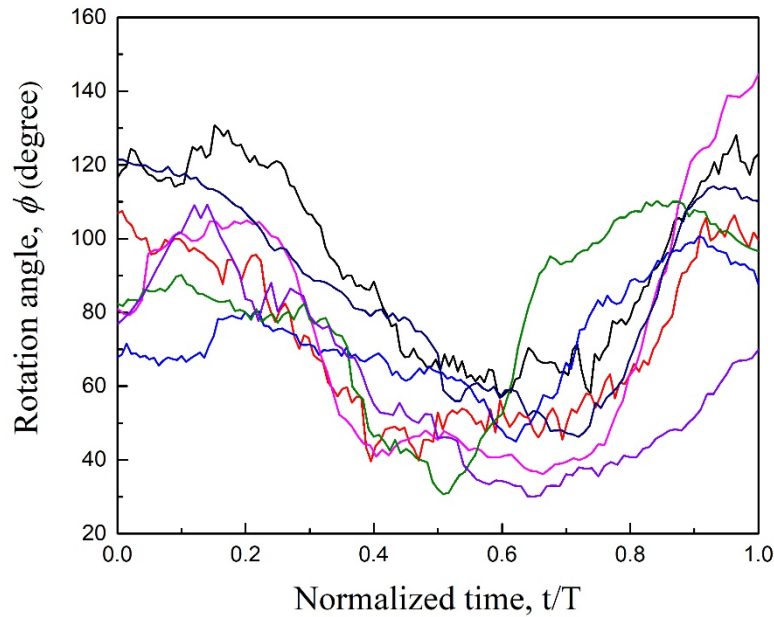


圖 4-3 後翅旋轉角

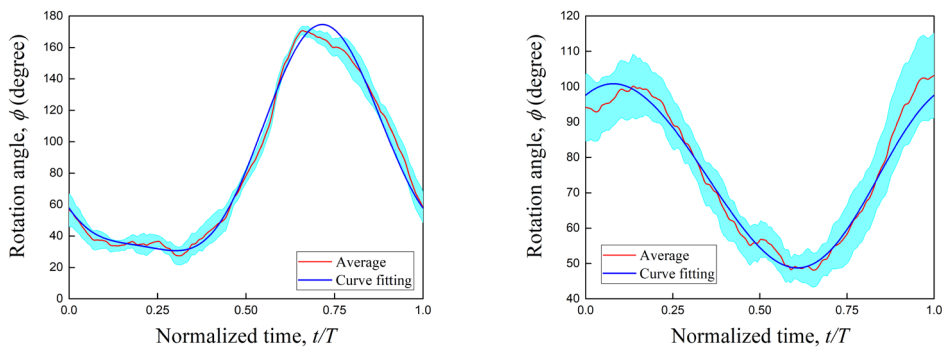


圖 4-4 旋轉角曲線擬合，左邊為前翅，右圖為後翅

值得一提的是，由於在豆娘前飛的樣本影片中，幾乎為後翅 O 字形拍撲，且後翅的上拍過程中，攻角幾乎接近於垂直，但是在其中一組拍撲軌跡並非 O 字形拍撲，而是比較類似於 8 字型拍撲的影片中，其上拍攻角大約在 50~60 度之間，該攻角比較符合一般文獻所使用的旋轉角。本研究也因此發現，旋轉角與偏離角有不可分割之關係，在本文下一小節數值分析時會做更詳細的探討。



### 拍撲角 $\psi$

拍撲角則十分統一，且非常接近三角函數圖形，因此直接使用一階傅立葉便非常重合。尤其前翅拍撲角的標準誤差非常小，後翅因為振幅有些許變化而稍微大一點。其擬合公式如下：

$$\text{前翅} \quad -10.27 + 44.17 \cdot \cos(\omega t) + 21.55 \cdot \sin(\omega t) \quad (4-3)$$

$$\text{後翅} \quad 10.62 - 9.03 \cdot \cos(\omega t) + 22.43 \cdot \sin(\omega t) \quad (4-4)$$

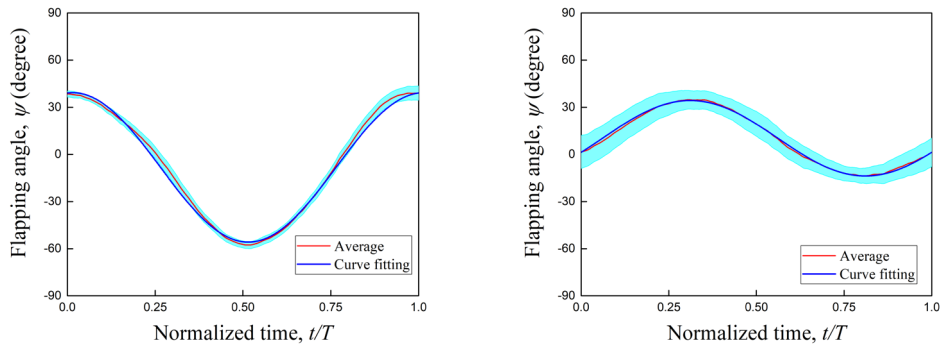


圖 4-5 拍撲角曲線擬合，左圖為前翅，右圖為後翅

圖 4-6 為實驗室前人所研究白痣珈螳的拍撲角(梁家銘，2017)，相互比較後發現與短腹幽螳有很大的不同，前翅與後翅拍撲振幅差異較小，甚至後翅大於前翅，後翅振幅則大約為 45 度左右，與短腹幽螳的前翅振幅相似。

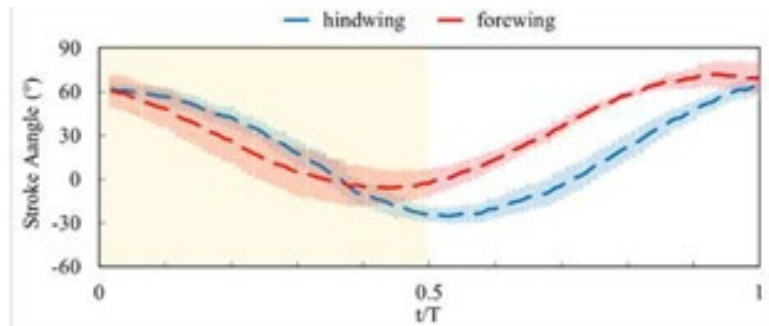


圖 4-6 白痣珈螳的拍撲角 (圖片來自梁家銘，2017)



## 偏離角 $\theta$

偏離角使用二階傅立葉曲線擬合，前翅的拍撲軌跡經過實驗觀測以後，發現僅 2 號樣本為 O 字形拍撲以外，其餘皆為 U 字形拍撲，因此排除那組數據，平均並擬合可以得到一個 8 字形拍撲軌跡的偏離角函數。但是後翅偏離角在實驗觀測後發現其差異因拍撲軌跡形狀、偏離角振幅不同而很大，顯得後翅的偏離角非常有多樣性，因此本研究對於後翅偏離角各組數據分別直接進行曲線擬合得到公式，更改後翅偏離角即拍撲軌跡來觀察豆娘升阻力的影響是本研究的重點之一。圖 4-7 中 8 字形以 6 號樣本為例，O 字形拍撲以 7 號樣本為例，可以看到 8 字形拍撲的頻率會是 O 字形拍撲的兩倍，但是偏離角振幅較小。但由於 6 號樣本的豆娘為下墜後急速上升，拍撲動作較為凌亂，拍撲軌跡由拍撲平面的下方往上方拍，與一般文獻提到的 8 字形拍撲軌跡方向相反，因此在數值分析時，本文將該擬合函數乘以-1，以便與一般文獻的 8 字形拍撲做比較。圖 4-8 為拍撲軌跡圖，其原點在軌跡的右上角，由此也能看出後翅的拍撲平面方位角皆為負的。

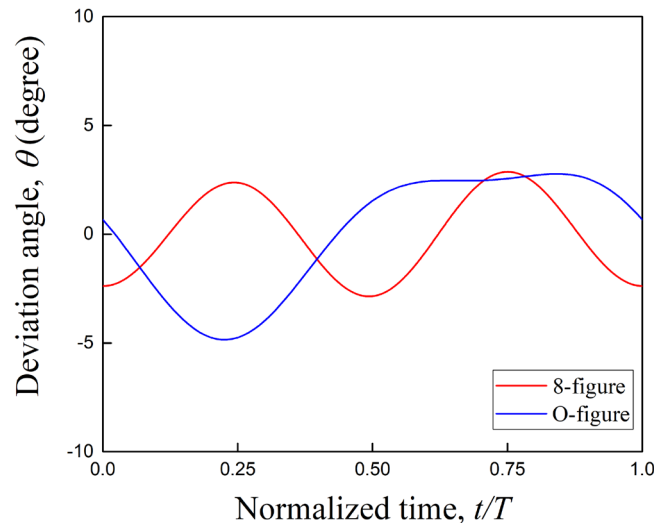


圖 4-7 後翅偏離角，紅色為 8 字形，藍色為 O 字形。

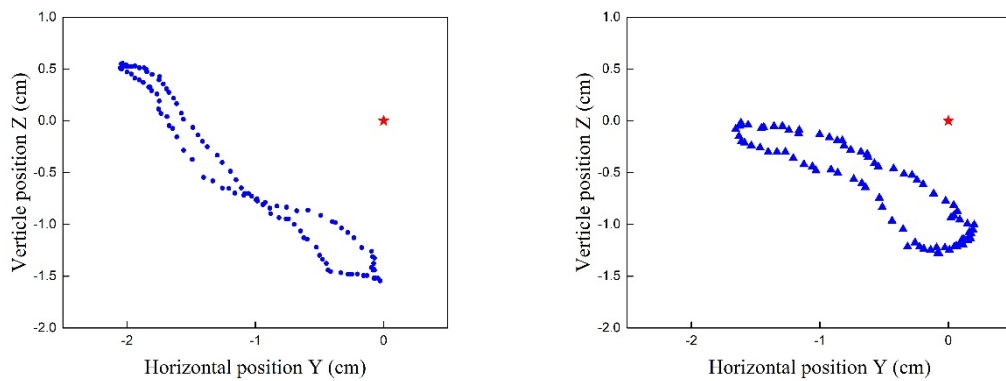


圖 4-8 後翅翼前緣軌跡側視圖，左圖為 6 號樣本 8 字形拍撲，右圖為 7 號樣本 O 字形拍撲。圖中紅色星號代表翼根原點。

#### 4-2 拍撲軌跡與攻角之數值分析

如前一小節敘述，在豆娘動作捕捉的樣本中，前翅偏離角幾乎一致，後翅偏離角在各組數據之間確有很大的變化，因此本研究認為在偏離角控制的部分，前翅以貢獻升力與推力為主，因此拍撲振幅與旋轉振幅都普遍較高，且各數據間變化不大；後翅則以細部控制為主，因此變化較大，但拍撲振幅較小。因此本研究將專注於探討後翅的變化對豆娘升阻力造成的影響。

##### 4-2.1 單翅模型靜止流場數值分析

在動作捕捉樣本的測量結果中，本研究發現後翅 O 字形拍撲的攻角在上拍時會近乎 90 度，即垂直於拍撲平面，但僅有一組影片，其後翅拍撲軌跡並非 O 字，而是接近 8 字形，且該組影片在上拍時攻角比較符合一般文獻使用之旋轉角，攻角約為 60 度。在數值分析後，也從結果發現 8 字形拍撲之模型倘若在上拍時攻角接近 90 度，將會喪失升力提升的優勢。因此本研究認為拍撲軌跡與攻角有著密不可分的關係，並針對兩種旋轉角與兩種拍撲軌跡去做交叉數值分析。

一般的文獻在做偏離角時，幾乎都只對 8 字形下結論，認為 8 字形是升力較理想的拍撲軌跡，但其他的字形雖然有結果但較少介紹。為了與一般文獻的結果比較，我們將來流速度設為零，以模擬靜止流場，並且探討平行與垂直於拍撲平面的升力與阻力來討論，以消除拍撲平面傾斜角的因素，另外，由於文獻都是單翅模型

的模擬，因此本研究也先將模型拔除前翅，去做數值分析，在後面的小節會再討論前翅帶來的影響。

圖 4-9 為一般文獻較常見之旋轉角，即上拍攻角為 60 度之旋轉角(以下簡稱為一般旋轉角)為模型，分別對 O 字形拍撲與 8 字形拍撲所做的升阻力圖；圖 4-10 則為豆娘動作捕捉 O 字形拍撲所使用的旋轉角，即上拍攻角接近 90 度(以下稱不對稱旋轉角)為模型，分別對 O 字形拍撲與 8 字形拍撲所做的升阻力圖。由於前翅下拍起始點為  $t/T=0$ ，後翅落後 0.3 個相位差，因此下拍中程與上拍中程分別為圖中的  $t/T=0.55$  及  $t/T=0.05$  處。可以看到這這兩個點，O 字形拍撲與 8 字形拍撲有最大的差別。從阻力來看，不論模型為何種旋轉角，O 字形拍撲的阻力皆比 8 字形拍撲小，意即 O 字形拍撲的推力較佳；從升力的角度來探討，也可以發現在上拍與下拍中程這兩個時刻，8 字形拍撲的升力皆大於 O 字形拍撲的升力，其中下拍時升力差異較明顯，而上拍時則是一般旋轉角的差異較不對稱旋轉角大。從這四個數據分析不難發現，模型除了拍撲字形不同，差別僅在攻角。一般旋轉角與不對稱旋轉角的下拍中程攻角分別為 45 度與 50 度，而一般旋轉角的上拍中程攻角為 60 度，不對稱旋轉角的上拍中程攻角則為 82 度。因此從這些數據分析的結果，本研究認為在攻角為 45 度時，8 字形拍撲的升力優勢最明顯，而攻角越大，優勢越不明顯。圖 4-11 可以看到，8 字形拍撲模型在上拍與下拍中程時，都有較高的功率消耗，這點與 Luo 在 2017 年發表的文獻結果相似(Luo *et al.*, 2017)。

Luo *et al.* (2017)年以及 Sane & Dickinson (2001)年所發表的文獻中提到，偏離角的改變所帶來之效應為有效攻角的增減，當偏離角變小時，有效攻角會增加，功率也會增加，反之則減少。從該觀點來分析，在下拍中程時，攻角為 45 度~50 度，因此增加有效攻角以後增加了升力，但在一般旋轉角的上拍中程攻角為 60 度，攻角已經偏高，在增加有效攻角以後，升力就沒有太明顯的增加。在不對稱旋轉角的上拍中程攻角則已達 82 度，增加有效攻角則幾乎不能對升力帶來增益。本研究認為在不對稱旋轉角的上拍中程，8 字形拍撲仍然稍微優於 O 字形拍撲的原因，應為翅膀向拍撲平面以下移動，帶動周遭流場向下，給翅膀本身帶來的反作用力。

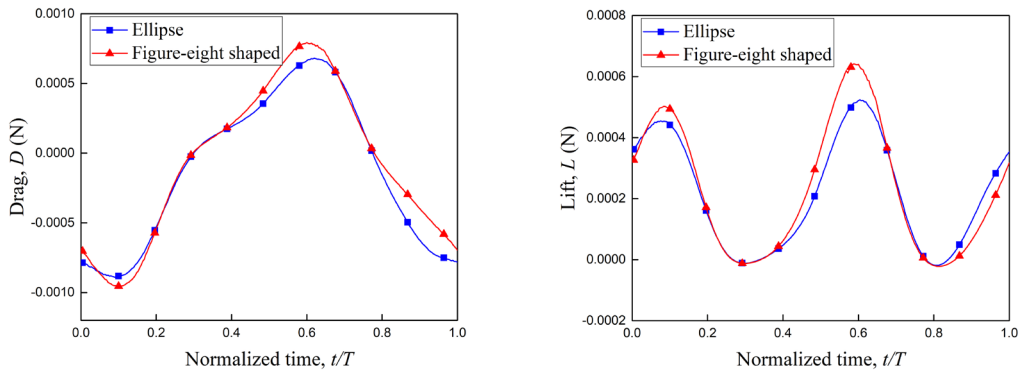


圖 4-9 一般旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖，靜止流場。

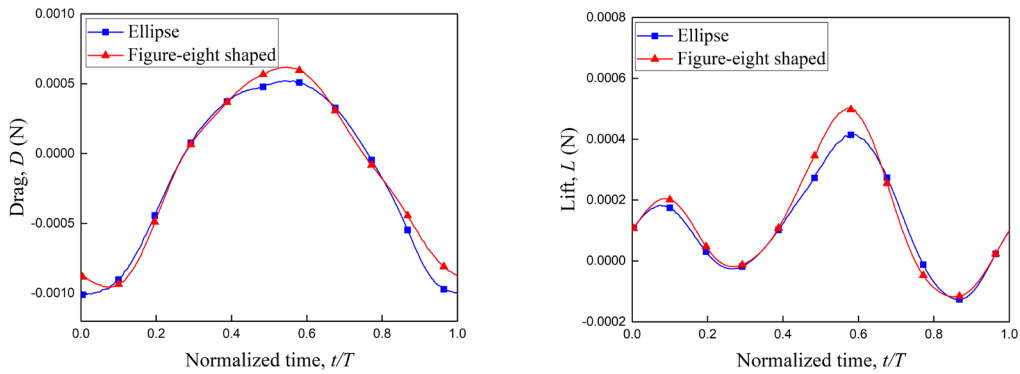


圖 4-10 不對稱旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖，靜止流場。

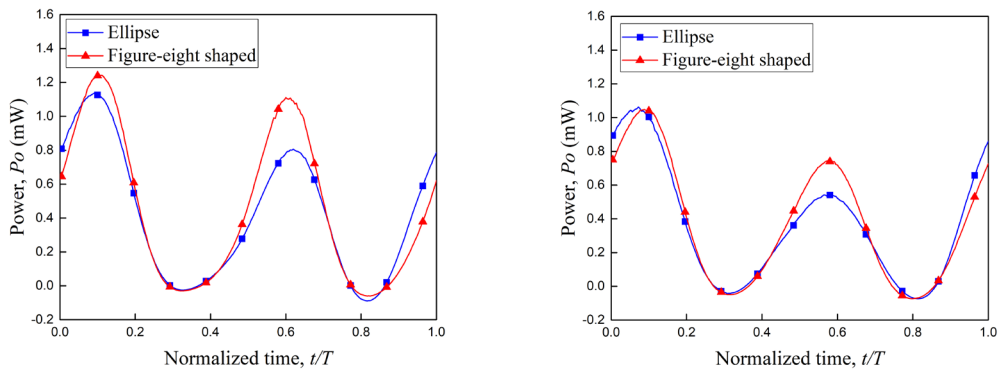
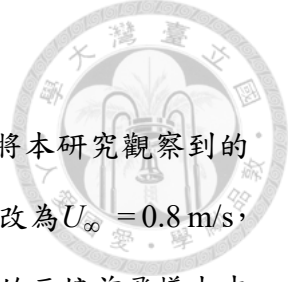


圖 4-11 O 字形及 8 字形拍撲軌跡模型的功率對時間圖，靜止流場。左圖為一班旋轉角，右圖為不對稱旋轉角。

從這些分析結果，可以初步驗證為何觀察到的豆娘前飛樣本中，幾乎為後翅 O 字形拍撲，且會採用不對稱的旋轉角，而類似 8 字形拍撲上升飛行的樣本中，採用一般較常見的旋轉角，並初步驗證了為何 8 字形拍撲應該搭配一般文獻常使用，較為對稱旋轉角，而不能使用上述的不對稱旋轉角。然而這是單翅且靜止流場的模擬，因此在下一個小節，本文將會融入了傾斜角資訊的水平力與垂直力，並且加入來流模擬前飛，讓數值分析更貼近真實，進一步探討拍撲軌跡與攻角之關係。



#### 4-2.2 固定來流數值分析

在數值分析過靜止流場中拍撲軌跡與攻角之關係後，為了將本研究觀察到的現象與測量結果的發現做進一步的探討，我們將數值分析的流速改為  $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$ ，模擬豆娘在前飛時的情況，並討論水平力與垂直力。由於拍攝到的豆娘前飛樣本中，去除掉一組極值飛行速率為  $1.36 \text{ m/s}$  後，其餘的樣本飛行速率在  $0.6 \text{ m/s} \sim 1.0 \text{ m/s}$  之間，因此我們取中間值  $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$  去做數值分析。水平力與垂直力為以升力與阻力為基礎，在計算過豆娘翅膀的各個角度參數後所計算出來的力，也是最能看出其與前進速度與上升速度最佳的參數。在這個數值分析本研究仍然先採用單獨後翅的模型，在下一個小節會再加入前翅去做數值分析，也與單獨後翅的結果比較，以便於了解前後翅交互作用。

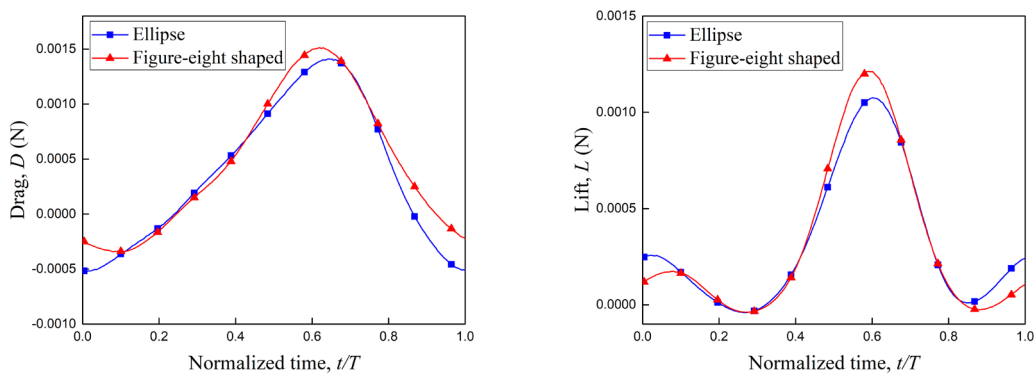


圖 4-12 一般旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖， $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$

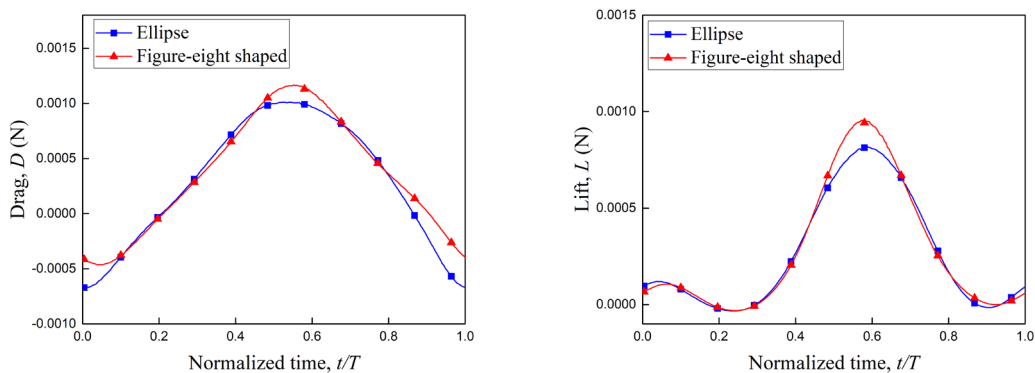


圖 4-13 不對稱旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的升阻力圖， $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$

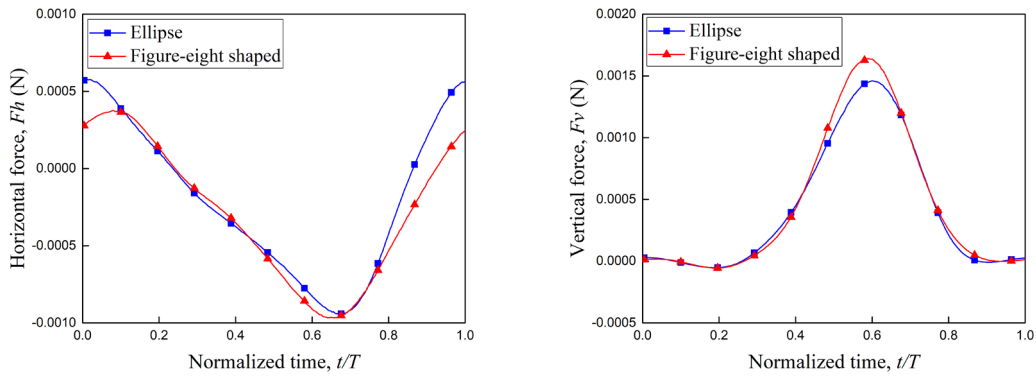


圖 4-14 一般旋轉角與 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的水平力與垂直力圖， $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$

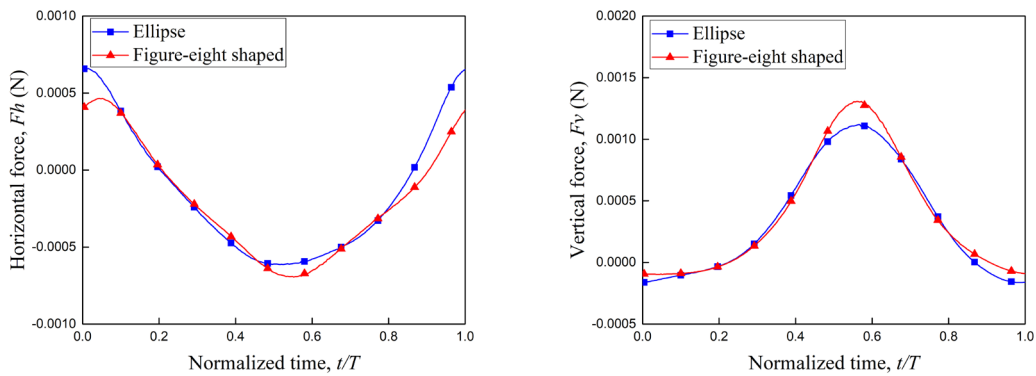


圖 4-15 不對稱旋轉角與後翅 8 字形及 O 字形拍撲軌跡模型的水平力與垂直力圖， $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$

圖 4-12 與圖 4-13 為在固定來流  $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$  時，一般旋轉角以及不對稱旋轉角模型與兩個拍撲軌跡的升阻力圖。與靜止流場的圖 4-9 做比較，阻力與升力都增加了約一倍。阻力的部分，8 字形拍撲仍然是高於 O 字形拍撲，且差異更加明顯。升力的部分，在下拍中程  $t/T=0.55$  時，8 字形拍撲的升力仍然有很明顯的優勢，但是在上拍中程  $t/T=0.05$  時，不論是一般旋轉角或是不對稱旋轉角，升力都大幅下降，且 8 字形拍撲與 O 字形拍撲的差異更加地不明顯，甚至在一般旋轉角的模型中，O 字形的升力超越了 8 字形。結合傾斜角與方位角等拍撲平面的資訊以後，可以看到水平推力仍然是 O 字形比較理想，且不對稱旋轉角也比一般旋轉角佳；垂



直力則是 8 字形仍然較為優秀，但是在上拍中程時，不論何種字形，垂直力都趨近於零。

圖 4-16 與圖 4-17 分別為不對稱旋轉角之 O 字形拍撲示意圖，以及一般旋轉角之 8 字形拍撲示意圖。紅色箭頭為因為豆娘前飛 $U_{\infty} = 0.8 \text{ m/s}$  時翅膀所受到的相對來流速度，黑色為翅膀拍撲時所受到的來流速度。在前一小節所做的靜止來流模型，可以理解為僅有翅膀拍撲來流速度，也就是黑色箭頭的向量存在。因此在兩個模型的下拍中期，可以看到加入了前飛相對來流速度的向量，雖然會減少一些有效攻角，但是向量合得到的來流速度值會增加很多，因此翅膀升力有明顯提升，而阻力也當然增加。

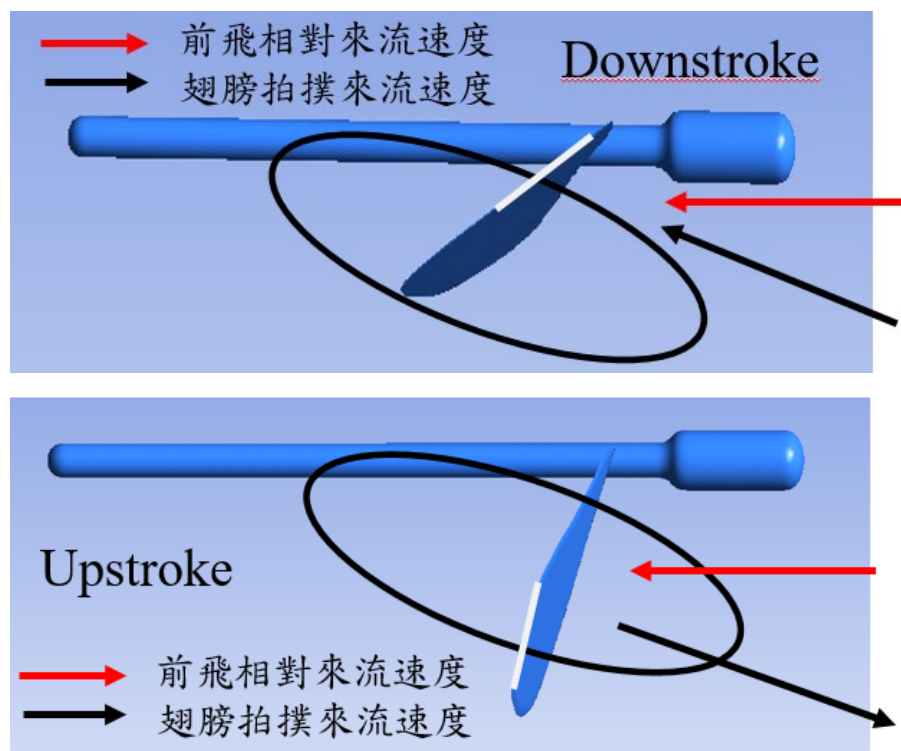


圖 4-16 不對稱旋轉角之後翅 O 字形拍撲示意圖



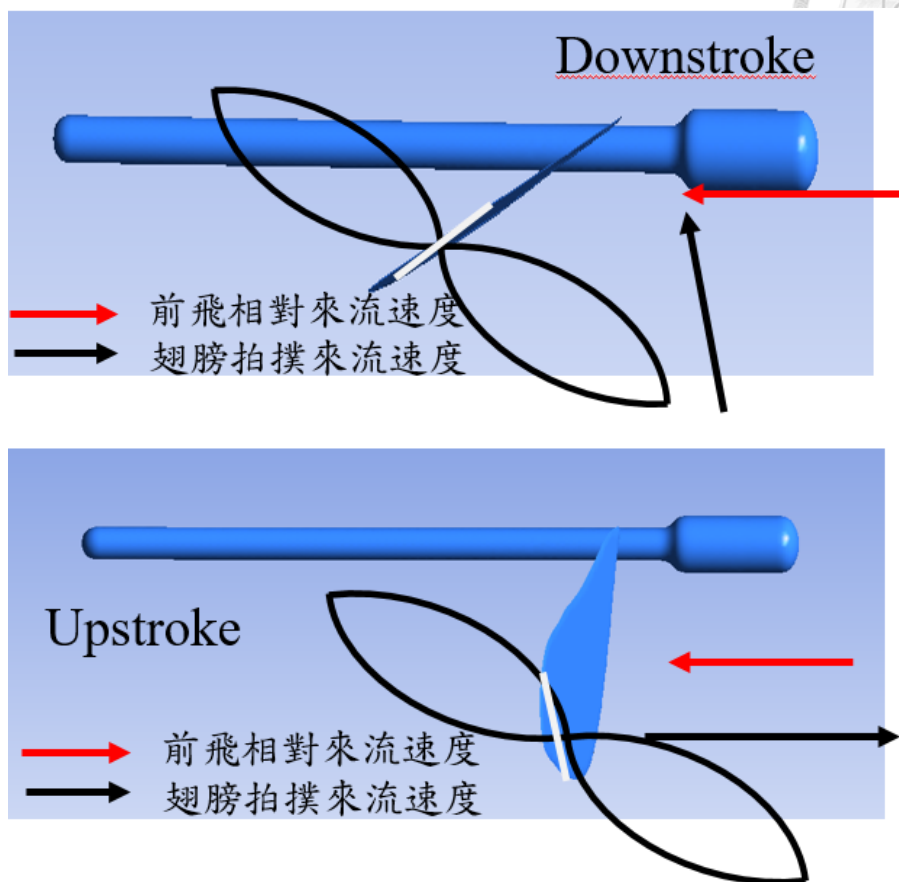


圖 4-17 一般旋轉角之後翅 8 字形拍撲示意圖

然而在上拍時，可以看到不論是 8 字形拍撲模型或是 O 字形拍撲模型，前飛相對來流速度與翅膀拍撲來流速度會抵消，本研究認為這是造成固定來流模型的上拍升力驟降的原因。而在一般旋轉角上拍期間 O 字形拍撲模型在  $t/T=0.1$  以前，升力比 8 字形拍撲模型佳的原因為，在下拍轉上拍時( $t/T = 0.8$ )，O 字形拍撲會有短暫的時刻偏離角為遞減，因此增加了有效攻角；而 8 字形拍撲的偏離角在此時則是遞增(如圖 4-7)，故有效攻角降低。在靜止來流數值分析結果，上拍啟動也有短暫的時間為 O 字形拍撲的升力略優於 8 字形拍撲；然而在固定來流時，由於上拍期間有上述的原因導致升力較小，也讓這個現象更加明顯。

整體來說，偏離角增減會使有效攻角增減(Luo *et al.*, 2017; Sane & Dickinson, 2001)，再加上翅膀的偏離移動，帶動翅膀周遭的流體，產生反向的作用力，當偏

離角減少時，升力及垂直力理論上會提升；反之，當偏離角增加時，升力及垂直力會下降。雖 8 字形拍撲與 O 字形拍撲都有偏離角增加與減少的階段，但必須考量到前飛相對來流速度以及翅膀拍撲來流速度的合向量。若合向量極大，如下拍中程，則偏離角效應將會最明顯。在上拍轉下拍或下拍轉下拍之時間前後，翅膀拍撲來流速度極小，因此偏離角效應也不明顯。

#### 4-2.3 模型間之比較與小結

表 4-4 靜止流場後翅模型之一周期平均垂直力  $F_v$  比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲垂直力 (mN)	0.053	0.139
8 字形拍撲垂直力 (mN)	0.078	0.172

表 4-5 靜止流場後翅模型之一周期平均水平力  $F_h$  比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲水平力 (mN)	0.184	0.192
8 字形拍撲水平力 (mN)	0.162	0.150

表 4-6 靜止流場後翅模型之一周期平均消耗功率  $P_o$  比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲功率 (mW)	0.357	0.418
8 字形拍撲功率 (mW)	0.367	0.455

表 4-7 固定來流 $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$  後翅模型之一周期平均垂直力 $F_v$ 比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲垂直力 (mN)	0.350	0.421
8 字形拍撲垂直力 (mN)	0.385	0.454

表 4-8 固定來流 $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$  後翅模型之一周期平均水平力 $F_h$ 比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲水平力 (mN)	-0.144	-0.2
8 字形拍撲水平力 (mN)	-0.196	-0.283

表 4-9 固定來流 $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$  後翅模型之一周期平均消耗功率  $P_o$  比較

	不對稱旋轉角	一般旋轉角
O 字形拍撲功率 (mW)	0.373	0.494
8 字形拍撲功率 (mW)	0.394	0.535

表 4-4~表 4-9 為靜止來流以及固定來流模型後翅所受到的垂直力、水平力與消耗功率的表格，以便於在不同模型間做比較。表現較佳以紅字表示，表現較差則以藍字表示。從表格可以輕易看出，無論是靜止流場或是固定來流垂直力是一般文獻使用的旋轉角搭配 8 字形拍撲最理想，而不對稱旋轉角以及 O 字形拍撲則最差，原因如前一章節所敘述。

在水平力上可以看到靜止來流的 O 字形拍撲優於 8 字形拍撲，但不對稱旋轉角與一般旋轉角的水平力差不多，甚至從結果來看一般旋轉角較佳。然而在固定前飛來流的模型中，前飛樣本觀測到短腹幽螳所使用的不對稱旋轉角之水平力有明顯提升。經過分析後，會造成這個現象的原因，是因為流場中加入了前飛相對來流速度，因此水平力變成了負的。而在上拍中程時，翅膀拍撲速度此時已經大於豆娘

前飛速度，再加上不對稱旋轉角的攻角接近於垂直，配合 O 字形拍撲的拍撲軌跡(如圖 4-16)，此時將翅膀向後推可以得到最大的推力，因此在這段期間豆娘補足了前飛的動力，而一般旋轉角則因為攻角較小，沒有辦法獲得足夠的推力。因此從飛行於拍撲平面的阻力來看，不論是固定來流或是靜止流場，不對稱旋轉角在上拍中程都比較理想(圖 4-10、4-13)，其中以固定來流的差別最明顯，因此經過角度轉換過後成水平力，靜止流場的優勢較為不明顯。

最後從功率的觀點來看，一般旋轉角的消耗功率皆大於不對稱旋轉角，由於旋轉角振幅為一般旋轉角較大，因此消耗功率較大是合理的。而 8 字形拍撲也普遍比 O 字形拍撲消耗功率大，這點 Luo 也有在文獻中提到，有效攻角的提昇會提高消耗功率(Luo *et al.*, 2017)。

綜上所述，本研究認為一般文獻提到的 8 字形拍撲為升力最佳的拍撲軌跡是正確的，搭配一般旋轉角也是最理想的。然而本研究在豆娘樣本影片中觀測到的 O 字形拍撲以及較特殊的不對稱旋轉角，可以有效減少功率，且增加了水平推力，或減少了水平阻力，因此才會在前飛樣本中發現大多短腹幽螳採用這樣的拍撲軌跡與旋轉角。

從表格中可以簡易的看出，升推力最佳的幾項幾乎都發生在 8 字形拍撲配一般旋轉角(如圖 4-17)，或是前飛樣本影片觀測到的不對稱旋轉角配 O 字形拍撲。直接對比這兩項的前飛固定來流模型，8 字形拍撲的垂直力較 O 字形拍撲高 30%，而水平阻力增加了將近一倍，且功率消耗也增加了 43%。因此本研究認為，O 字形拍撲軌跡配合樣本影片觀察到的不對稱旋轉角(上拍攻角接近垂直，如圖 4-16)，比較適合在穩定前飛中使用，而 8 字形拍撲軌跡如同一般文獻所說，較為耗功但升力較佳，預期比較容易出現在上升飛行，但如果套用本研究觀察到的不對稱旋轉角(上拍攻角接近垂直)，會喪失一些偏離角所帶來對升力的優勢，卻會仍然增加功率，較為不適合。也因此本研究在後續的數值分析中，將會全力探討該兩種拍撲軌跡，但僅搭配她們分別最適合的旋轉角，以期望該兩種拍撲軌跡能發揮最大的效果，並分別應用至無人飛行器的前飛模式與爬升模式上。



#### 4-2.4 前後翅交互作用與流場分析

從前一節的結果我們已經得出，後翅 O 字形配合樣本觀測到的不對稱旋轉角最理想，有最好的推力且最節省功率，較適合前飛；一般文獻的後翅 8 字形以及一般文獻較常用的旋轉角被觀察出來升力較高，但也較耗功，本研究的結果也支持這個論述。然而本研究的研究物種為短腹幽螳，不能夠忽略前翅帶來的效應，因此在本小節，我們將會恢復模型，加入前翅觀察結果是否會有變化，也與前面的結果討論並比較前後翅的交互作用。

圖 4-18 與圖 4-19 為後翅 O 字形與後翅 8 字形的水平力與垂直力圖。藍色線為僅有後翅存在時，即拔除前翅後的模型固定來流模擬結果，而紅色線則代表有前翅時的結果，因此藍色線應該與圖 4-14 與圖 4-15 相同。在數值分析後的結果發現後翅給予前翅的影響不明顯，原因為在前飛速度固定  $U_{\infty} = 0.8 \text{ m/s}$  的情況下，流體幾乎都是往後方或後下方(圖的左方或左下方)流動，導致前翅的擾流會影響後翅，而後翅造成的渦漩或擾流都往後方(圖的左方)移動，較難影響前翅，因此在此就不討論前翅的受力。

從圖中可以看到，大約從  $t/T=0.1$  到  $t/T=0.5$  時，水平力在有前翅的情況下比較好，而垂直力較差。而大約  $t/T=0.5$  到  $t/T=0.7$  時則相反，水平力較差，而垂直力較好。從圖 4-20 與圖 4-21 可以推敲出原因。圖 4-20 與圖 4-21 是在同樣固定來流條件下，後翅 8 字形與後翅 O 字形模型的流場圖。由於  $t/T = 0.0$  定為前翅下拍起始，後翅的相位差為落後前翅 0.3 週期，因此  $t/T=0.3$  為後翅下拍起始，前後翅以粗線表示，f 代表前翅，h 代表後翅。首先  $t/T = 0.8$  這張圖可以發現，在前翅右下方有一紅色渦漩，此渦漩為前翅 LEV 脫離後的渦漩，該渦漩在下一週期  $t/T=0.1$  時影響到了後翅的 LEV(藍色渦漩)，兩渦漩反方向因此稍微干擾了後翅的 LEV，到了  $t/T=0.3$  時，前翅與後翅位置最近，此時後翅正要開始下拍，但前翅已經在下拍途中。前翅因為下拍造成的下洗氣流影響了流場，從圖中向量可以看到流場方向偏左下方，導致後翅的有效攻角稍微減少了，才會造成此刻前後的垂直力降低，水平阻力也減少。到了  $t/T=0.5 \sim t/T=0.7$ ，我們可以從  $t/T=0.6$  那張圖看到，前翅剛



開始進行上拍，而前翅下拍時的 TEV(藍色渦旋)脫離到了前翅的左下方，影響到了還在下拍的後翅。藍色渦旋為順時針，在藍色渦旋的下緣氣流方向為向左上方，也因此增加了後翅的垂直力，但也提升了後翅的水平力。

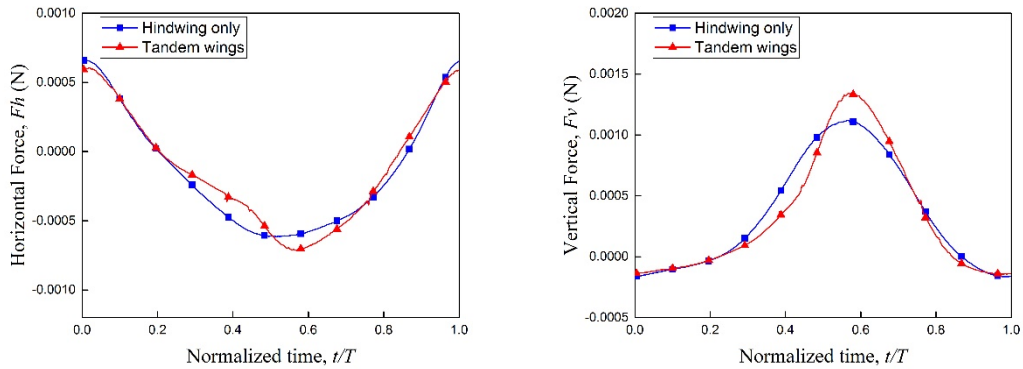


圖 4-18 後翅 O 字形拍撲模型，雙翅存在與拔除前翅兩個模型的後翅受力比較。左圖為水平力，右圖為垂直力。

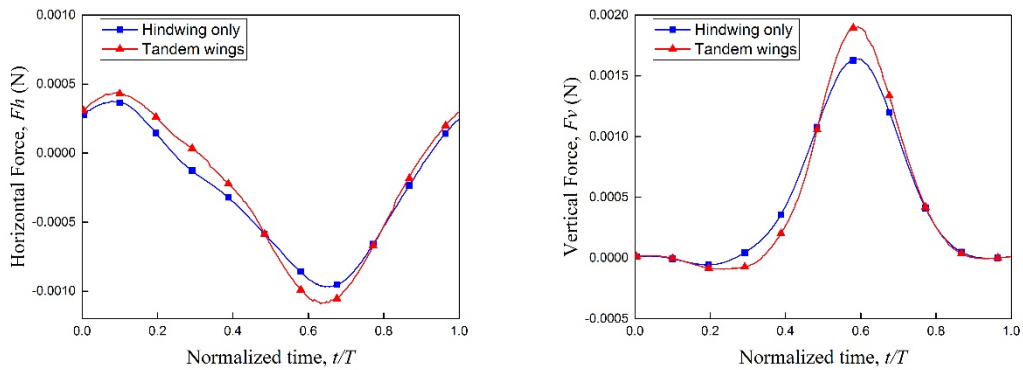


圖 4-19 後翅 8 字形拍撲模型，雙翅存在與拔除前翅兩個模型的後翅受力比較。左圖為水平力，右圖為垂直力。

在前一小節本文利用有效攻角的角度解釋後翅的受力，在這一小節本研究從圖 4-20 與圖 4-21 觀察流場並進一步分析，加入前後翅交互作用後，也從渦旋的角度解釋翅膀受力的結果。在後翅下拍起始時( $t/T = 0.3$ )，可以看到兩個模型的翅膀上都沒有渦旋，僅有因為上拍剛結束殘留的少許 LEV(翼前緣渦旋)以及 TEV(翼後緣渦旋)在翅膀周圍，因此此時如圖 4-18 與圖 4-19 所示，幾乎沒有升阻力，水平力



與垂直力也就接近 0。在下拍中程( $t/T=0.6$ )時，可以看到後翅上方的 LEV(紅色)貼附在翅膀上，下方的 TEV(藍色)也相當清楚。8 字形拍撲的模型中，LEV 比 O 字形拍撲的 LEV 大，TEV 也發展比較長，此時兩個模型都達到垂直力巔峰，且 8 字形拍撲的垂直力更大一些。在上拍起始( $t/T=0.8$ )時，可以看到下拍的 LEV(後翅左方紅色)與 TEV(後翅左方藍色)從翅膀脫離，因此翅膀受力驟降，翅膀右方的藍色為上拍的 LEV，才正要開始形成。而上拍中程時可以看到，不管是翅膀右上方的 LEV(藍色)還是翅膀右下方的 TEV(紅色)，比起下拍中程都小很多，且周圍有前翅上拍以及後翅下拍殘留的渦漩，也影響到了後翅的 LEV 發展。

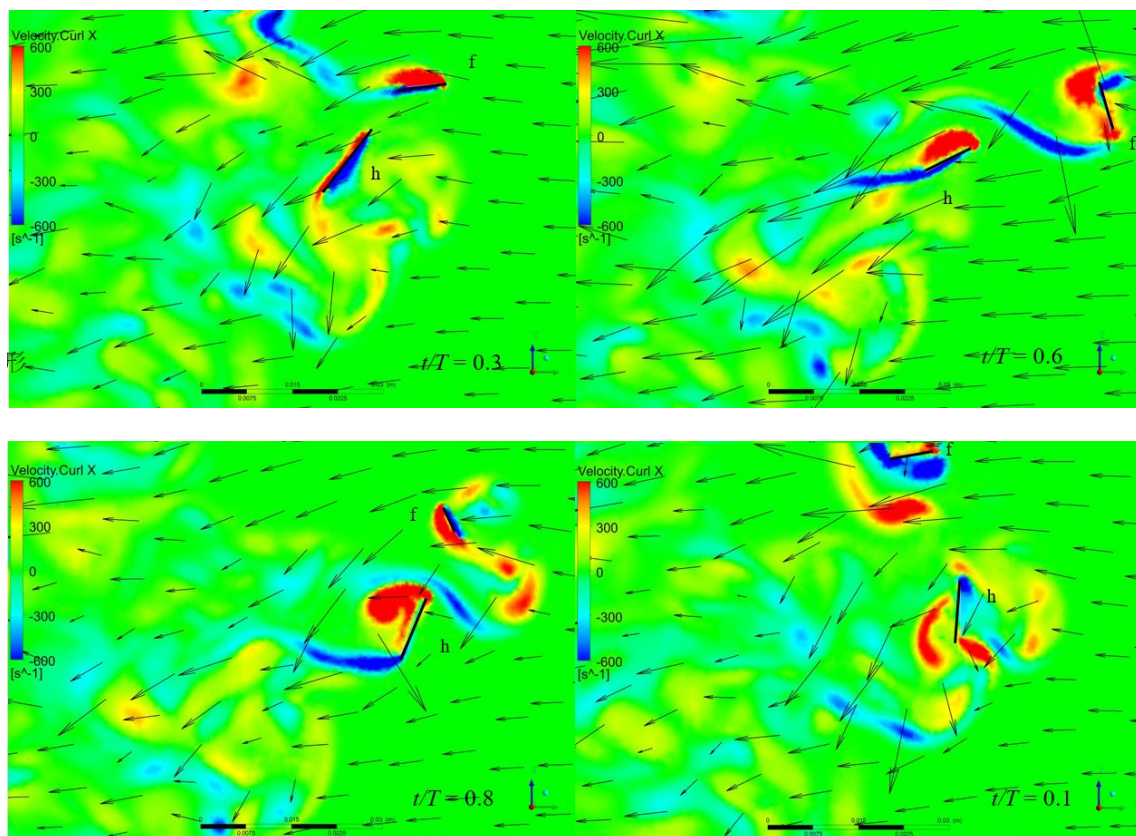


圖 4-20 固定來流  $U_{\infty} = 0.8 \text{ m/s}$ ，後翅 8 字形拍撲模型流場圖。左上圖為後翅下拍起始，右上圖為下拍中程，左下圖為上拍起始，右下圖為上拍中程。f 與 h 分別代表前翅與後翅。

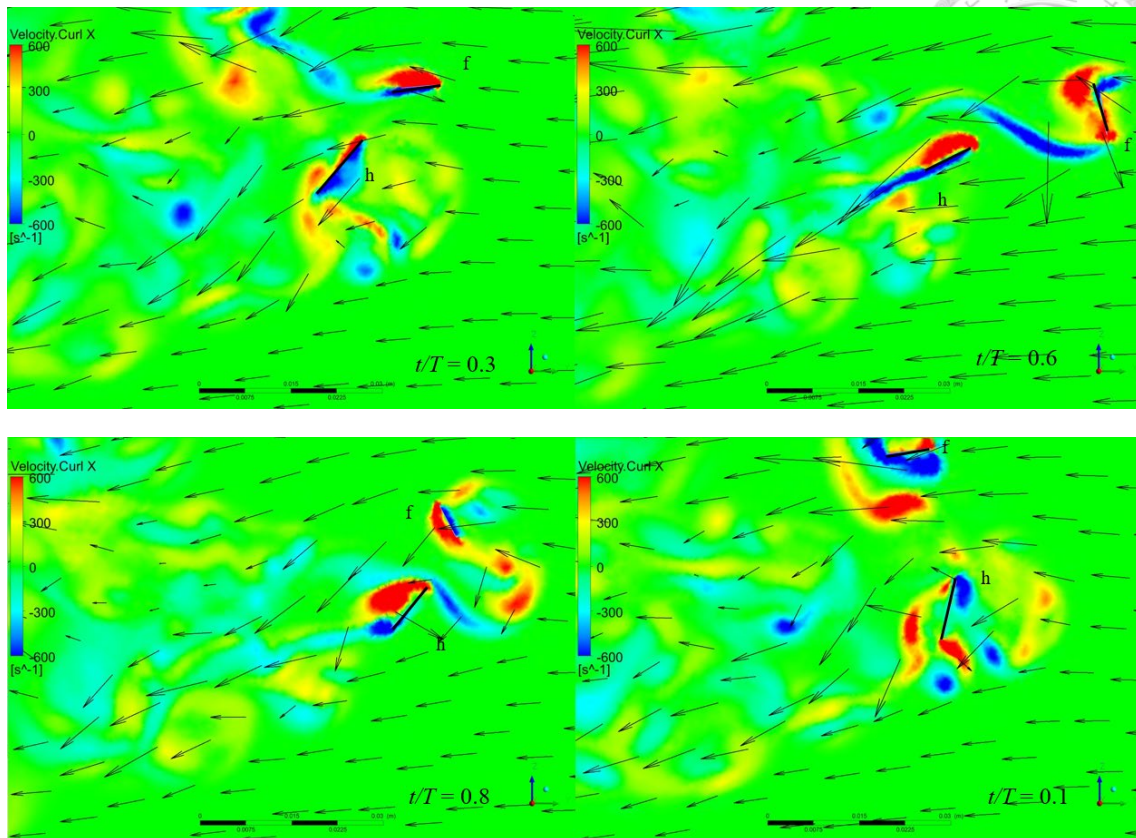


圖 4-21 固定來流 $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$ ，後翅 O 字形拍撲模型流場圖。左上圖為後翅下拍起始，右上圖為下拍中程，左下圖為上拍起始，右下圖為上拍中程。f 與 h 分別代表前翅與後翅。

圖 4-22~圖 4-24 為 3D 渦旋圖，其圖上顯示為 Velocity.Invariant Q 的等位面，其值為  $Q = 18000 \text{ s}^{-1}$ ，因此圖中未顯示有等位面之區域即該處無渦旋或強度未達  $Q = 18000 \text{ s}^{-1}$ 。在等位面上也可以看到顏色的分布，顏色會因為 x 方向的旋度而變化，顏色越偏向紅色或藍色代表該處 x 方向旋度較大。從圖 4-22 及圖 4-23 我們可以看到，8 字形拍撲模型的渦旋比較強，因此在其身體模型後方可以看到相較於 O 字形拍撲模型有較多的等位面，這代表 8 字形拍撲翅膀產生的渦旋強度比較強，說明 8 字形拍撲受到的升力較大。從圖 4-24 側面圖也可以看到，8 字形拍撲模型之後翅 x 方向旋度較強，且渦旋的流向較為偏下，表示流場經過前後翅以後動量更偏向下，該模型之升力較大。貼附在後翅上方黃色與紅色的等位面即後翅的 LEV，可以從這幾張圖看到 LEV 緊緊貼附在翅膀表面上，這正是拍撲翼升力的主要來源。



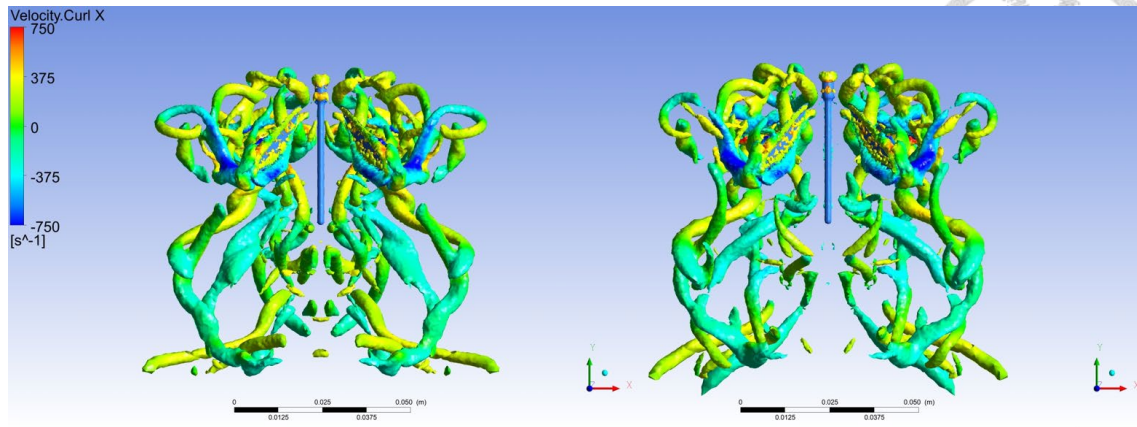


圖 4-22 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，上拍中程( $t/T=0.1$ )，左圖為 8 字形拍撲模型，右圖為 O 字形拍撲模型

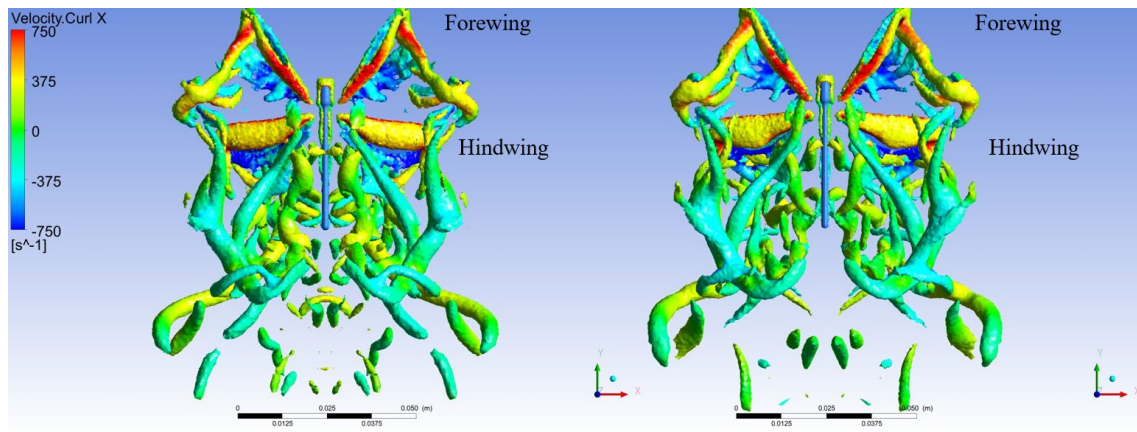


圖 4-23 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，下拍中程( $t/T=0.6$ )，左圖為 8 字形拍撲模型，右圖為 O 字形拍撲模型

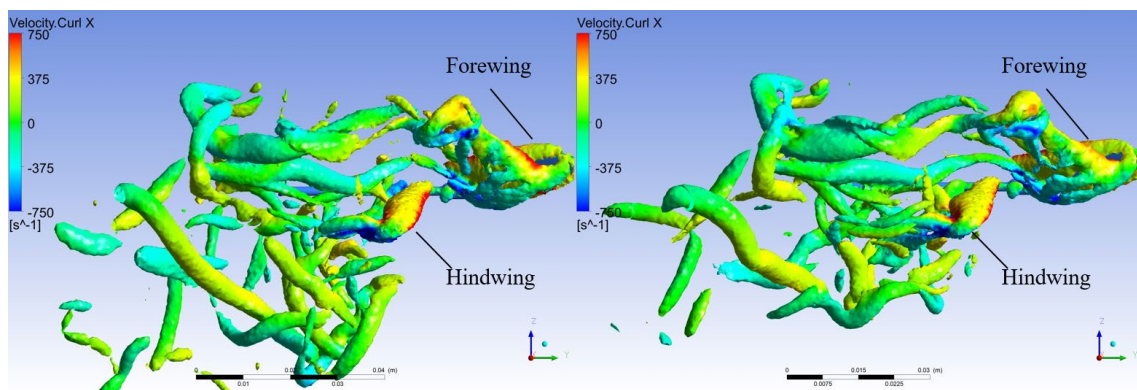


圖 4-24 Velocity.Invariant Q 等位面之 3D 渦漩上視圖，下拍中程( $t/T=0.6$ )，左圖為 8 字形拍撲模型，右圖為 O 字形拍撲模型

在初步分析過流場以及探討過前後翅交互作用造成的結果後，我們可以從圖 4-18 及圖 4-19 的垂直力與水平力圖可以看到，前後翅交互作用雖然存在，但是無論是水平力或垂直力，前翅對後翅的影響時好時壞，因此一週期平均後的受力可能差異影響就較不明顯。表 4-10~表 4-12 為單獨後翅模型與前後翅皆存在的完整模型受力結果比較圖。垂直力的部分可以看到在正常雙翅的豆娘模型後翅所受到的週期平均垂直力相較於單獨後翅的受力，O 字形拍撲更差了，而 8 字形拍撲更好了，但差異皆不到 5%。水平阻力在雙翅存在時，O 字形拍撲模型水平阻力減少了約 10%，而 8 字形拍撲模型則減少了約 12%。然而在功率的部分，不論 O 字形拍撲模型或 8 字形拍撲模型，皆有增加的現象。O 字形拍撲模型在有前翅存在時，後翅的功率僅會增加 5%，但 8 字形拍撲模型卻增加了 16%。因此我們可以得到，相較於單翅，真實的雙翅模型因為前後翅交互作用影響而改變的趨勢並不大，仍然是 8 字形拍撲在垂直力較有優勢，而 O 字形拍撲在水平力上較有優勢。垂直力幾乎不會被後翅交互作用影響，而水平阻力相較於豆娘質量約為 0.1 g 來說，減少的水平力影響也不大，但是在功率的部分，O 字形拍撲僅有微幅的增加，但 8 字形卻有很顯著的提升。

因此總結來說，在沒有改變相位差、拍撲平面，僅僅改變偏離角的情況下，前翅尾流對於後翅 8 字形及 O 字形拍撲所造成的影響雖然存在，但是差異不算很大，偏離角效應所造成的影響仍然較為明顯。

表 4-10 單獨後翅與雙翅存在之後翅垂直力比較表格

	拔除前翅之後翅受力	雙翅存在之後翅受力
<b>O 字形拍撲垂直力 (mN)</b>	0.35	0.339
<b>8 字形拍撲垂直力 (mN)</b>	0.454	0.460

表 4-11 單獨後翅與雙翅存在之後翅水平力比較表格

	拔除前翅之後翅受力	雙翅存在之後翅受力
O 字形拍撲水平力 (mN)	-0.144	-0.130
8 字形拍撲水平力 (mN)	-0.283	-0.250

表 4-12 單獨後翅與雙翅存在之後翅消耗功率比較表格

	拔除前翅之後翅功率	雙翅存在之後翅功率
O 字形拍撲功率 (mW)	0.373	0.390
8 字形拍撲功率 (mW)	0.535	0.619

#### 4-2.5 三維非穩態自由飛行數值分析

在前幾個小節，本文探討了單翅模型的靜止來流與固定來流的數值分析，以便討論最純粹的偏離角與攻角所帶來的效應，也方便與一般期刊文獻比較。在前一節本文也對於雙翅模型中，後翅改變偏離角後所受到的力作數值分析。然而這仍然不是最貼近真實情況的流場。不同於固定翼，在昆蟲或鳥類等拍撲翼的飛行中，由於動作一直在改變，且上拍及下拍對於力的產生方向也很不一樣，每個時刻的升阻力都會變化，從前幾個小節的數值分析結果也能看到這個現象。因此本研究又做了本實驗室前人研究出來的自由飛行數值分析。相較於固定來流將前進速度給限制了，自由飛行會利用程式輸入模型的動作，讓流場從靜止開始，根據翅膀在流場中拍動所受到的升阻力，換算成身體的水平與垂直速度，使數值分析更加符合真實情況。經由這個數值分析，能使本研究結果在未來作為拍撲型無人飛行器機構的動作參考時，更有參考價值。

圖 4-25~圖 4-27 為自由飛行 20 週期的數值分析結果。從圖 4-27 可以看到，8 字形拍撲模型的軌跡相較於 O 字形拍撲更有爬升的趨勢，而在同樣 20 週期的時間內，O 字形拍撲的軌跡 Y 的位移量也較多，表示前飛比較快。圖 4-25 及圖 4-26 可

以看到，水平速度為 O 字形拍撲模型明顯較 8 字形高，而在垂直速度也能看到 8 字形拍撲模型稍微比 O 字形拍撲高一些。垂直速度與水平速度地的上下震盪中，垂直速度的極小值及水平速度的極大值約出現在後翅上拍結束時，而垂直速度的極大值及水平速度的極小值約出現在後翅下拍結束時，這是因為上拍主要產生水平力，下拍主要產生垂直力的結果。

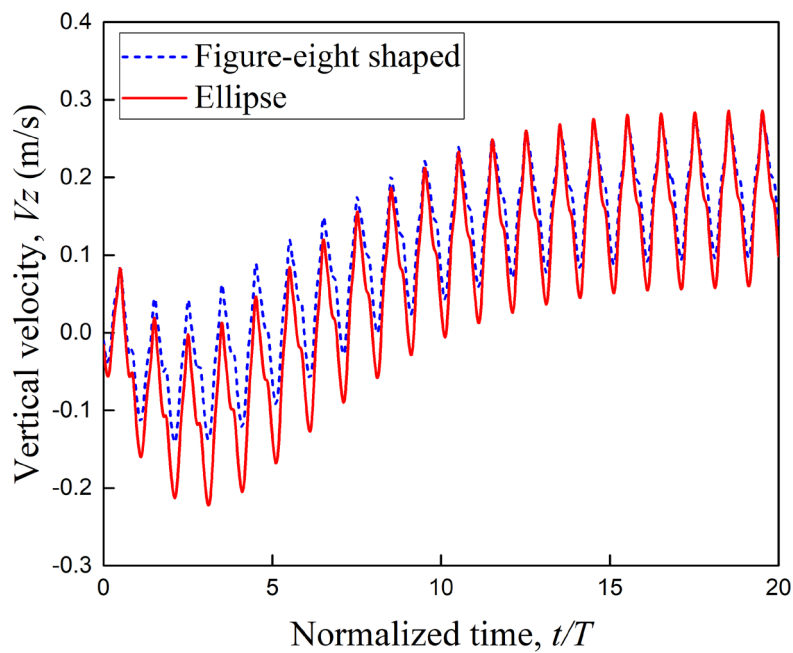


圖 4-25 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之垂直速度比較

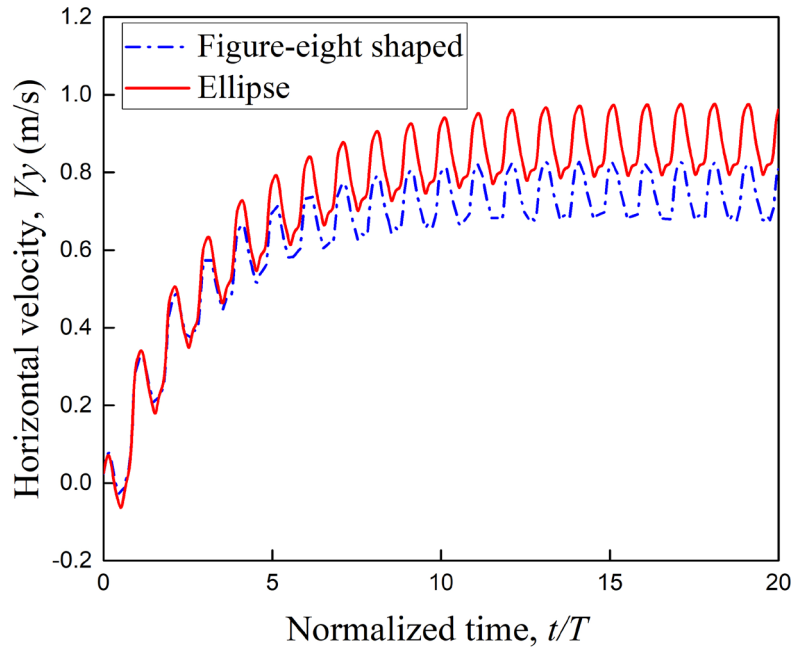


圖 4-26 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之水平速度比較

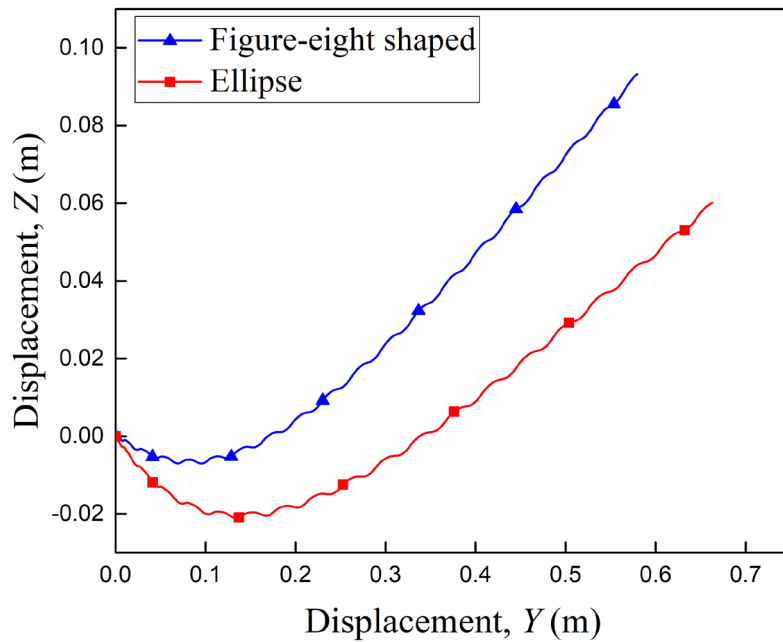


圖 4-27 自由飛行數值分析，O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型之軌跡比較



在圖 4-25 中，我們可以發現，8 字形拍撲軌跡的模型，垂直速度極小值比 O 字形拍撲軌跡的模型大，上拍時 8 字形拍撲配合一般旋轉角時仍然能產生一定的垂直力，而 O 字形拍撲則利用不對稱攻角達到增加水平推力的效果，也犧牲了一些垂直力。但整體來說，垂直速度的差異雖然在第 10 個週期以前非常明顯，在第 10 個週期以後卻沒有預期來的顯著，兩個拍撲軌跡模型的極大值幾乎相同，這與前一小節所做的固定來流數值分析似乎有些抵觸。會有這樣的現象其實是因為 O 字形拍撲有著比較優秀的前進速度，這也意味著相對的來流速度也會提高，而相對來流越高升力當然也越高，才会在第 10 週期時，也就是水平速度大約穩定後，由於 O 字形拍撲軌跡模型的來流速度大於 8 字形拍撲軌跡模型的來流速度，導致兩個拍撲軌跡的垂直速度差距越來越小。因此本研究認為此數值分析還能再改良。本研究希望探討 8 字形與 O 字形的拍撲軌跡，並找到個別適合的飛行模式，而數值分析的結果全部顯示 8 字形拍撲軌跡有利於垂直力，應該套用在爬升飛行；O 字形拍撲軌跡有利於水平力，且耗功低，應該套用在前進飛行。針對這點，本研究去做了另一種數值分析模擬，其情境為當拍撲型無人飛行器穩定前飛時，在前方遇見障礙物需要急速爬升。因此本研究在利用程式碼讓豆娘模型保持 O 字形拍撲軌跡前飛 20 個週期，使其穩定前飛後，轉為 8 字形拍撲軌跡，並觀察軌跡與速度的變化，其結果如圖 4-28 所示，在第 20 週期以後水平速度減少了，且垂直速度在剛過第 20 週期後有明顯提升。

因此，當拍撲型無人飛行器在穩定前飛時偵測到障礙物後，需要減速並爬升，就可以採用 O 字形轉換為 8 字形的拍撲軌跡。而穩定前飛，則是 O 字形拍撲最為省功並有最好的水平力。若需要爬升，8 字形是最適合的拍撲軌跡。

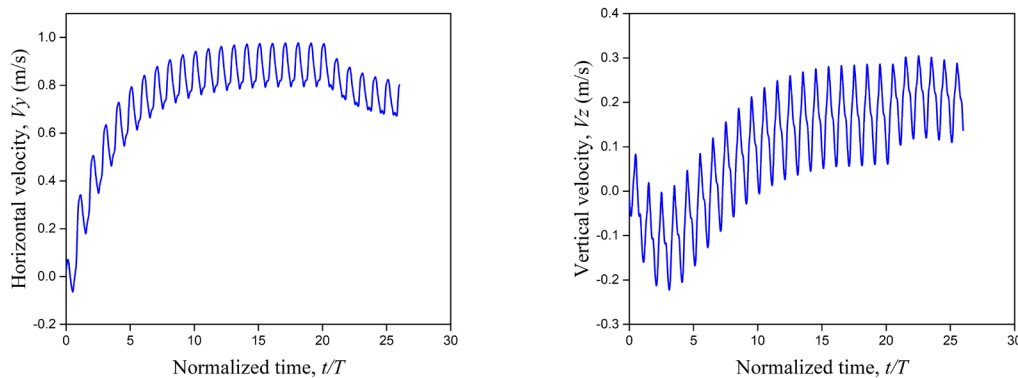


圖 4-28 O 字形拍撲軌跡轉 8 字形拍撲軌跡模型之自由飛行數值分析，左圖為水平速度，右圖為垂直速度

#### 4-3 偏離角振幅之數值分析

豆娘的拍撲軌跡可以由偏離角函數而改變，O 字型的偏離角頻率變為兩倍時，就會變成 8 字形拍撲軌跡，而除了改變拍撲軌跡形狀以外，拍撲軌跡的長與寬也是可以調整的參數。如圖當改變拍撲角時，拍撲軌跡的長度會變長，但調整拍撲角會有很多的變數涵蓋在內，需要花更多的數值分析去討論拍撲角的效應，因此在這裡不納入討論。而調整偏離角振幅時，可以影響該拍撲軌跡的寬度，如圖 4-29 所示，若增加偏離角振幅，則可以期望 O 字形或 8 字形會變寬。Xu 在 2006 年就曾經更改偏離角振幅來探討升阻力(Xu *et al.*, 2006)，但其模型為單翅的蜻蜓，本研究以此為參考，並藉由從樣本觀測到最真實的豆娘翅膀動作，包括將拍撲平面方位角也納入考量，做標準的豆娘雙翅模型數值分析，以整理出更完善的結果與趨勢。由於自由飛行在流場穩定時，每周期平均前進速度與垂直速度皆不會改再改變，這也代表水平力會趨近於 0，垂直力趨近於豆娘自身重力，因此在本小節使用的數值分析為固定來流  $U_\infty = 0.8 \text{ m/s}$ ，以便探討水平力與垂直力。

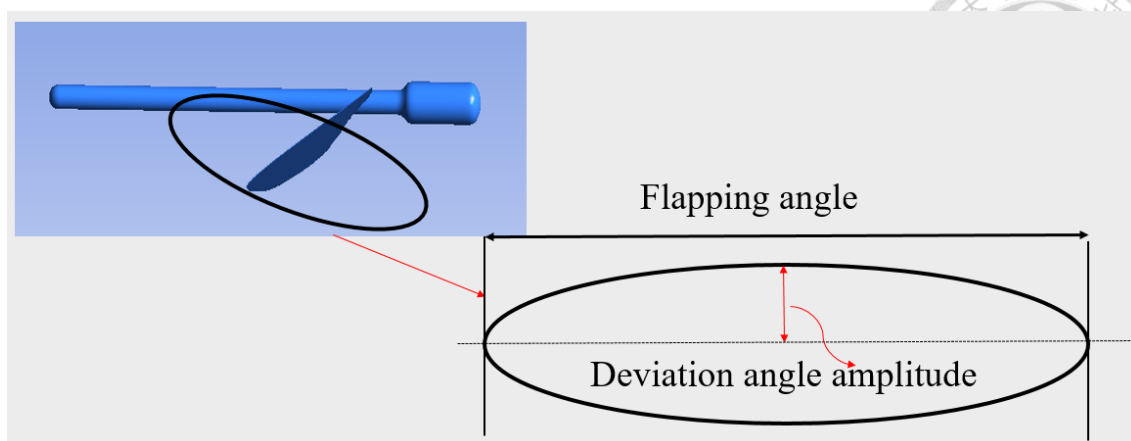


圖 4-29 偏離角振幅示意圖

表 4-13 與表 4-14 為 O 字形拍撲與 8 字形拍撲模型調整偏離角後的結果比較圖，前面樣本影片觀測到的豆娘偏離角振幅大約為 3 度，因此以此為參考，調整為 0.75 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍及 3 倍的偏離角振幅，並觀察水平力、垂直力及功率有何變化，其中豆娘樣本影片觀測到的 3 度偏離角振幅模型結果以粗體字表示以便比較。

從兩個表格不難發現，不論何種模型，偏離角振幅越高，消耗功率也越大，因為偏離角振幅增加會增加拍撲軌跡的路徑長，因此該結果較為直觀。從水平力的結果來看，O 字形拍撲模型的水平力隨著偏離角振幅的增加而改善，且在 6 度的以內水平力的差異皆不大；8 字形拍撲模型則有相反的結果，水平力隨著偏離角振幅增加而變差。垂直力的部分，O 字形拍撲模型隨著偏離角振幅越大而變差，從圖 4-30 可以看到，相較於左圖偏離角振幅為 3 度的模型，偏離角振幅 9 度的模型，其後翅 TEV 及 LEV 都明顯較小，導致垂直力較差，這也使的垂直力係數除以功率係數變得更差；8 字形拍撲則是在偏離角振幅增加時，由於在下拍時偏離角減少幅度更大，因此偏離角效應更加明顯，使垂直力增加，但是在垂直力係數除以功率係數可以看到其效率越來越差。因此本研究認為，在重視節省功耗的 O 字形拍撲，結果偏離角振幅與前飛樣本觀測到的相同，在偏離角振幅約為 3 度時較為適合，而 8 字形拍撲若在非常需要垂直力的情況下如爬升等，可以再提高些微的偏離角振幅，但是消耗功率也會因此增加，導致效率降低。



表 4-13 O 字形拍撲模型調整偏離角振幅之結果比較表

偏離角振幅(角度)	2.25	<b>3.00</b>	4.50	6.00	9.00
水平力 (mN)	-0.066	<b>-0.064</b>	-0.055	-0.042	-0.013
垂直力 (mN)	0.242	<b>0.244</b>	0.237	0.229	0.209
消耗功率 (mW)	0.334	<b>0.338</b>	0.344	0.354	0.381
$C_H/C_p$	1.803	<b>1.800</b>	1.714	1.609	1.365

表 4-14 8 字形拍撲模型調整偏離角振幅之結果比較表

偏離角振幅(角度)	2.25	<b>3.00</b>	4.50	6.00	9.00
水平力 (mN)	-0.153	<b>-0.160</b>	-0.166	-0.174	-0.190
垂直力 (mN)	0.334	<b>0.340</b>	0.347	0.351	0.373
消耗功率 (mW)	0.507	<b>0.540</b>	0.603	0.640	0.777
$C_H/C_p$	1.639	<b>1.567</b>	1.432	1.365	1.194

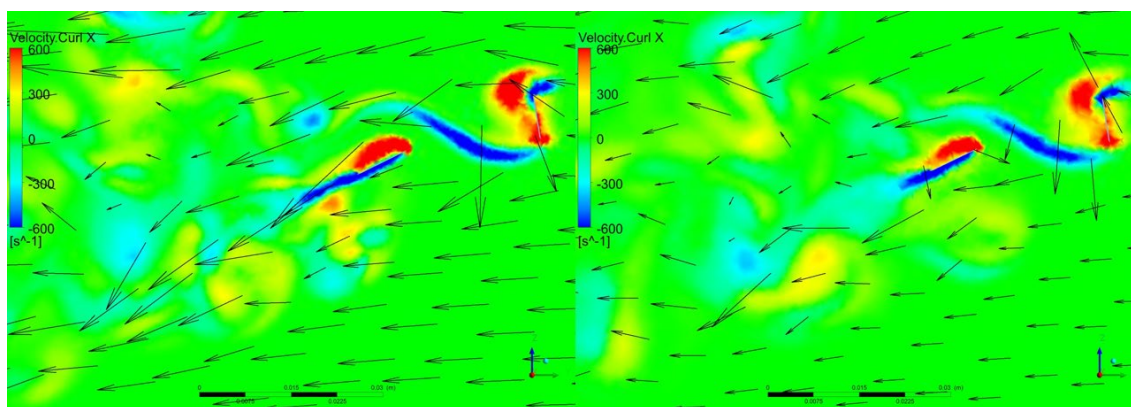


圖 4-30 O 字形拍撲模型下拍中程流場圖比較，左圖為偏離角振幅 3 度模型，右圖為偏離角振幅 9 度模型。



## 第五章 結論與未來展望

### 5-1 結論

本文透過高速正交攝影以及數值分析模擬探討豆娘改變偏離角，即改變翅膀拍撲軌跡時，對於升阻力及功率所造成的影響。本文可分為兩部分，豆娘動作捕捉拍攝以及數值分析模擬。動作捕捉以台灣特有種豆娘短腹幽螳的動作為參考，透過高速攝影機的正交攝影來捕捉昆蟲翅膀的動作資訊，包含旋轉角  $\psi$  (攻角)、拍撲角  $\phi$ 、偏離角  $\theta$ 、拍撲平面傾斜角  $\beta$ 、拍撲平面方位角等資訊，再經由標點、曲線擬合等步驟套用到三維非穩態數值分析模擬的模型，再利用實驗室前人研究出的自由飛行速度數值分析，取代固定來流速度的數值分析，以求模型能夠最符合真實生物飛行。調整偏離角對升阻力與功率的影響，並將這些結果作整理，以期望日後無人飛行器可以此為參考，找到最佳的參數。

從動態捕捉的部分我們發現到，比起實驗室前人所研究的白痣珈螳，短腹幽螳體型較小，後翅的拍撲振幅僅為前翅的一半左右。將各組影片捕捉出來的資訊做平均後，發現前翅的各個角度的標準偏差都很小，意即前翅動作都非常相似，而後翅之偏離角與旋轉角的標準偏差都非常大，因此本研究推估短腹幽螳前翅貢獻了較多的升力，而後翅則是扮演著微調升阻力的作用，在不同情況下會改變後翅的動作來調整飛行軌跡，也因此本研究專注在改變後翅的偏離角。

在動態影片中本研究也發現豆娘在前飛時，後翅幾乎為 O 字形拍撲，而且攻角與一般常見的攻角不同，在上拍時攻角會接近 90 度。在一組非 O 字形拍撲的影片中，則是使用一般比較常見的攻角，幾乎是上下拍對稱，上拍攻角僅比下拍高一些。因此針對這個現象，本文分別去做交叉的數值分析，發現 O 字形拍撲的模型在上拍攻角接近 90 度的情況下，比起使用一般對稱的攻角，水平阻力會減少 38%，本研究認為這是由於 O 字形拍撲上拍時平行於拍撲平面，配合近乎 90 度的攻角，會使水平推力達到最大化。而從 8 字形拍撲的分析結果則發現，若上拍攻角接近 90 度時，會喪失升力提高的優勢，這是因為 8 字形提高升力的原因主要為增加有

效攻角(Luo *et al.*, 2017; Sane & Dickinson, 2001), 因此在攻角接近 90 度的情況下, 增加有效攻角並不能有效提高垂直力, 因此 8 字形使用如一般文獻使用的上下拍對稱攻角較為合適。在後面的數值分析也將 8 字形與 O 字形分開討論, 並個別套用適合的攻角, 以發揮兩個拍撲軌跡各自特有的優勢, 並找到最佳參數。

攻角的因素也納入考量之後, 在固定來流流速為 0.8 m/s 的情況下, 8 字形拍撲垂直力可以提高 30%; 但也增加了將近一倍水平阻力。從功率的觀點來看, 在同樣的來流速度情況下, 8 字形拍撲的功率相較於 O 字形拍撲提高了 43%, 因此固定來流的數值分析結果為 8 字形升力較高, 但功率也比較高, 應該套用在無人飛行器的上升飛行; 而 O 字形拍撲則因為水平阻力較低, 且消耗功率也較低, 應該套用在無人飛行器的穩定前飛。為求應用的廣泛性, 也為了探討前後翅交互作用, 本文也以同樣的模型拔除前翅後, 去做數值分析。拔除前翅後同樣固定來流流速 0.8 m/s 的情況下, 8 字形拍撲的垂直力相較於雙翅存在時要更高了, 而 O 字形拍撲的垂直力則相較於雙翅存在時更低了, 但相差都不到 5%。而水平阻力的部分則是兩個拍撲軌跡在拔除前翅後增加了 10~15%, 因此整體來說, 以短腹幽螳為模型, 前翅的加入有稍微幫助飛行, 但影響不是很明顯。

固定來流數值分析過後, 本研究也使用自由飛行來做更擬真的數值分析, 發現 8 字形拍撲的軌跡的確爬升狀況較 O 字形拍撲好, 而 O 字形拍撲前飛的狀況也比 8 字形理想, 因此結論與固定來流相同。為了再模擬更多真實情況, 本研究也做了模式轉換的數值分析, 模擬 O 字形拍撲轉換為 8 字形拍撲, 發現軌跡斜率確實會提高, 因此本研究認為此一轉換策略可以套用在無人飛行器前飛轉上飛的場合。

為了提高偏離角參數的完整性, 本研究將偏離角振幅也納入討論。結果發現 8 字形拍撲在偏離角振幅越大時, 垂直力會越高, 然而消耗功率也相對的提升, 且從垂直力係數除以功率係數得到的效率來看, 偏離角振幅越高也讓效率降低, 這很可能是因為在上下拍過程中, 有效攻角增加的效果增強所致; 至於 O 字形則是偏離角振幅越大, 垂直力及效率皆會降低。

綜上所述, 8 字形拍撲適合在爬升飛行時使用, 且在必要情況下可以增加一些



偏離角振幅以改善升力，但必須付出更多的功率；而 O 字形則是適用於前飛，且增加偏離角振幅沒有增益，反而增加了消耗的功率。

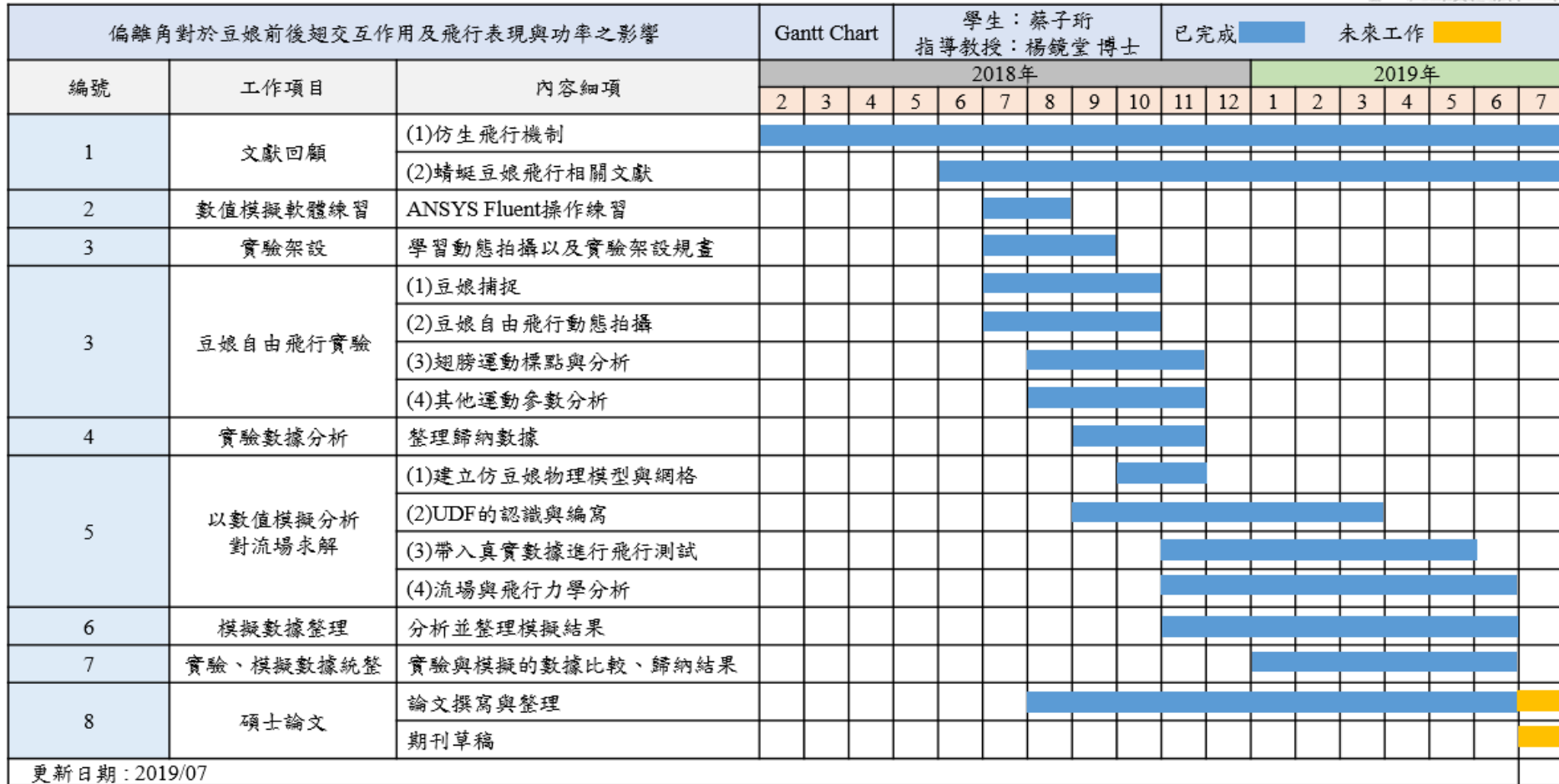
## 5-2 未來展望

本文整理了豆娘的偏離角與豆娘升阻力與功率的關係。針對目前的結果，本研究擬定了可以使其更加完善之方法，以期許未來應用到無人飛行器上能更加完整的結果。

1. 本研究主要整理了後翅 8 字形拍撲與 O 字形拍撲，並且將攻角、偏離角振幅等都納入討論，但礙於時間、成本與環境條件等考量，無法拍攝更多的影片以取樣。在別的文獻也有提到 U 字形、雙 8 字形等，未來若有機會取樣到更多樣化的拍撲軌跡，可以再加以研究，並探討其適合的飛行模式。
2. 本文研究之物種短腹幽螳，後翅的拍撲振幅較小，而其他豆娘如白痣珈螳的後翅拍撲角振幅較大，可能使偏離角效應更加明顯，因此若要提高偏離角結果的完整性，有取樣其他物種之必要。
3. 承第二點所述，短腹幽螳的前翅在不同數據間幾乎沒有變化，因此本研究並未加以探討，若在其他物種或飛行模式之影片樣本發現前翅的字形變化，可以加以討論，可能使豆娘等四翅昆蟲的優勢發揮得更淋漓盡致。



5-3 甘特圖



## 第六章 參考文獻



- Bennett, L. (1977). Clap and fling aerodynamics-an experimental evaluation. *Journal of Experimental Biology*, 69(1), 261-272.
- Birch, J. M., & Dickinson, M. H. (2001). Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, 412(6848), 729.
- Dickinson, M. (1994). The effects of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low Reynolds numbers. *Journal of Experimental Biology*, 192(1), 179-206.
- Dickinson, M. H., Lehmann, F.-O., & Sane, S. P. (1999). Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 284(5422), 1954-1960.
- Ellington, C. P., Van Den Berg, C., Willmott, A. P., & Thomas, A. L. (1996). Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, 384(6610), 626.
- Hu, Z., & Deng, X.-Y. (2014). Aerodynamic interaction between forewing and hindwing of a hovering dragonfly. *Acta Mechanica Sinica*, 30(6), 787-799.
- Kim, H.-Y., Han, J.-S., & Han, J.-H. (2019). Aerodynamic effects of deviating motion of flapping wings in hovering flight. *Bioinspiration & Biomimetics*.
- Kramer, V. M. (1932). Die zunahme des maximalauftriebes von tragflugeln bei plotzlicher anstellwinkervergrosserung (boeneffekt). *Z. Flugtech. Motorluftschiff*, 23, 185-189.
- Lan, S., & Sun, M. (2001). Aerodynamic properties of a wing performing unsteady rotational motions at low Reynolds number. *Acta Mechanica*, 149(1-4), 135-147.
- Lehmann, F.-O., & Pick, S. (2007). The aerodynamic benefit of wing-wing interaction depends on stroke trajectory in flapping insect wings. *Journal of Experimental Biology*, 210(8), 1362-1377.
- Lighthill, M. (1973). On the Weis-Fogh mechanism of lift generation. *Journal of Fluid Mechanics*, 60(1), 1-17.



- Luo, G., Du, G., & Sun, M. (2017). Effects of stroke deviation on aerodynamic force production of a flapping wing. *AIAA Journal*, 25-35.
- Maxworthy, T. (1979). Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. Part 1. Dynamics of the 'fling'. *Journal of Fluid Mechanics*, 93(1), 47-63.
- Minotti, F. (2002). Unsteady two-dimensional theory of a flapping wing. *Physical Review E*, 66(5), 051907.
- Pines, D. J., & Bohorquez, F. (2006). Challenges facing future micro-air-vehicle development. *Journal of Aircraft*, 43(2), 290-305.
- Sane, S. P. (2003). The aerodynamics of insect flight. *Journal of Experimental Biology*, 206(23), 4191-4208.
- Sane, S. P., & Dickinson, M. H. (2001). The control of flight force by a flapping wing: lift and drag production. *Journal of Experimental Biology*, 204(15), 2607-2626.
- Sane, S. P., & Dickinson, M. H. (2002). The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight. *Journal of Experimental Biology*, 205(8), 1087-1096.
- Spedding, G., & Maxworthy, T. (1986). The generation of circulation and lift in a rigid two-dimensional fling. *Journal of Fluid Mechanics*, 165, 247-272.
- Sun, M., & Huang, H. (2007). Dragonfly forewing-hindwing interaction at various flight speeds and wing phasing. *AIAA Journal*, 45(2), 508-511.
- Sun, M., & Lan, S. L. (2004). A computational study of the aerodynamic forces and power requirements of dragonfly (*Aeschna juncea*) hovering. *Journal of Experimental Biology*, 207(11), 1887-1901.
- Sun, M., & Tang, J. (2002). Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *Journal of Experimental Biology*, 205(1), 55-70.
- Sun, X., Gong, X., & Huang, D. (2017). A review on studies of the aerodynamics of



- different types of maneuvers in dragonflies. *Archive of Applied Mechanics*, 87(3), 521-554.
- Sunada, S., Kawachi, K., Watanabe, I., & Azuma, A. (1993). Performance of a butterfly in take-off flight. *Journal of Experimental Biology*, 183(1), 249-277.
- Vogel, S. (1996). *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow*. New Jersey: Princeton University Press.
- Wagner, H. (1925). Über die Entstehung des dynamischen Auftriebes von Tragflügeln. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 5(1), 17-35.
- Walker, P. (1931). Experiments on the growth of circulation about a wing and an apparatus for measuring fluid motion. *Rep. Memo. Aeronaut. Res. (Great Britain)*, 1402.
- Wang, J. K., & Sun, M. (2005). A computational study of the aerodynamics and forewing-hindwing interaction of a model dragonfly in forward flight. *Journal of Experimental Biology*, 208(19), 3785-3804.
- Weis-Fogh, T. (1973). Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production. *Journal of Experimental Biology*, 59(1), 169-230.
- Xu, J., Zhao, C., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2006). Effect of flapping trajectories on the dragonfly aerodynamics. *Chinese Science Bulletin*, 51(7), 777-784.
- Zhang, J., & Lu, X.-Y. (2009). Aerodynamic performance due to forewing and hindwing interaction in gliding dragonfly flight. *Physical Review E*, 80(1), 017302.
- 梁家銘 (2018)。豆娘不對稱拍翅動作與飛行操控研究。臺灣大學機械工程學系碩士論文。
- 張勝凱 (2018)。利用腹部動態控制蝴蝶飛行研究。臺灣大學機械工程學系碩士論文。



費約翰 (2017)。蝴蝶身體俯仰動態之飛行動力機制與飛行操控研究。臺灣大學機械工程學系博士論文。

鄒佩沂 (2018)。翅膀相位差對豆娘與蜻蜓懸停策略之影響。臺灣大學工程科學與海洋工程學系碩士論文。

