

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

豆娘穩定前飛與急停迴旋之力學機制探討

Investigation of steady forward flight and sharp turning  
mechanism of damselfly

蔡語誠

Tsai, Yu-Chen

指導教授：楊鏡堂博士

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

中華民國一〇三年六月

June, 2014

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

豆娘穩定前飛與急停迴旋之力學機制探討

Investigation of steady forward fly and sharp turning  
mechanism of damselfly

本論文係蔡語誠君 (r01522107) 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 103 年 6 月 25 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：

楊鏡堂

(簽名)

(指導教授)

謝朝暉

楊靖珍

吳宗信

系主任

楊耀卅

(簽名)

## 誌謝



很感謝神帶領我進入 BEAM Lab 這個實力堅強的大家庭，一路走來恩典滿滿。回想起這兩年，非常感謝楊鏡堂教授開明式的指導方式，讓我在研究上可以自由地探索與創新，使我不受到框架的束縛，研究過程漫長的路途中，更適時提供客觀但關鍵的問題與想法，研究方向越發清晰明確；另外，楊老師更給予了尚未成熟的我許多越級練功的機會，包含了在美國 APS 物理年會口頭報告的機會，大大增加了我的廣度與視野，謝謝您兩年多來亦師亦友的砥礪和指導。感謝這兩年來我的實驗室同伴，你們每一位都是我學習的對象，首先要感謝仿生組的約翰，你創新但又嚴謹的研究思維也激勵我不斷突破，在數值模擬的方面很謝謝你的關照與指導，而在美國的那一週我們彼此照應，有你真好；感謝大姐頭筱萱，妳常常給我老經驗的提醒並帶給大家很愉快的實驗室氣氛；凱翔、國祥、佑廷你們在做研究的認真態度和動力不斷鼓勵我往前，謝謝你們。第一年與實驗室的學長姐相處和學習的過程非常寶貴，感謝聿珩學姊留下的寶貴研究工具和成果，並在出國前給我的寶貴意見；感謝健元學長在研究方法的指導、研究方向的關鍵提點和維持實驗室輕鬆做研究的氣氛；感謝親切但犀利的思詠學姊成為我修課與做研究時最佳的技術指導，並提供亦師亦友的幫助。特別感謝特生中心的林斯正博士，您不辭辛勞地提供活體的豆娘供應我的實驗，並在過程中給予許多寶貴的建議和指教。

感謝國科會計畫 NSC 100-2221-E-002-135-MY3 支持本研究實驗經費支出。

## 摘要



本文選用台灣常見的豆娘中華珈璽以及細胸珈璽作為實驗物種，將其放入特製之狹長型透明壓克力觀測箱中，觀測豆娘在其中試圖迴避四周壁面而由原本向前飛行轉換至向後飛行的急遽變化。實驗分析使用高速攝影機捕捉豆娘迴旋時的拍翅動作以及身體俯仰動作，並利用二維 PIV 技術將流場可視化，找出影響轉彎的關鍵運動學參數及限制，並藉由比較拍翅運動學和流場渦旋互動歸納出豆娘特殊的轉彎策略。

結果顯示豆娘在不同雷諾數(Reynolds number)區間下會採用兩種不同的迴旋模式，分別是低雷諾數(50~300)的往復式急迴旋以及中高雷諾數(200~700)的旋轉式急迴旋。頭部加速度與飛行雷諾數成正相關。低雷諾數下( $Re < 300$ )豆娘以增加拍翅頻率(+26%)獲得頭部速度的大幅提升(+100~120%)，高雷諾數( $Re > 200$ )下豆娘則普遍藉由降低拍翅平面角度改變阻力作用點，使身體旋轉以大幅增加頭部速度(+70~75%)。並且隨著雷諾數提高，豆娘之史卓荷數(Strouhal number)會趨近約 0.2，以 Taylor (2003) 之觀點可視為迴旋飛行操控之最佳能量效率操作點。

流場分析顯示在穩定前飛期間，豆娘前翅翼前緣渦旋(leading edge vortex, LEV)逸散緩慢，上下拍轉換期間會停留在前翅後方與後翅上方之狹窄區間，並與後翅翼前緣渦旋融合，強度提升至最高 160 1/s 並持續維持約半周期；此現象說明豆娘能夠以低於蜻蜓一半的拍翅頻率飛行，並在急迴旋期間之懸停階段藉由相似機制提供足夠升力之原因。

研究中之豆娘運動學參數可被使用於更具有操控潛能之微飛行器利用，並期望能改善能源使用效率之目的。

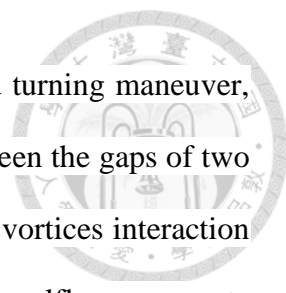
**關鍵詞：**豆娘、操控性飛行、轉彎、身體俯仰角、翼前緣渦旋、渦旋互動



## Abstract

The turning mechanics of damselfly species *Psolodesmus mandarinus* and *Mnais tenuis* is investigated. When free-flying in highly-confined acrylic chambers, damselflies are observed to decelerate from forward fly status and perform special turning maneuver in order to avoid impact. High speed camera (fps>1000) is used to capture transient flapping trajectories and body posture while two dimensional PIV technique reveals the transient flow field and vortices patterns. The study focuses on finding the key kinematic parameters influencing the turning ability and deducing the turning strategies by combining flapping kinematics and vortices interaction.

Results show that damselflies mainly use two different kinds of turning modes according to their forward fly Reynolds number and the head acceleration increases with increasing Reynolds number. When the Reynolds number is lower than 300, damselflies perform “reciprocating turn” while they shift to “rotational turn” when the Reynolds number is greater than 200. During reciprocating turn, damselflies increase their flapping frequency to increase their head acceleration up to 120% compared to counterparts with same Reynolds number. In rotational turn, damselflies adjust their stroke plane angle to change the location of the drag force. A net moment is thus created to rotate the body, enhancing the head acceleration up to 75% compared to counterparts with same Reynolds number. Additionally, as Reynolds number increases, the operating Strouhal number for damselflies is shown to approach a constant of 0.2, which agrees with Taylor (2003) that flapping insects operate at certain Strouhal numbers in order to achieve high energy efficiency.



The study also discovers that during both forward fly and turning maneuver, the slowly-shed fore wing LEVs interact with hind wing LEVs between the gaps of two wings, forming sustaining vortices with vorticity up to 160 1/s. The vortices interaction mechanism strengthens the facts that under same flying speed a damselfly can operate with half the flapping frequency compared to a dragonfly and, during hovering stage in turning maneuver, the lift is sufficient to provide body support.

Flapping kinematics obtained in the study can be used to design and fabric more agile and energy-saving micro air vehicles capable of challenging tasks.

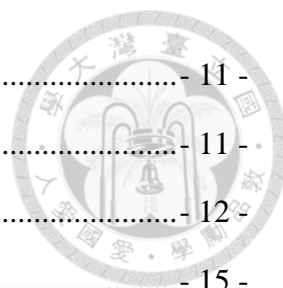
**Key words:**

damselfly, maneuvering flight, turning, body pitch angle, leading edge vortex, vortices interaction

# 目錄

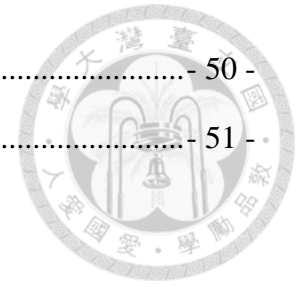


口試委員會審定書 .....	ii
誌謝 .....	iii
中文摘要 .....	iv
英文摘要 .....	v
目錄 .....	vii
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xi
符號說明 .....	xii
第一章 前言 .....	- 1 -
1-1 研究背景與動機 .....	- 1 -
1-2 研究目的 .....	- 2 -
第二章 文獻回顧 .....	- 3 -
2-1 名詞解釋 .....	- 3 -
2-2 微飛行器 .....	- 5 -
2-2.1 起源與形式 .....	- 5 -
2-2.2 飛行器的種類 .....	- 6 -
2-2.3 微型飛行器的發展困境 .....	- 7 -
2-3 拍撲翼飛行機制 .....	- 7 -
2-3.1 渦度與環流量 .....	- 7 -
2-3.2 Kutta-Joukowski 定理 .....	- 8 -
2-3.3 翼前緣渦旋與延遲失速現象 .....	- 8 -
2-3.4 尾流捕捉 .....	- 9 -
2-3.5 拍翼與拋翼 .....	- 9 -
2-4 豆娘 .....	- 10 -
2-4.1 豆娘構造簡介 .....	- 10 -
2-4.2 豆娘振翅結構 .....	- 10 -



2-5	蜻蜓與豆娘的飛行 .....	11 -
2-5.1	穩定前飛研究 .....	11 -
2-5.2	操控性飛行研究 .....	12 -
第三章	研究方法 .....	15 -
3-1	實驗參數與因次分析 .....	16 -
3-2	實驗對象 .....	18 -
3-3	動作分析 .....	19 -
3-3.1	觀測平台與高速攝影機 .....	19 -
3-3.2	分析方法 .....	20 -
3-4	流場分析 .....	21 -
3-4.1	粒子影像測速法原理 .....	21 -
3-4.2	實驗架設 .....	22 -
3-5	機構實作 .....	24 -
第四章	結果與討論 .....	27 -
4-1	動作與運動學參數分析 .....	27 -
4-1.1	迴旋動作和參數定義 .....	27 -
4-1.2	急迴旋運動學參數總覽 .....	29 -
4-1.3	前飛和迴轉動作比較 .....	32 -
4-1.4	頻率調控機制 .....	34 -
4-1.5	拍翅平面角度調控機制 .....	35 -
4-1.6	攻角 .....	36 -
4-1.7	身體俯仰角調控機制與轉彎策略 .....	37 -
4-2	流場分析 .....	38 -
4-2.1	穩定前飛 .....	38 -
4-2.2	急迴旋 .....	39 -
4-3	中華珈瑤與細胸珈瑤力學特性比較 .....	47 -
第五章	結論與展望 .....	49 -

甘梯圖 .....	50
參考文獻 .....	51



## 圖目錄

圖 2-1 文獻回顧架構圖 .....	3
圖 2-2 豆娘身體空氣動力學名詞定義 .....	4
圖 2-3 機翼相關參數定義 .....	4
圖 2-4 上下拍名詞定義 .....	5
圖 2-5 身體旋轉軸示意圖 .....	5
圖 2-6 Kutta-Joukowski 定理示意圖 .....	8
圖 2-7 直接振翅示意圖 .....	10
圖 2-8 豆娘身體部位名稱 .....	10
圖 3-1 研究方法架構圖 .....	15
圖 3-2 豆娘身體參數示意圖 .....	15
圖 3-3 中華珈瓏(上)，細胸珈瓏褐翅型(下左)，細胸珈瓏透翅型(下右).....	18
圖 3-4 動作觀測與流場可視化實驗架設圖 .....	19
圖 3-4 實驗設備配置圖 .....	19
圖 3-5 實驗設備：雷射、柱狀透鏡以及觀測箱 .....	20
圖 3-6 特徵點描述圖 .....	21
圖 3-7 Matlab 軌跡擷取程式介面 .....	21
圖 3-8 PIV 原理 .....	22
圖 3-9 phantom v7.3 外觀及規格 .....	23
圖 3-10 高功率雷射規格外觀及規格 .....	23
圖 3-11 壓電仿生拍撲機構示意圖 .....	24
圖 3-12 雙頻道訊號產生器 .....	24
圖 3-13 小型壓電放大器及其規格 .....	25



圖 3-14 可調式壓電夾具台工件圖.....	25 -
圖 3-15 相位驗證流場實驗圖.....	25 -
圖 4-1 切入速度與加速度定義圖 .....	28 -
圖 4-2 史卓荷數與雷諾數分布圖 .....	31 -
圖 4-3 頭部加速度與雷諾數分布圖 .....	31 -
圖 4-4 豆娘飛行分解動作比較圖... ..	32 -
圖 4-5 拍翅平面角度調控示意圖 .....	35 -
圖 4-6 攻角比較圖 .....	36 -
圖 4-7 攻角示意圖 .....	36 -
圖 4-8 轉彎策略示意圖 .....	38 -
圖 4-9 前飛渦旋時序變化圖 .....	40 -
圖 4-10 翼後方射流方向變化圖 .....	41 -
圖 4-11 急迴旋上下拍轉換渦旋時序變化圖 .....	41 -
圖 4-12 $t/T=0.44\sim 0.64$ 穩定前飛 $Re=720$ 速度場與渦度場疊合圖.....	42 -
圖 4-13 $t/T=0.64\sim 0.88$ 穩定前飛 $Re=720$ 速度場與渦度場疊合圖.....	43 -
圖 4-14 $t/T=0.44\sim 0.52$ 急迴旋下拍轉上拍, $Re=560$ , 速度場與渦度場疊合圖 .....	44 -
圖 4-15 $t/T=0.84\sim 0.88$ 急迴旋上拍轉下拍, $Re=420$ , 速度場與渦度場疊合圖 .....	45 -
圖 4-16 中華珈瓏與細胸珈瓏迴旋功率比較圖.....	47 -
圖 4-17 中華珈瓏與細胸珈瓏單位拍頻加速度比較圖.....	48 -

## 表目錄

表 2-1 微飛行器需求 (Pines and Borhorquez, <i>Journal of Aircraft</i> , 2006) .....	6 -
表 3-1 實驗因次列表 .....	16 -
表 4-1 急迴旋運動學參數總覽 .....	29 -
表 4-2 頻率調控資料 .....	34 -
表 4-3 身體俯仰角變化資料 .....	37 -
表 4-4 渦旋環計算參數測量值.....	46 -

## 符號說明



$A$  拍翅振幅 (m)

$a$  頭部加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$c$  翼弦長 (m)

$f$  拍翅頻率 (Hz)

$R$  旋轉半徑 (m)

$t$  時間 (s)

$T$  拍翅週期 (s)

$V$  前飛速度 (m/s)

$\psi$  拍翅平面角度 (degree)

$\mu$  黏滯係數 ( $\text{kg/m/s}$ )

$\rho$  流體密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Theta$  身體俯仰角 (degree)

$\theta$  前後翅相位 (degree)

$\omega_y$   $y$  方向渦度 ( $1/\text{s}$ )

$\Gamma$  環流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )



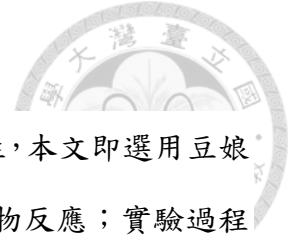
## 第一章 前言

### 1-1 研究背景與動機

仿生學是近代新興的一門科學，人類藉由觀察並模仿自然界生物的特徵、結構、運動模式以及行為等，歸納出智慧的結晶，期望對現有的科技帶來突破；從模擬蓮葉表面微結構啟發而做出的抗汙防水材質，到參考壁虎腳底奈米級纖毛而做出的超抓地力載具，這些豐碩的成果使得仿生學在工程上的應用上極具潛力。

從 1903 年萊特兄弟開啟飛行上嶄新的一頁之後，人類在飛行的科技上不斷的突破創新，其中固定翼的飛行器因為擁有載客量大且具高速巡航能力的特性而被廣泛的使用。而隨著垂直起降和高操控性的需求出現後，旋轉翼和向量推進的技術也開始被採用。然而，在近代許多精準的軍事、勘查和救災行動中，飛行器往往需要在數公尺見方的狹窄空間中，以有限的能源進行高難度、低雷諾數的操控性飛行，於是一種微小飛行器(micro air vehicle, MAV)的需求由此產生。在這樣的尺度之下，大自然界已存在許多優異的飛行家，包含鳥類、昆蟲以及一些哺乳類動物；牠們絕大多數採用拍撲飛行，這種飛行模式在低雷諾數的狀況下，不會有傳統飛行器的失速問題，可以產生足夠支撐自己體重的升力和強勁的推進力，還可以依照不同飛行需求主動改變翼面拍撲方向與力道，種種優異的空氣動力學特性是傳統飛行模式望塵莫及的。

蜻蜓因為其微小的尺寸，並在飛行上具有高度的功率質量比(power-to-mass ratio)、敏捷的操控性與高飛行速度，近年來獲得了許多研究團隊的重視和投入。蜻蜓可以藉由調整兩對翅膀的拍翅頻率、拍翅相位以及攻角進行靈活的飛行操控，其自由度是單對拍翅生物無法達到的，而同樣屬於蜻蛉目的豆娘，雖然飛行速度較蜻蜓為低，其異於蜻蜓的拍撲模式同樣具有高超的飛行能力，其中包含了可以產生高升力的擊翅與揮動(clap and fling)機制(Rudolph,1976)，以及在起飛時高度的單位肌肉質量升力(muscle-mass-specific lift; Marden,1987)。再者，目前已有關於豆娘自由前飛的生物學以及空氣動力學的探討(Sato *et al.*, 1997)，在單位拍



撲週期下的速度和加速度甚至勝過蜻蜓(Wakeling,1997)。

為了探究上述所提到的生物學優勢是否可以帶來更高操控性，本文即選用豆娘作為研究對象，再進一步利用人造的狹小空間迫使豆娘對障礙物反應；實驗過程中發現豆娘會利用俯轉(pitch turn)迴避前方障礙物，相對於固定翼飛行器一般採用之側轉(yaw turn)與滾轉(pitch turn)機制有動作上明顯的不同，同時，採用此種迴旋機制會使得來流速度瞬間下降，對於依賴來流速度產生升力之固定翼飛行器而言是幾乎不可行的。

## 1-2 研究目的

因此本文建立在豆娘之飛行特色以及俯轉機制的好奇，利用高速攝影機與二維PIV技術觀察豆娘在狹窄空間中急停迴旋之動作，找出運動學參數變化對於迴旋效果之影響，以及豆娘雙翅和流場渦旋互動之特色對於穩定飛行與迴旋操控所帶來之益處，期望能在日後能根據本研究使微飛行器(MAV)更具有操控性和節能性。

## 第二章 文獻回顧

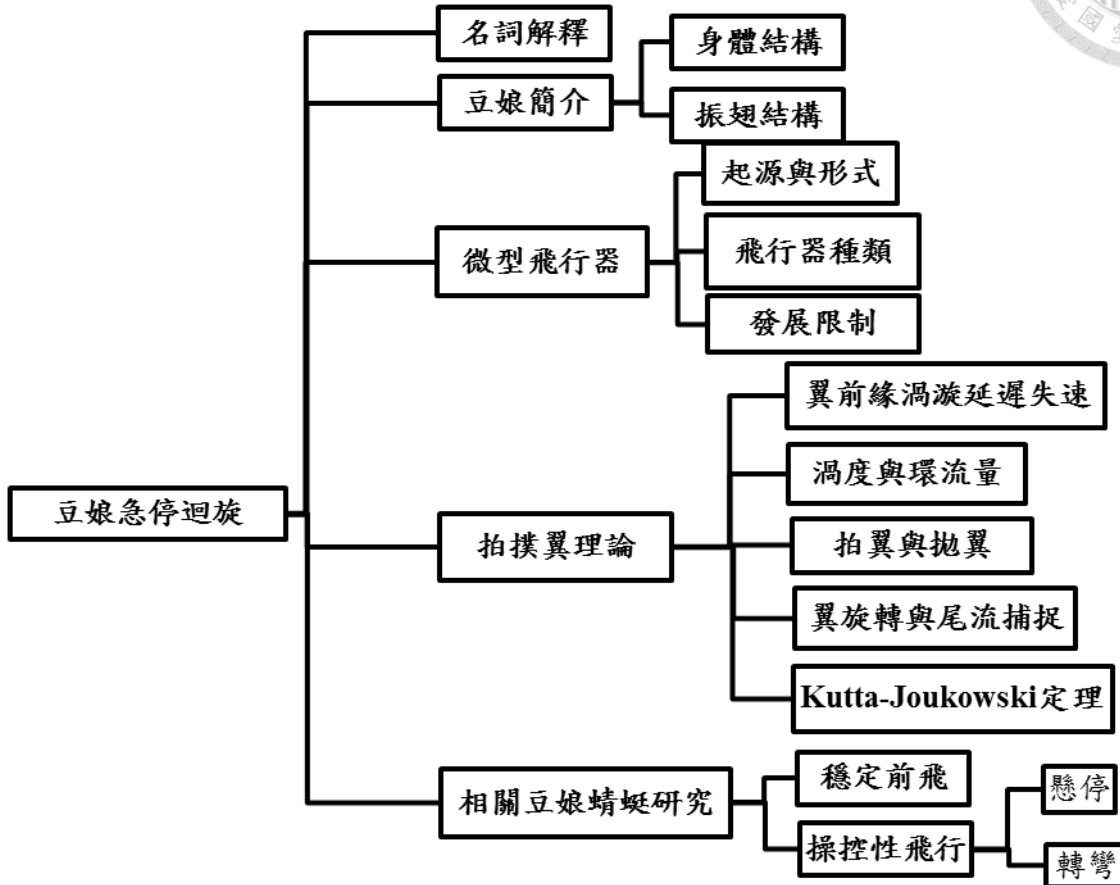


圖 2-1 文獻回顧架構圖

### 2-1 名詞解釋

圖 2-1 為豆娘的上視圖，翅膀的根部稱為 wing base，翅膀的尖端稱為 tip；翼尖到翼尖的距離稱為翼展 span，由翼前緣(leading edge)至翼後緣(trailing edge)的距離稱為弦長(chord length)。

圖 2-2 為翼的側視圖，翼面與來流速度  $U$  的夾角稱為攻角(angle of attack,  $\alpha$ )，考慮下洗速度(downwash velocity) $U'$ 後的攻角稱為(aerodynamic angle of attack,  $\alpha'$ )

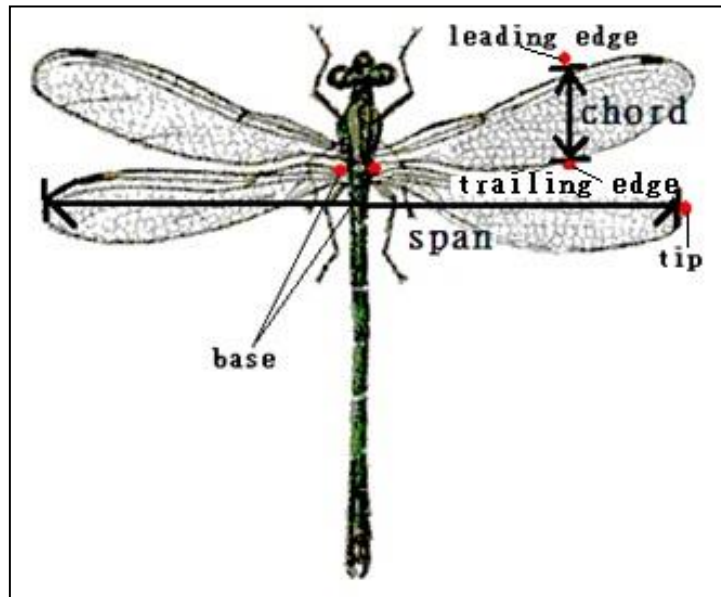


圖 2-2 豆娘身體空氣動力學名詞定義

圖 2-3 呈現了昆蟲一個拍撲週期的軌跡，其中朝向腹部拍翅的動作稱為下拍 (downstroke)，朝向背部拍翅的動作稱為上拍 (upstroke)，由上拍轉下拍的轉換稱為仰轉 (pronation)，反之則稱為俯轉 (supination)。

本文專注探討昆蟲的俯仰轉彎，圖 2-4 定義了三個方向的旋轉，包含了以身體長軸為旋轉軸的滾轉 (roll)、以通過質心之旋轉軸旋轉的偏航 (yaw) 以及和翼展方向為轉軸的俯仰 (pitch)。

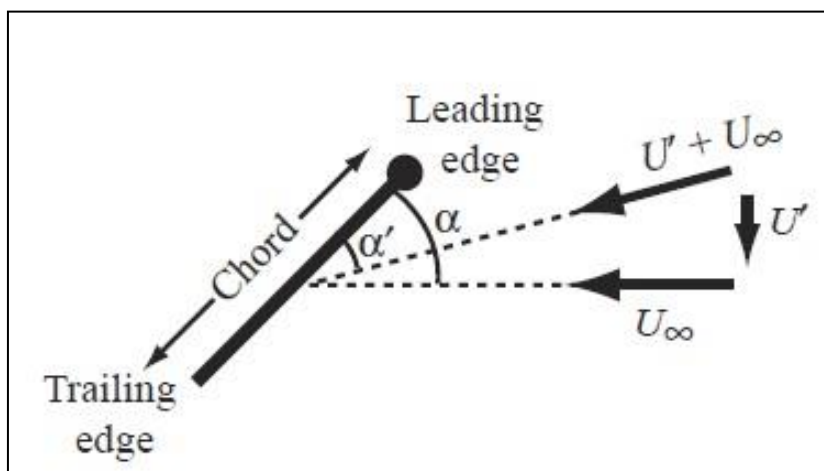


圖 2-3 機翼相關參數定義

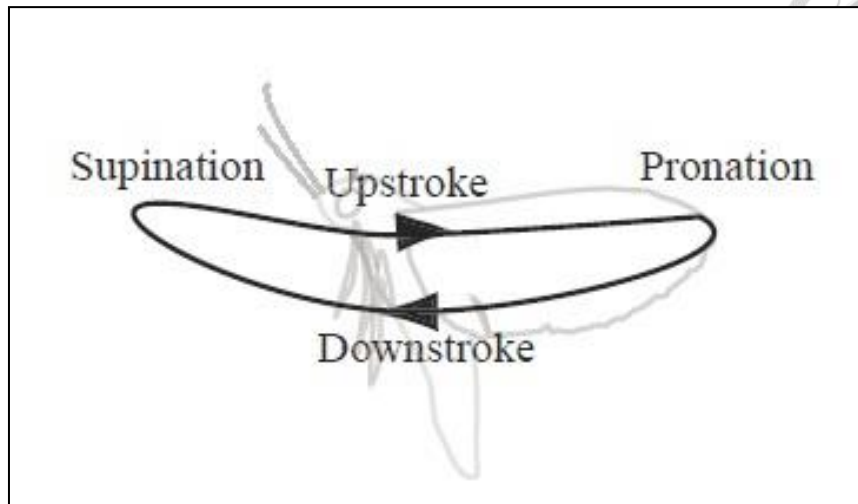


圖 2-4 上下拍名詞定義

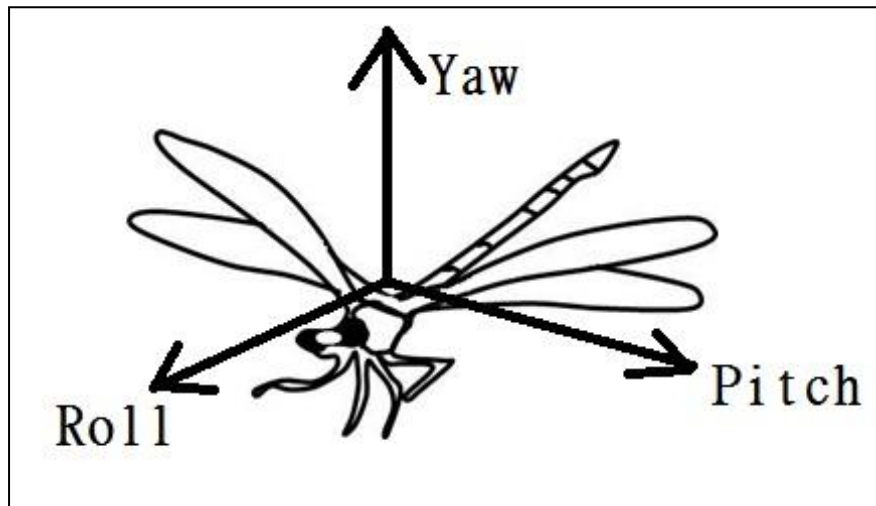


圖 2-5 身體旋轉軸示意圖

## 2-2 微飛行器

### 2-2.1 起源與形式

微飛行器的概念從無人載具(UAV)的需求衍生而來，1997 年首先由美國國防部高等研究計畫局(U. S. Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出，目的是要製造出一種在軍事上以及偵查能力上，符合現代戰場需求的新型飛行器，其主要需求包含：

- 一、飛行速度大約在 30~60 公里，操作雷諾數約在  $10^4 \sim 10^5$  (Shyy,1999)
- 二、尺寸極小，翼展長小於 15 公分 (Shyy,1999)



三、具有良好的操控性，可以在建築物或障礙物之間飛行

表 2-1 是微飛行器的詳細需求：

表 2-1 微飛行器需求 (Pines and Borhorquez, *Journal of Aircraft*, 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 <sup>-1</sup>	Maximum flight speed
Payload	20 g	Mission dependent
Cost	\$ 1500	Maximum cost

## 2-2.2 飛行器的種類

在微型飛行器的需求之下，我們考慮目前飛行器的特性，有以下三種分類：

### (1) 固定翼飛行器

固定飛行器的飛行原理是以渦輪引擎提供推進力，並利用流體在機翼上下兩側流速的差異來提供穩定的升力，其優勢在於飛行速度高、酬載量大，現代的民航機即採用此種形式。然而固定翼飛行器需要很長的起飛距離以及很高的起飛速度，也無法進行靈活的操控性飛行如急轉彎、懸停以及垂直起降(vertical take-off and landing, VTOL)。

### (2) 旋轉翼飛行器

旋轉翼飛行器可說是為了定翼飛行器的飛行原理是將傳統固定翼的機翼經過調整後，以高速旋轉的主軸帶動，可以直接在發動後提供飛行器足夠的升力，不需跑道；也能藉由改變主旋轉軸角度進行飛行方向的控制，增加操控的靈活度，常見的例子為直升機。然而這種飛行模式的限制包含耗油量高、飛行效率低以及平均飛行速度較低。



### (3) 拍撲翼飛行器

拍撲翼飛行器的概念從達文西(1452~1519)的時代就已經被提出，仿效了大自然生物飛行的模式，利用來回拍動翅膀並改變拍動的方向、攻角、振幅和頻率等等，靈活地調控所需要的升力和推進力，種種優良的空氣動力學特性和操控性使得人類不斷地嘗試去模仿、製作各種類型的拍撲翼飛行器，期望能真正毫無拘束地在天空中飛翔。

#### 2-2.3 微型飛行器的發展困境

在微小和輕量化的設定下，微型飛行器也有設計上的難題，包含了操控性問題：如何設計撲翼的形式、動作來達成各種飛行動作？以及動力來源的問題：如何利用有限的能源達到最大的飛行效率，達成穩定的操作？這需要從流體力學和空氣動力學的角度切入。

### 2-3 拍撲翼飛行機制

本節承接上節討論拍撲翼設計的困境，詳述目前在拍撲翼飛行相關的理論，由重要的物理量出發，接著討論傳統定理的限制，最後會引入近期可靠的理論。

#### 2-3.1 渦度與環流量

渦度(vorticity)在飛行相關的研究中是一個重要的物理量，它代表了流場中流體旋轉的程度，數學上即為速度場的旋度(curl)，定義如下式

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} \quad (2-1)$$

其範圍是局部性的；而環流量(circulation)即是將速度場對於一個封閉的路徑做線積分，可以得到流體一個區域性的旋轉程度，環流量定義如下

$$\Gamma = \oint_D \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad (2-2)$$

兩者之間的關係可以利用 Stokes Theory 連結。



$$\Gamma = \oint_C \vec{V} \cdot d\vec{s} = \iiint_D (\nabla \times \vec{V}) \cdot d\vec{A} = \iiint_D \vec{\omega} \cdot d\vec{A} \quad (2-3)$$

### 2-3.2 Kutta-Joukowski 定理

此理論說明了傳統固定式機翼在黏性、穩態、不可壓縮的情況下產生升力的物理機制，關係式如下

$$L = \rho U \Gamma \quad (2-4)$$

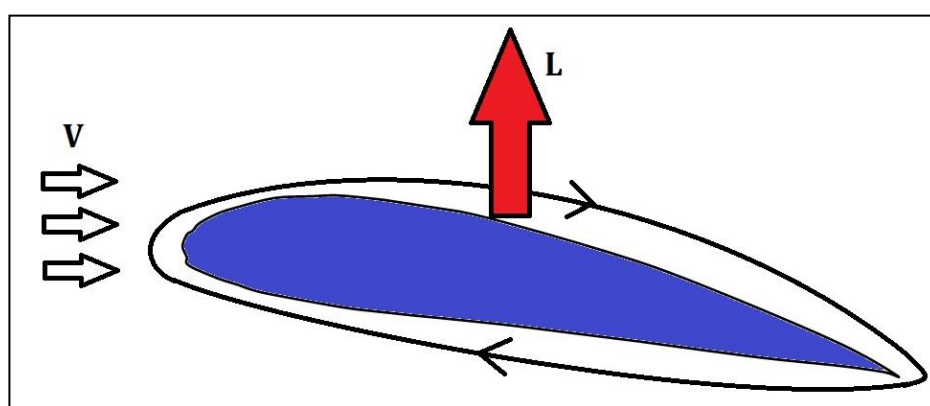


圖 2-6 Kutta-Joukowski 定理示意圖

其中  $L$  為單位翼截面升力， $\rho$  為流體密度， $U$  為來流速度， $\Gamma$  為機翼上的環流量。值得一提的是，機翼上的環流量需要經過一暫態過程才會達到穩定值，形成束縛渦旋(bound vortex)，此時在分析上可以視為系統已達到穩態，有穩定升力產生。然而對於以高頻率往復運動的拍撲翼飛行器而言，系統呈現非穩定的狀態，必須要有更進一步的理論來描述拍撲翼產生升力與推力的機制。

### 2-3.3 翼前緣渦旋與延遲失速現象

在許多拍撲翼飛行的理論當中，最具代表性的現象即為翼前緣渦旋提供高升力的機制。在傳統定翼飛行器中，機翼會在來流中傾斜形成攻角，加強機翼上的環流量以提高升力，但通常此角度不會超過  $15^\circ$  左右。然而，生物在拍撲飛行時，往往會將翅膀以超過臨界攻角(critical angle of attack)的角度掃過流體，此時流體會因受到強大的剪應力而在翼前緣處分離而形成渦旋，在位移數個弦長內，生物

並不會失速，反而機翼上環流量的強度可以提供比穩定操作時升大的升力，直至翼前緣渦旋尺寸過大而逸散並導致失速，此現象即為延遲失速(delayed stall)。Thomas *et al.* (2004)利用煙線法將蜻蜓三維的拍撲流場結構呈現出來並利用高速攝影機拍攝，並和理論的渦旋結構做對照，更發現翼前緣渦旋的強度主要是決定於攻角的大小。

#### 2-3.4 尾流捕捉

在 Dickinson *et al.* (1999)的研究中，藉由參數化的機構，發現昆蟲在上拍和下拍模式轉換之間翅膀的運動方式對於升力的產生有極大的影響。階段 1 翅膀以高攻角下拍，形成明顯翼前緣渦旋；階段 2 翅膀加入順時針旋轉動作，尾流區有明顯射流，作用力也獲得提升；階段 3 下拍準備結束，相對速度降低，作用力降低；階段 4 上拍開始，此時翼面捕捉到前一個上拍的尾流區射流，作用力獲得提升；階段 5 達到下拍的主要階段，翼面能夠繼續利用射流來提升作用力。比較階段 2, 5 與 3, 4 可以發現相同拍撲位置下，尾流區射流的有無決定了作用力的大小。此為昆蟲回收自身能量的一個絕佳範例。

#### 2-3.5 拍翼與拋翼

Weis-Fogh (1973)年觀察了一種蜂類 (*Encarsaria formosa*)，提出了一種利用翅膀的特殊開合運動提升升力的機制，稱為拍翼與拋翼 (clap and fling)，階段 1 至階段 3 是拍翼的動作，雙翅首先向身體內側彼此靠近，產生垂直於翼面的作用力，此時升力的分量較大，直至雙翅幾乎碰觸時，由階段 2 可看出升力的分量持續減少，然而在階段 3 時，雙翅的翼後緣會快速地拍合在一起，產生一股向下強勁的射流，彌補了翼面升力不足的現象；到了階段 4 至 6 是拋翼的動作，此時雙翅會由翼前緣打開，以翼後緣為支點轉動，將氣流引入雙翅中間的空隙，並繼續提供向上的升力分量，過程中翼後緣的彼此貼近使得翼後緣渦旋兩兩抵銷，減弱了華格納效應(Wagner,1925)，加速了翼前緣渦旋的增長。



## 2-4 豆娘

### 2-4.1 豆娘構造簡介

豆娘在生物分類上屬於動物界(*Animalia*)節肢動物門(*Arthropoda*)昆蟲綱(*Insecta*)蜻蜓目(*Odonata*)均翅亞目(*Zygoptera*)，和一般通稱的蜻蜓最大不同之處在於，豆娘的前後翅外型大小相似，停棲時會將將翅膀豎直於背上；而蜻蜓後翅較大，停棲時雙翅攤平於背上。豆娘構造示意圖如圖 2-10。

### 2-4.2 豆娘振翅結構

昆蟲的振翅方式是依據肌肉是否與翅膀根部相連而分為直接振翅與間接振翅兩種。豆娘屬於直接振翅，透過根部兩對肌肉的收縮和舒張直接驅動翅膀的根部，達成下拍和上拍的動作，如圖 2-11 所示：

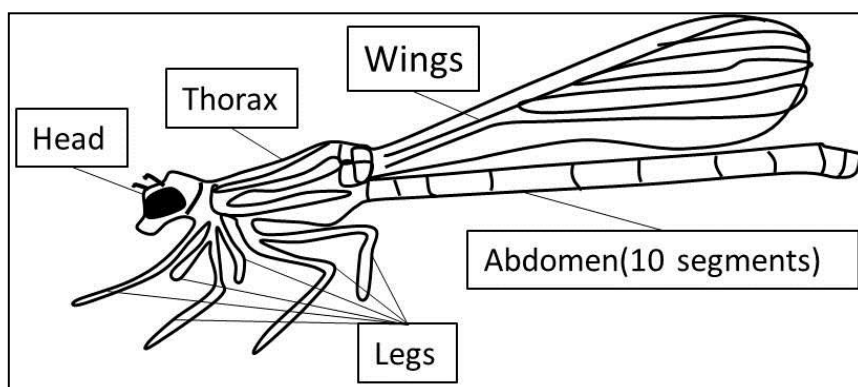


圖 2-7 豆娘身體部位名稱

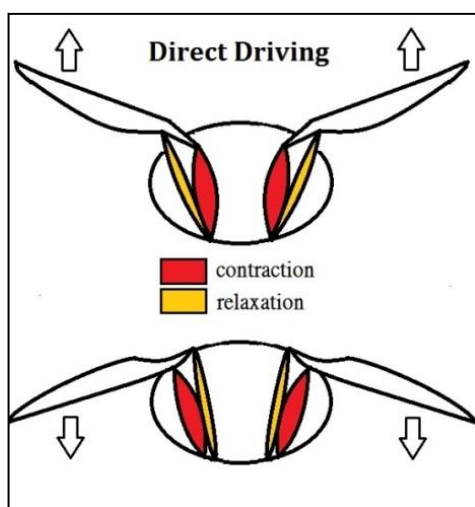


圖 2-8 直接振翅示意圖



## 2-5 蜻蜓與豆娘的飛行

### 2-5.1 穩定前飛研究

蜻蜓和豆娘敏捷的動作、多自由度的拍翅以及微小的身軀吸引了大量研究的投入，而首先面臨到的問題是：如何在他們高速的飛行下看見他們的動作？他們是如何與流體互動以展現傑出的飛行？主流的方法包含物種的直接觀測、機構模擬以及電腦模擬，其中物種的直接觀測雖然牽涉到生物動作的不穩定性與行為的多樣性，卻也能捕捉到最接近真實的狀況。近年來高速攝影技術的純熟使得此方法之可行性與可靠性大幅的提高。Pfau (1986, 1991) 經由觀察發現，相對於蜻蜓拍翅平面角度相對於身體俯仰角維持固定，豆娘有很高的拍翅自由度，而 Wakeling and Ellington (1996) 的研究中，利用高速攝影機和特定的拍攝技巧擷取了一系列蜻蜓和豆娘在自由飛行下的拍翅軌跡，並據以推算出速度、加速度，再利用準穩態分析方法，估算出飛行時兩者的升力係數和功率。結果顯示，豆娘的拍翅頻率雖然低於蜻蜓，然而一個完整拍翅週期下的速度、加速度以及推力大小都高於蜻蜓，顯示豆娘每次的拍翅都具有較好的空氣動力學效率。另外，結果也顯示蜻蜓的拍翅平面角度約在 48~50 度之間變化，然而豆娘可以在 -5 至 53 度之間變化，若是拍翅平面的角度對於受力方向的控制具有很大的影響，豆娘可視為對於升阻力方向具有較靈活的控制。

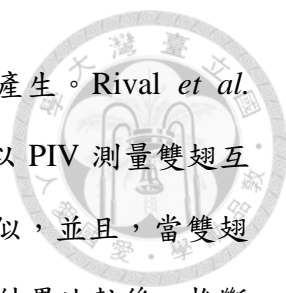
關於豆娘的觀測，Sato and Azuma (1997) 的研究中利用高速攝影機拍攝了豆娘前飛時的動作，發現其拍翅平面的傾斜程度較蜻蜓小，但其拍翅振幅卻較大，並且利用了局部環流法(local circulation method)計算了相關的升推力與功率。另外，Marden (1987) 測量並歸納了多種鳥類、哺乳類和昆蟲的起飛最大升力，發現豆娘有最高的單位肌肉質量最大升力(muscle-mass-specific lift)。這些研究顯示豆娘具有其研究的價值。



## 2-5.2 操控性飛行研究

關於豆娘與蜻蜓的研究，除了探討一般穩定前飛之外，近年來因為實驗設備的進步、新量測技巧的開發以及微飛行器高操控性的需求，昆蟲的操控性飛行也開始獲得重視。操控性飛行，相對於一般巡航飛行，是指昆蟲為了要達成特定生存目的(例如躲避天敵、求偶、交配等等)而展現的暫態飛行控制，主要包含了懸停和轉彎兩種操控。昆蟲於操控飛行時，會藉由動態地改變拍翅平面(stroke plane)角度、拍翅頻率(flapping frequency)、攻角(angle of attack)以及雙翅的相位(phase)將身體維持在空中固定的位置，其中牽涉到的參數數目以及參數間複雜的相互作用一直是生物學家、物理學家和工程師試圖去釐清的。建立在 Norberg (1975) 與 Ellington (1984) 等生物學家對於真實懸停飛行的量測基礎上，後人開始利用電腦模擬以及仿真機構去探討影響懸停飛行的關鍵運動學參數。Sun & Lan (2004) 將真實懸停的運動學參數利用電腦模擬重現，以數值方法求解簡化雙翅模型在懸停組態下的受力情況以及流場特徵，結果顯示支撐身體重量的力有 65%是來自於拍翅的阻力而僅有 35%是來自於升力，並且發現前翅和後翅的交互作用對於支撐力的提供有負面的效果。Fry *et al.* (2005) 使用高速攝影機捕捉果蠅在懸停和低速飛行的動作，利用多自由度的機構重現拍撲動作並以多軸力規量測瞬時的受力變化，驗證了昆蟲在懸停時會有特殊的拍翅軌跡，使得阻力能被利用來提供足夠升力，並發現拍翅動作除了要提供懸停的升力外，更需要維持身體俯仰動作的穩定以及限制推力的產生。

而直到近期，有一部分的研究者開始利用簡化而非完全仿真的機構進行系統化的實驗，這樣能有效降低參數的數目並和真實情況做比較。Maybury and Lehmann (2004)利用雙翅拍撲機構模擬蜻蜓在懸停下的運動，藉由改變前後翅的相位差，發現前翅的空氣動力學特性大約維持定值，然而後翅的升力在後翅領先前翅 1/4 週期的情況下有最大的提升。Jardin (2009) 鎖定非對稱懸停(asymmetric hovering)飛行，將拍翅軌跡以二維機構重現，藉由維持下拍攻角並改變上拍攻角來調整拍撲的非對稱性，探討拍翅生成渦旋和翼面之交互作用以及對於升阻力的影響，結果



顯示過度的非對稱性會減弱下拍的尾流捕捉，因而降低升力的產生。Rival *et al.* (2011) 利用雙平板二維拍撲機構去模擬蜻蜓在懸停時的動作，以 PIV 測量雙翅互動下的流場結構，發現前翅的流場結構與單翅拍撲的情況相似，並且，當雙翅以 90 度的相位拍撲時可以獲得與單翅拍撲相同的升力，與前人結果比較後，推斷主導蜻蜓拍翅的流場特徵可以用二維流場解釋。

順著相同的研究脈絡，轉彎飛行的研究也是由詳細的觀察開始。由於生物需要更大的迴旋空間進行轉彎的動作，Alexander (1986) 的研究中將蜻蜓放入風洞中，固定於基座上並使用高速攝影機拍攝，歸納出兩種不同的轉彎模式，包含了利用左右翅拍撲振幅的非對稱性以產生推力差而達成測滾轉彎(roll turn)，以及利用內側翅膀作為阻力來源以達成偏航轉彎(yaw turn)，並歸納出在高速下蜻蜓為了避免側滑(side slip)的產生，因此主要是利用轉彎幅度較小的側滾轉彎形式，而在低速或是懸停時，即可利用角度時變率較大的偏航轉彎。此研究一方面顯示蜻蜓是如何利用雙翅作為改變方向的工具，但一方面文章中也提到由於影像重疊以及轉彎時間極短的緣故，偏航轉彎的機制仍有待更詳盡的探討。而 Wang (2003) 利用了空間解析幾何(spatial analytic geometry)這種新的觀測技術和高速攝影機精確地擷取了蜻蜓在前飛和轉彎時的運動學參數，並將其直線運動和旋轉運動的軌跡以多項式近似，不過並沒有觀察到俯仰動作(pitch motion)的轉彎模式，也沒有著重在轉彎機制的探討。直至 Taylor (2001) 整理了昆蟲操控性飛行與各種拍翅運動學參數的關係，提到大型的果蠅會藉由調整拍翅的振幅使得合力位置向昆蟲質心後方移動，產生一個力矩以回復身體姿態(圖 2-12)，由此開始身體的俯仰角變化和操控性開始有定性的分析。Fry (2003) 整理各方文獻並以物理模型的架構提出影響昆蟲轉彎敏捷度的兩個主要參數：身體轉動慣量以及身體與翅膀的摩擦阻尼係數(frictional damping coefficient)，轉動慣量主導的系統將使操控較為費力但穩定性較高，反之則使操控省力但會引入不穩定性。而 Ristroph *et al.* (2013) 在最近藉由觀測果蠅低速的飛行，探討了果蠅在懸停時的穩定性，特別提到了低速飛行或懸停而呈現垂直姿態的果蠅會利用拍翅阻力當成恢復力，使身體傾角穩定，雖然豆娘在

低速飛行或懸停時身體反而維持水平，此文章的觀點賦予了俯仰角度變化更深一層的意義。

以上文獻討論了身體轉彎機制以及身體俯仰姿態的調控，在本文中所探討的急迴旋機制將會牽涉到上述兩種現象。

而直至近幾年智慧材料(smart material)的興起，壓電材料(piezoelectric material)在各領域的應用受到重視。壓電材料是一種可將電能和機械能互相轉換的多用途材料，廣泛的運用在力感測器以及小型驅動，具有體積小、靈敏度高以及功率重量比高等等優良特性。近期開始有團隊以壓電片驅動薄型翅膀以模仿昆蟲拍撲動態，改良了以往利用大型馬達驅動造成重量過重的缺點。Chung (2008)利用並聯雙壓電片模擬拍翅生物的拍擊(flapping)與扭轉(twisting)兩個自由度的拍撲動作；Hu (2011)將根部固定的壓電片在特定的振幅、頻率下模擬昆蟲拍翅的動作，並利用PIV拍攝不同翼截面下的尾流場，發現在50%翼展長之處主要是產生阻力，然而75%和100%翼展長之有明顯逆卡門渦旋射流，是提供主要推力的部分。雖然目前壓電機構應用於拍撲實驗的文獻不多，但不啻是一個新的實驗方向。

前人在蜻蜓和豆娘的研究上大多專注在前飛或懸停等準穩態的分析，而對於操控性飛行中的轉彎機制，目前研究多注重側轉與滾轉的拍撲力學機制，少有探討以身體俯仰作為轉向方式的研究。本文由實驗實際觀察豆娘在俯仰轉彎時的姿態和特色並獲得運動學參數，再佐以流場分析和壓電片實作，期望在雙翅微型生物的操控性飛行上開啟新的一頁。



### 第三章 研究方法

本研究選用台灣常見的豆娘(中華珈璽及細胸珈璽)作為觀測對象，由因次分析出發，找出影響豆娘急停轉彎的關鍵參數，在動作分析部分，以高速攝影機觀察豆娘進行迴轉時的動作，找出重要的運動學參數，接著使用粒子影像測速法計算出暫態飛行時的速度場與渦度場，配合動作參數歸納出豆娘產生轉彎的力學機制，其中加入電腦動作模擬以加強二維流場量測對於作用力計算之不足之處，最後以壓電片驗證雙翅拍撲相位差對於推進力的影響。

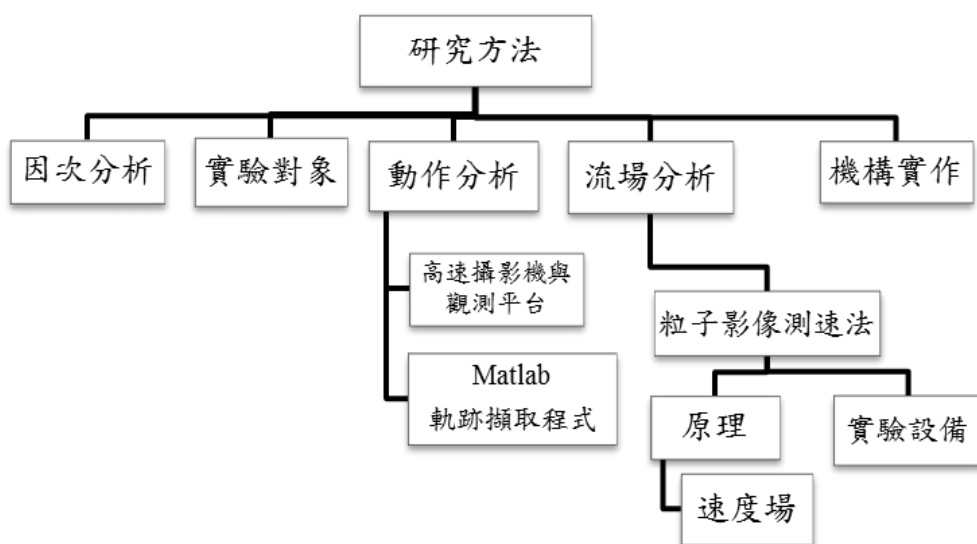


圖 3-1 研究方法架構圖

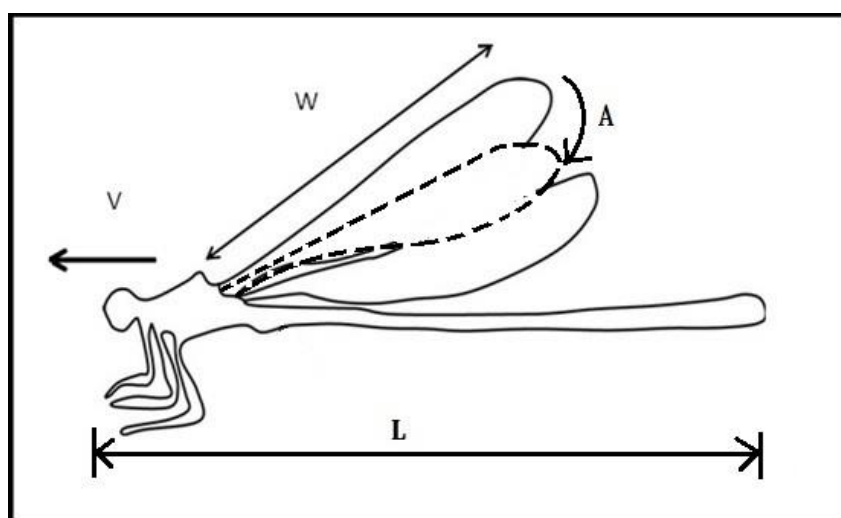


圖 3-2 豆娘身體參數示意圖



### 3-1 實驗參數與因次分析

本研究並無統御方程式可作為一般解，因此以下歸納出與本實驗相關的物理參數，並利用因次分析理論找出重要的無因次項以進行有效率的分析。

表 3-1 實驗因次列表

參數	符號	單位	因次	參數	符號	單位	因次
豆娘質量	$m$	kg	M	橫向飛行速度	$V$	m/s	$LT^{-1}$
翼弦長	$c$	m	L	拍翅頻率	$f$	Hz	$T^{-1}$
身長	$L$	m	L	飛行攻角	$\alpha$	rad	0
相位差	$\theta$	rad	0	流體密度	$\rho$	$kg/m^3$	$ML^{-3}$
拍翅振幅角	$\phi$	rad	0	重力	$G$	$m/s^2$	$LT^{-2}$
流體黏滯係數	$\mu$	kg/m/s	$ML^{-1}T^{-1}$				

利用白金漢  $\pi$  理論，我們可以依照以下步驟找出重要的無因次參數。首先，將整個實驗系統內的設定參數以函數關係式表達

$$L = f(m, c, \theta, V, \phi, f, \alpha, \mu, \rho) \quad (3-1)$$

其中，總物理參數數目  $n=10$ ，並且包含三個主要因次 M, L 以及 T，由此我們可以得知無因次項數為

$$K = 10 - 3 = \quad (3-2)$$

再來，選定  $m, W$  以及  $V$  為重複參數(repeating variables)，無因次項即可



由重複參數與其他 7 個參數分別構成

$$\Pi_i = [m]^a [c]^b [V]^c [K_i] \quad (3-3)$$

a, b, c 為待定係數

經過計算後，無因次項詳列如下：

$\pi_1 = \frac{L}{c} \quad (3-4)$	$\pi_2 = \theta \quad (3-5)$	$\pi_3 = \phi \quad (3-6)$	$\pi_4 = \frac{fc}{V} \quad (3-7)$
$\pi_5 = \alpha \quad (3-8)$	$\pi_6 = \frac{\mu c^2}{mV} \quad (3-9)$	$\pi_7 = \frac{\rho c^3}{m} \quad (3-10)$	

寫成函數形式

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0 \quad or$$

$$F\left(\frac{L}{c}, \theta, \phi, \frac{fc}{V}, \alpha, \frac{\mu c^2}{mV}, \frac{\rho c^3}{m}\right) = 0 \quad (3-11)$$

其中

$$Strouhal \ number: \quad St \equiv \frac{fc}{V}$$

$$Reynolds \ number: \quad Re \equiv \left(\frac{\mu c^2}{mV}\right)^{-1} = \left(\frac{\rho Vc}{\mu}\right)$$

史卓荷數(Strouhal number)的定義為流場中非定常力(unsteady force)的相對強度，一般而言，拍撲生物的史卓荷數會介於 0.2 至 0.4 之間以達到良好的飛行效率 (Taylor *et al.*, 2003)。在本文中，豆娘拍翅頻率會因應不同動作需求做改變，這將會影響到整體飛行的效率。雷諾數的定義為流場中慣性力和黏滯力的比值，一般豆娘飛行的雷諾數介於  $10^2 \sim 10^3$ ，屬於黏滯力作用強的區間。

### 3-2 實驗對象

本研究採用台灣常見的中華珈璽以及細胸珈璽，前者活躍期間大約是每年的 6~11 月，後者則為 3~5 月。兩者的習性及拍翅運動極為接近，明顯的差異為：中華珈璽翅膀尖端區域有黑色面積覆蓋，使得觀測上較為容易辨認翅膀的位置以及

姿態，而細胸珈璫體型和翅形較小，但在狹窄的空間中有較高的機動性；同時選用兩個物種一方面可以延長實驗時間，另一面，可以單純由體型此參數上進行探討。本文中所捕捉的中華珈璫成蟲體長約在 6.5 公分至 7.1 公分不等，細胸珈璫由於具有兩種型態，體型由 5 公分至 6 公分不等；中華珈璫翅膀根部到翅尖距離約為 4.3 至 4.4 公分，細胸珈璫則為 3.4 至 3.8 公分不等。



圖 3-3 中華珈璫(上)，細胸珈璫褐翅型(下左)，細胸珈璫透翅型(下右)



### 3-3 動作分析

#### 3-3.1 觀測平台與高速攝影機

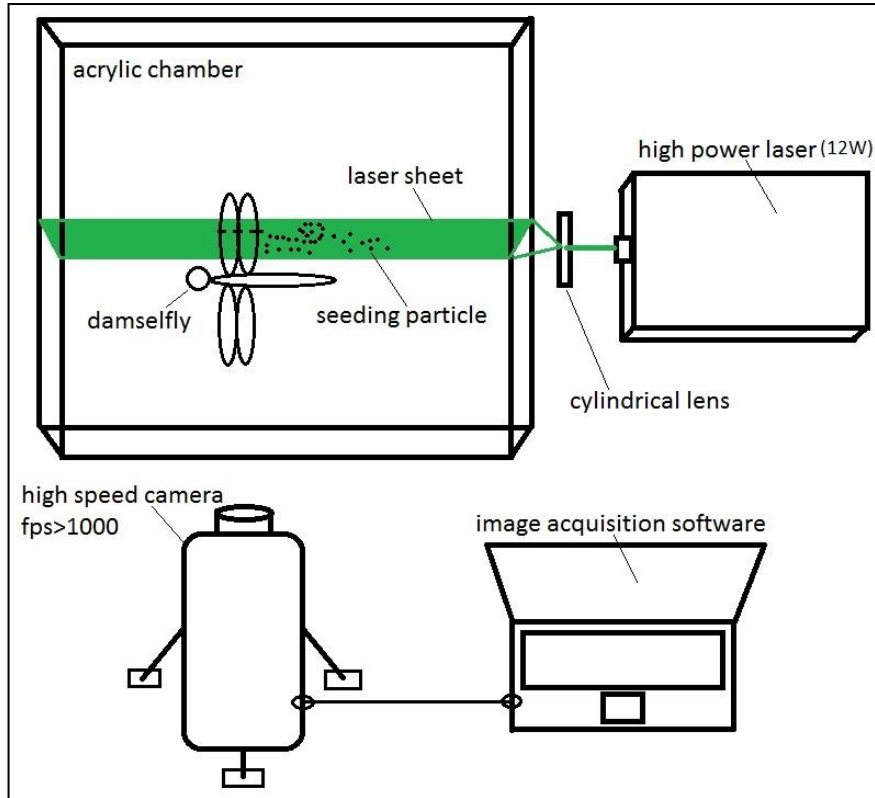


圖 3-4 實驗設備配置圖

圖 3-4 為觀測平台與攝影機的相關配置，圖 3-5 為實物照片。透明觀測平台可以讓豆娘在其中自由飛行，本實驗共計使用三種大小，包含小型( $35 \times 35 \times 35 \text{ cm}^3$ )，直長型( $55 \times 55 \times 120 \text{ cm}^3$ )以及橫寬型( $80 \times 35 \times 60 \text{ cm}^3$ )，其中小型和直長型的空間搭配體型較大的中華珈瓏，使得豆娘在其中較低的飛行速度，而橫寬型的空間搭配體型較小的細胸珈瓏，觀察發現其平均飛行速度有顯著的提升。由於空間的限制，豆娘必須經常進行迴轉、倒飛等動作以避開牆壁，因此，觀測本文所探討的操控性飛行現象反而較一般的風洞容易。本研究採用 Phantom 公司的 v7.3 高速攝影機，與電腦連結後，透過影像擷取軟體 Phantom Camera Control (PCC)去捕捉豆娘高速飛行下的動作，其取像率(frame rate)為 1000 Hz，設定解析度為  $800 \times 600 \text{ pixels}$ ，詳細規格如圖 3-9 所示。

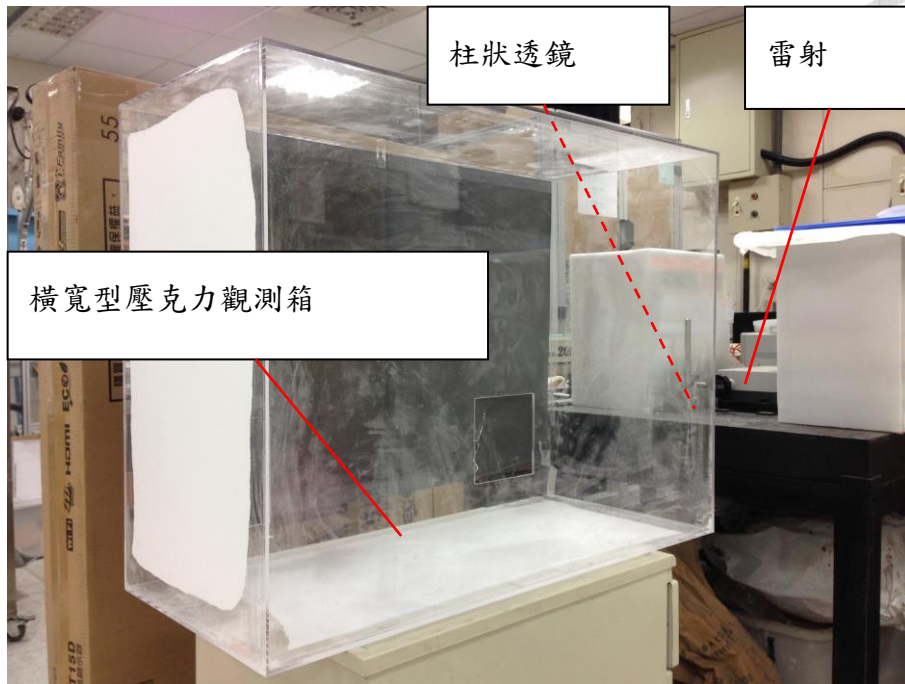


圖 3-5 實驗設備：雷射、柱狀透鏡以及觀測箱

### 3-3.2 分析方法

高速攝影機擷取的影像會被儲存成照片，利用實驗室自行研發的 Matlab 影像處理程式(圖 3-7)可針對豆娘身體上的特徵點進行追蹤，以得到完整的運動學參數。本研究選定頭部、尾部、前翅翼尖、後翅翼尖共四個特徵點(圖 3-6)，其中頭部和尾部連線中點可作為質心的參考點，可用來分析質心的速度/角速度變化；頭部和尾部連線與水平之夾角可作為身體俯仰角，前後翅翼尖的位移可計算翼尖速度(wing tip velocity)、拍翅頻率以及前後翅相位等等重要的運動學參數。

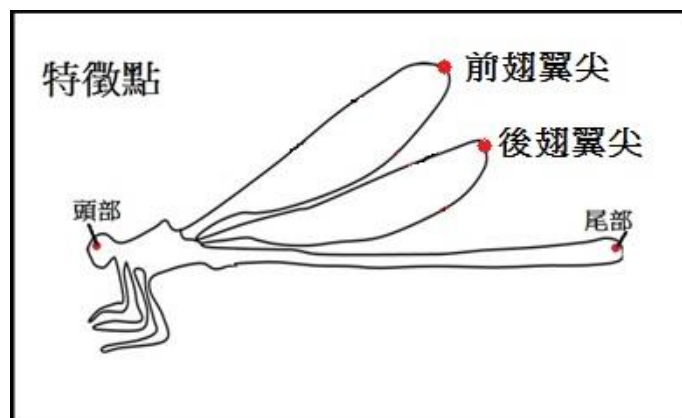


圖 3-6 特徵點描述圖

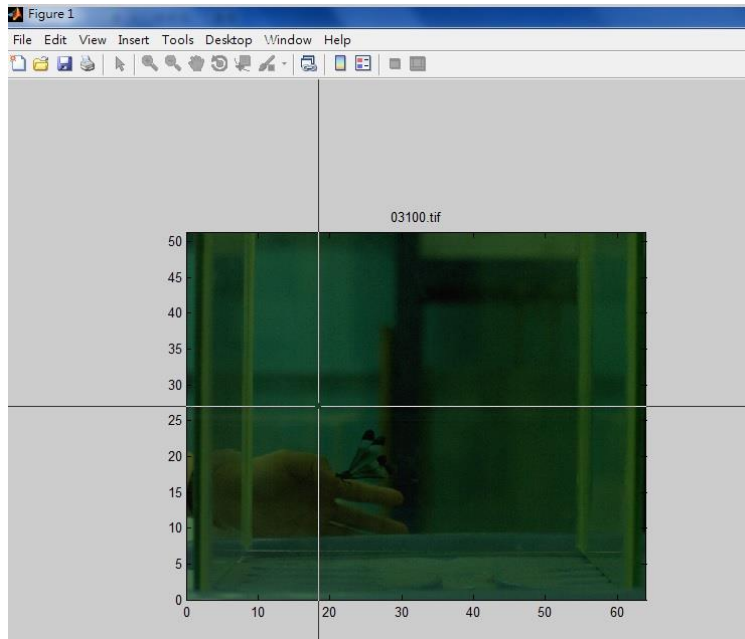


圖 3-7 Matlab 軌跡擷取程式介面

### 3-4 流場分析

#### 3-4.1 粒子影像測速法原理

粒子影像測速法是一種藉由示蹤粒子(seeding particle)將二維流場可視化，再利用高速攝影機拍攝粒子之瞬時位移以估算流體速度的技術，近年來因為其準確以及非侵入性的特色，廣泛的被用於生物流場的量測，其詳細原理如下：

$$u_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{M \cdot \Delta t} \quad (3-12)$$

其中  $\Delta t$  為兩張照片的時間差，可以直接由攝影機的設定取像率(frame rate)得到； $M$  則是鏡組的放大倍率， $\Delta x$  是利用統計方法所算出來的粒子位移。

為了要在混亂的流場中定義各個粒子的位移  $\Delta x$ ，此法將觀測區域分為許多小塊的判讀視窗(interrogation window)，而視窗內各粒子最有可能的位移量會由交相關函數(cross correlation function)決定

$$R(m, n) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_1(x, y) f_2(x+m, y+n)]}{\left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_1(x, y)] \right\} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_2(x, y)] \right\}} \quad (3-13)$$

上式中  $m, n$  為目標的位移向量， $f_1(x, y)$  與  $f_2(x, y)$  分別代表前後影像在座標平面  $(x, y)$  的灰階值。當  $R(m, n)$  達到最大值，速度向量  $m, n$  即為所求，再將此步驟套用到所有的判讀視窗，即可建構出整個流場的速度資訊，分析流程如圖 3-6。

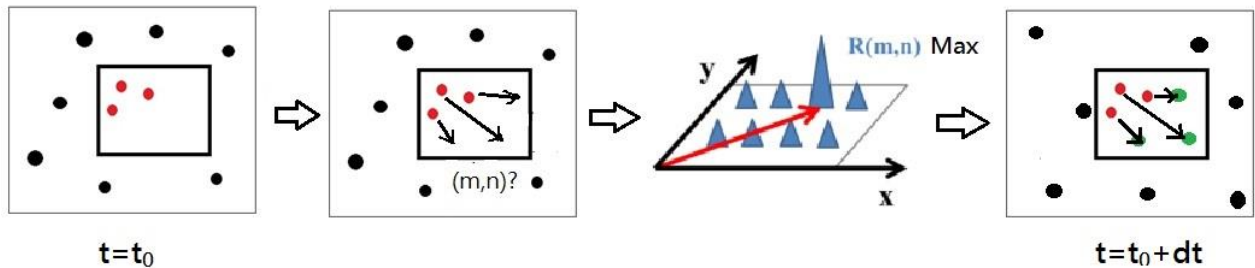


圖 3-8 PIV 原理圖示

### 3-4.2 實驗架設

實際量測時，首先在透明觀測平台(請參考 3-3.1 節)中放入實驗生物，使之習慣所處之空間，接著均勻撒佈具有高反射性、良好隨流性並且大小為  $3 \mu\text{m}$  作為示蹤粒子。再者，透過反射鏡組可將雷射光導引到觀測區域，並經由柱狀透鏡(cylindrical lens)產生一垂直的雷射光頁，雷射的來源為 lighthouse 公司所出產的 Sprout-G 高功率雷射，其規格如圖 3-10。最後利用 Phantom 公司所出產的 v7.3 黑白高速攝影機(圖 3-10)，以 1000 fps 的取像率、 $800 \times 600$  的解析度，拍攝生物飛行擾動後示蹤粒子的運動情形，進而得知流場結構。

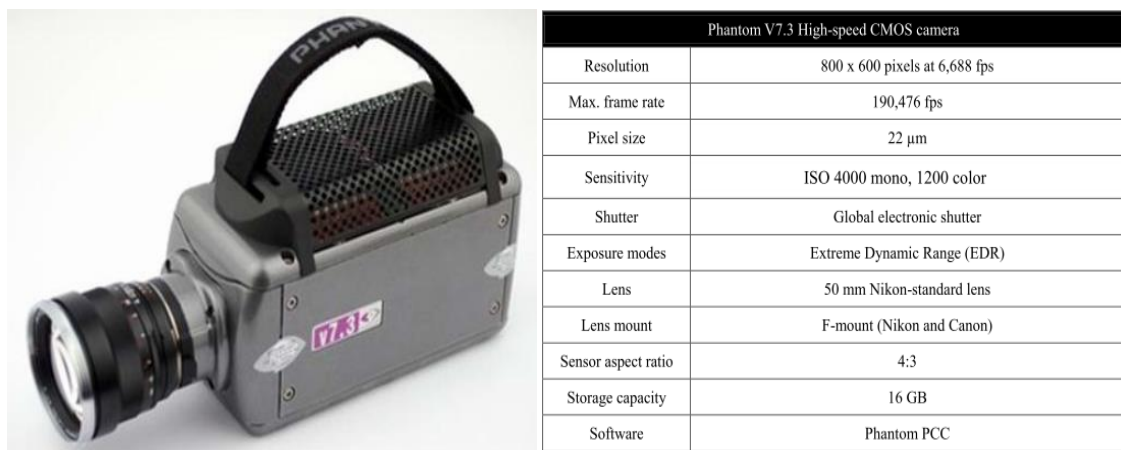


圖 3-9 Phantom v7.3 外觀及規格



LIGHTHOUSE Sprout-G	
Average output power	> 12 W
Wavelength	532 nm
Beam diameter	2.3 mm ± 10%
Beam divergence	< 0.5 mrad
Operating voltage	100-240 VAC, 50 Hz/60 Hz
Power consumption	600 W max, 350 W typical
Operating temperature	64-90°F (18-32°C)

圖 3-10 高功率雷射規格外觀及規格

### 3-5 機構實作

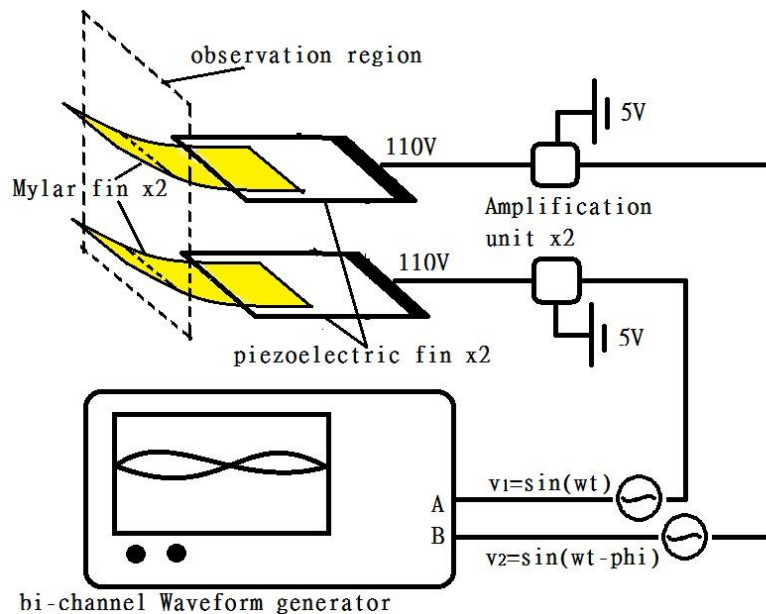


圖 3-11 壓電仿生拍撲機構連接示意圖

本研究由實驗出發，但仍期望能藉由可控制之機構驗證雙翅拍撲下運動學參數對於尾流的變化，而無論是尺寸或重量都接近昆蟲之壓電材料上圖 3-11 呈現，藉由一個雙頻道的波形產生器(圖 3-14)調控輸出正弦波的頻率和相位，輸出後，因訊號電壓僅 5 伏特，仍需分別經過兩個微型放大器(圖 3-15)將電壓提升至 100 伏特後驅動壓電片。其中壓電片上方所黏附的麥拉片具有放大振幅的功能，是實際在

流體中拍撲並產生速度場和作用力的憑藉，其外形也可以依不同生物之翅膀弦長大小及形狀被切割成理想形狀。夾具設計部分，考量生物在拍翅時可自由調整(1)雙翅之攻角、(2)根部間距、(3)根部夾角，因此自行利用 solidworks 繪製具有三自由度之可調式夾具台，由廠商外包以輕質之鋁材製作，如圖 3-14，底部為抑制震動之配重，上方所標之 A 軸可在 yz 平面自由轉動，可以調控雙翅相對於來流之夾角，B 軸可在 xy 平面有 180°之轉動，調控雙壓電片之間距，最後 C 軸則是在一定的間距下進一步改變雙壓電片的夾角。

綜合上述可調控之參數，若是要將壓電片拍撲之無因次參數群控制在豆娘(和蜻蜓)之範圍內，仍需來流速度之控制，因此預計將夾具固定在皮帶輪滑台上以伺服馬達控制其速度。

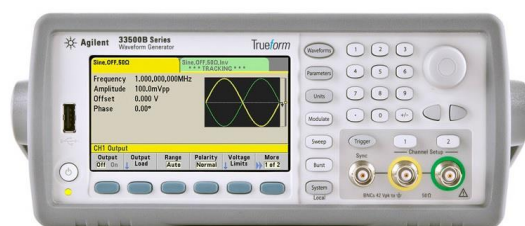


圖 3-12 雙頻道訊號產生器



Specifications	
Power Supply	3 V to 5.5 V
Max Unipolar Output	+100 V
Max Bipolar Output	±100 V
Av. Output Current	±15 mA
Power Bandwidth	3.2 kHz
Peak Output Current	100 mA
Signal Bandwidth	60 kHz (unloaded)
Dimensions	11.8 x 12.9 mm (0.46 x 0.51 in)
Weight	560 mg (0.018 oz)
Gain	27.5 V
Input Voltage	$V_s/2 \pm 1.8 \text{ V}$ ( $Z_{in} = 100k$ )
Input Offset	±100 mV
Load	Unlimited capacitive loads
Overload	Thermal and current overload protection
Noise	70mV RMS (270Ω + 10uF Load)
Environment	-40 to 70°C (-40 to 158°F) Non-condensing humidity
Quiescent Current	25 mA (1 mA in Shutdown)

圖 3-13 小型壓電放大器及其規格

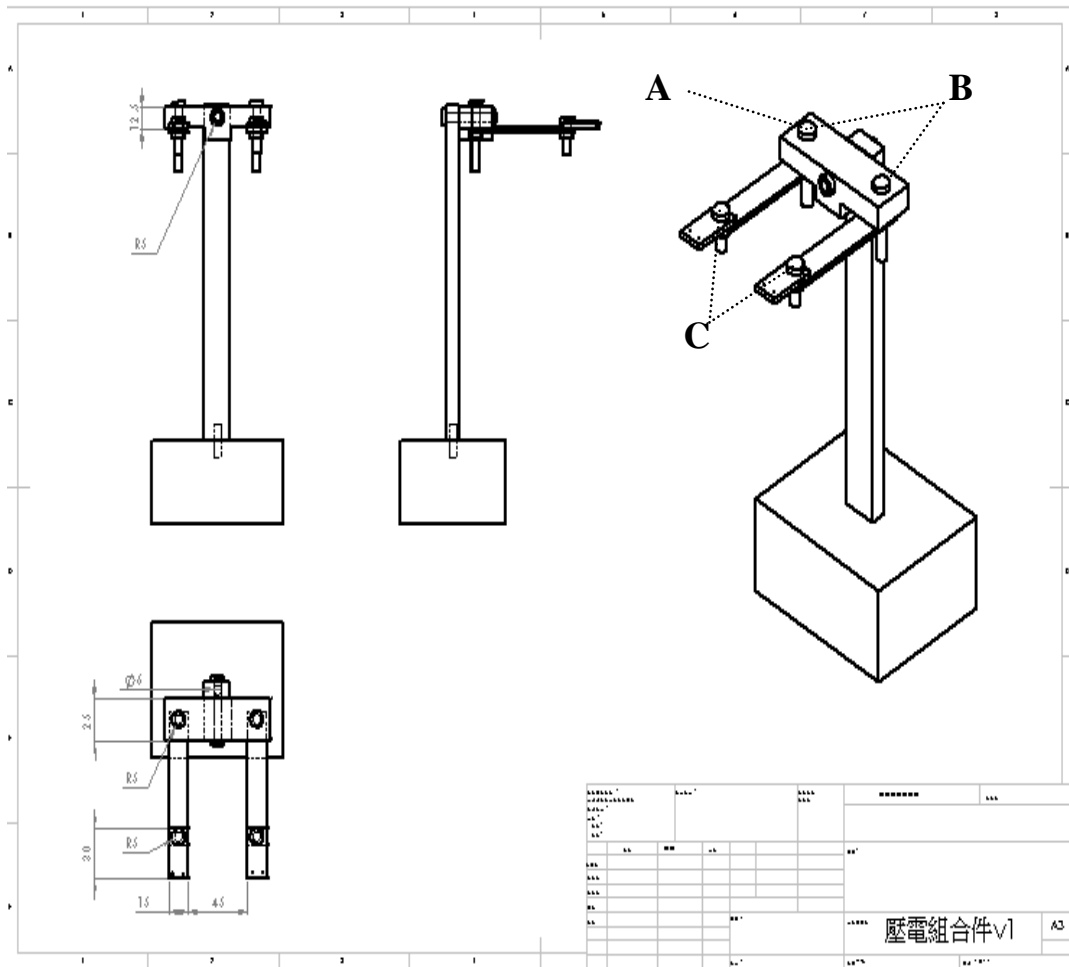


圖 3-14 可調式壓電夾具台工件圖

為了驗證接線正確並觀察流場的擾動情形，分別進行了三次無來流的流場實驗，將夾具平台放置在壓克力箱中，將雷射光頁通過壓電片末端震幅最大之處，並分別由訊號產生器分別調控相位至 30 度、60 度以及 90 度，並由高速攝影機捕捉翼尖軌跡，由圖 3-15 可知以成功達成相位調控，惟在沒有來流的情況下相位對於流場的影響不甚明顯。

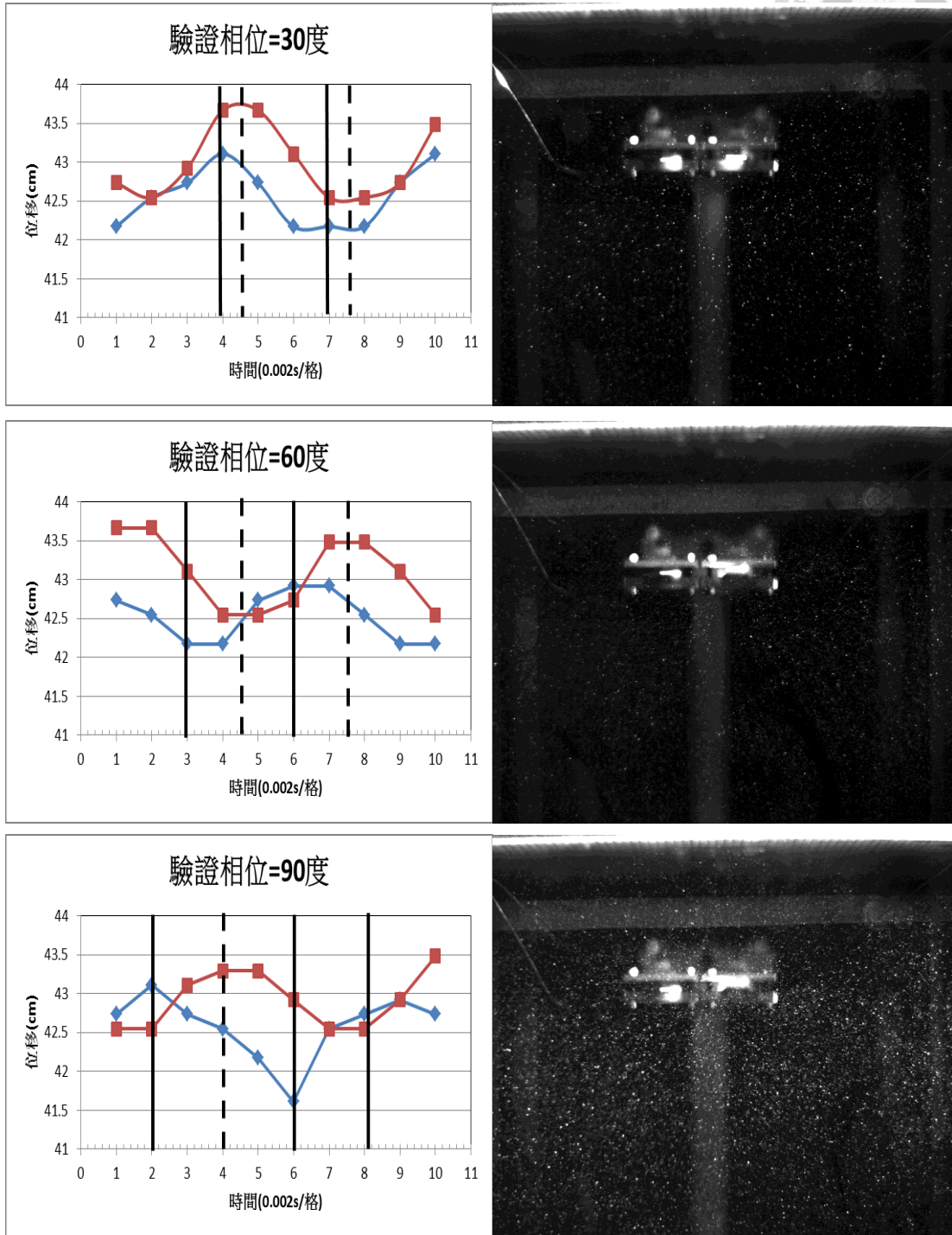
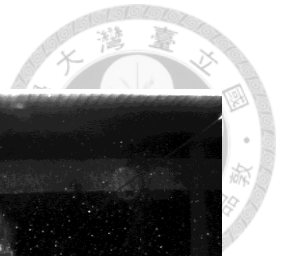


圖 3-15 相位驗證流場實驗

## 第四章 結果與討論



本章探討豆娘在遭遇前方障礙時所採用的急迴旋機制。首先探討穩定前飛與急停迴旋的動作特徵並提出兩者切換的方式，接著歸納兩種豆娘在不同雷諾數下所採用的急迴旋策略，由拍翅頻率、雙翅拍翅相位、拍翅平面角度以及相關空氣動力學參數探討影響頭部加速度的因素，並輔以二維 PIV 的流場觀測與分析，探討豆娘利用雙翅高自由度之特色進行飛行操控的期間，渦旋與雙翅的互動對於操控性的提升。

### 4-1 動作與運動學參數分析

#### 4-1.1 迴旋動作和參數定義

實驗鎖定了豆娘在觀測箱中兩種的飛行姿態，分別是由一側壁面橫向飛行至另一側壁面，速度較快的穩定前飛模式，以及豆娘在接近其中一側壁面時，藉由快速改變拍撲方式和調整身體姿態以迴避障礙同時逆轉飛行方向的急迴旋模式。

由於研究需要觀測頻繁的迴轉動作，過大的觀測區域會增加觀測難度，因此觀測箱的尺寸大小受到限制，使得豆娘無法在其中以接近野外的速度飛行。為了要具體量化觀察結果，首先定義幾個重要參數：

#### (1) 雷諾數：

在急停迴旋的運動當中，豆娘的飛行會經歷急劇的減速、停止、反向加速，本文定義豆娘進入迴旋動作時，下拍(pronation)開始前的前飛速度當作特徵速度  $V$ ，利用迴旋拍翅周期開始時的切線斜率可得開始迴旋時的前飛速度，並且以最大翼弦長  $c$  作為特徵長度，測量後發現中華珈瑯成蟲平均  $c$  值為 1.2 cm，細胸珈瑯褐翅型  $c$  值為 1.0 cm，細胸珈瑯透翅型則為 0.8 cm。



## (2) 頭部加速度：

進行前方障礙物迴避時，昆蟲視覺所在的頭部是重要的參考指標，因此將頭部的位移數據點對時間作圖，結束於頭部開始反轉的時刻  $t_{end}$  (如圖 4-1)，並將整個迴旋過程近似為一等加速度運動，可求出頭部的線加速度；此加速度顯示豆娘藉由調控拍撲運動學參數之受力變化情形。另外，本研究專注在能夠提供迴避障礙能力之水平方向加速度分量，對於垂直方向(升力方向)之加速度分量不詳細探討。

## (3) 拍撲週期(頻率)：

由觀察發現豆娘在各種不同的飛行模式中，前翅拍撲相位都有明顯的領先，因此以前翅完成一拍撲循環的時間作為拍撲週期，其倒數為拍撲頻率，而觀察發現豆娘通常可在一個拍翅週期下完成迴旋動作，這樣的週期定義為迴旋拍翅週期。

## (4) 身體俯仰角：

身體俯仰角定義為：豆娘經過一個完整的迴旋拍撲週期後，頭部前端與尾部尖端連線與水平線夾角的總角位移。

## (5) 拍翅平面角

豆娘拍翅軌跡與翅膀根部所形成的平面定義為拍翅平面，此平面與豆娘身體長軸所夾之角度稱為拍翅平面角。

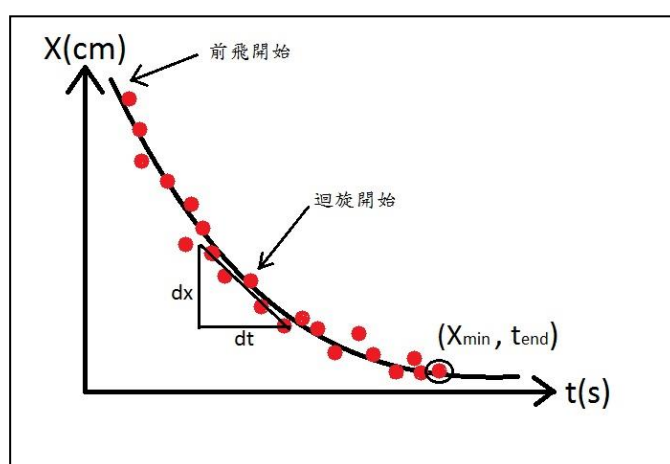


圖 4-1 切入速度與加速度定義圖

#### 4-1.2 急迴旋運動學參數總覽

表 4-1 急迴旋運動學參數總覽

參數 樣本	物種	翼弦長 (cm)	切入速度 (m/s)	雷諾數 (無因次)	迴旋 拍翅頻率 (1/s)	相位差 (度)	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	最大身體 俯仰角 (度)	史卓荷數 (無因次)
迴旋 01	細胸珈瓏	1.05	1.20	774	15.4	32	20	6	0.13
迴旋 02	細胸珈瓏	1.03	0.95	714	18.9	47	23	43	0.20
迴旋 03	細胸珈瓏	1.00	0.94	559	19.6	54	28	55	0.21
迴旋 04	細胸珈瓏	0.98	0.82	488	19.2	55	17	20	0.23
迴旋 05	細胸珈瓏	0.80	0.88	419	23.8	51	15	34	0.22
迴旋 06	細胸珈瓏	0.98	0.63	375	20.8	45	14	37	0.33
迴旋 07	細胸珈瓏	0.83	0.74	352	18.5	53	12	30	0.20
迴旋 08	細胸珈瓏	0.82	0.48	229	19.6	40	13	28	0.33
迴旋 09	細胸珈瓏	0.83	0.48	229	23.3	68	22	46	0.39
迴旋 10	細胸珈瓏	0.81	0.42	200	19.6	64	11	40	0.47
迴旋 11	細胸珈瓏	0.78	0.11	52	19.6	43	10	38	1.43
迴旋 12	中華珈瓏	1.21	0.72	514	11.6	33	16	10	0.19
迴旋 13	中華珈瓏	1.23	0.65	464	11.0	43	18	37	0.20
迴旋 14	中華珈瓏	1.22	0.45	321	12.0	59	16	10	0.32
迴旋 15	中華珈瓏	1.18	0.41	293	13.9	46	16	5	0.41
迴旋 16	中華珈瓏	1.19	0.29	204	12.2	33	12	5	0.51
迴旋 17	中華珈瓏	1.20	0.19	136	18.5	45	24	5	1.17
迴旋 18	中華珈瓏	1.18	0.17	121	15.4	66	11	5	1.09
迴旋 19	中華珈瓏	1.20	0.15	107	15.2	64	12	5	1.22

表 4-1 統整了不同雷諾數下豆娘急停迴旋的運動學參數。實驗當中每隻豆娘可能以任意速度進行穩定前飛或者以任意速度開始迴旋動作，因此表中列出之雷諾數(切入速度)是無法被控制的。中華珈璽平均拍翅頻率為 13.7 Hz，標準誤(S.E.)為 0.9，前後翅相位差為 48.6°，標準誤(S.E.)為 4.6，平均翼弦長為 1.2 cm，標準誤為 0.008；細胸珈璽平均拍翅頻率為 19.8 Hz，標準誤(S.E.)為 0.68，前後翅相位差為 50.2°，標準誤(S.E.)為 3.1，褐翅型平均翼弦長為 1.01 cm，標準誤為 0.01，透翅型平均翼弦長為 0.81 cm，標準誤為 0.009，計算方式如 4-1 式。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)}}, \quad S.E. = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4-1)$$

中華珈璽與細胸珈璽在拍翅頻率和體型上有著明顯的差異，然而若是將兩者的雷諾數與史卓荷數作圖(圖 4-2)，可以發現隨著雷諾數提高，兩物種在迴旋時的史卓荷數皆趨近於 0.2，也就是說在兩者在流場中所利用的非穩態(unsteady)機制接近；另外，將兩者的雷諾數和頭部加速度作圖，可以發現中華珈璽和細胸珈璽在相近雷諾數下兩者的加速度量值十分接近，並且兩者頭部加速度皆隨著雷諾數的增加而增加，如圖 4-3，除了 4 個較為突出的局部極端值外(詳見 4-1.4 至 4-1.7 探討)，大致上呈現一個線性的分布。以上史卓荷數與頭部加速度的比較可以歸納出兩者進行迴旋時有相同的流體操作區間並且迴旋能力相當，在急迴旋此主題下可以視為同樣的物種進行探討。

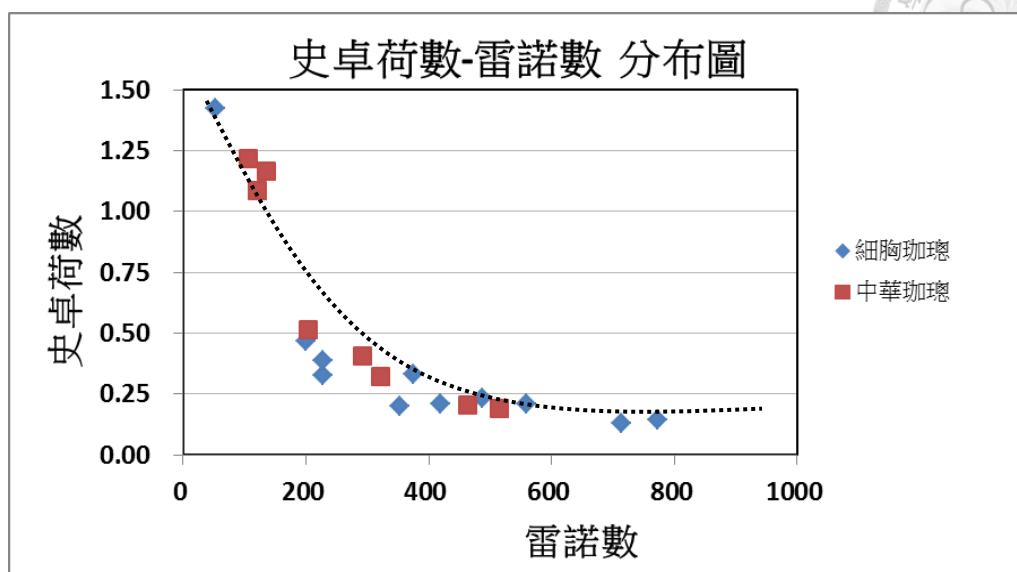


圖 4-2 史卓荷數與雷諾數分布圖

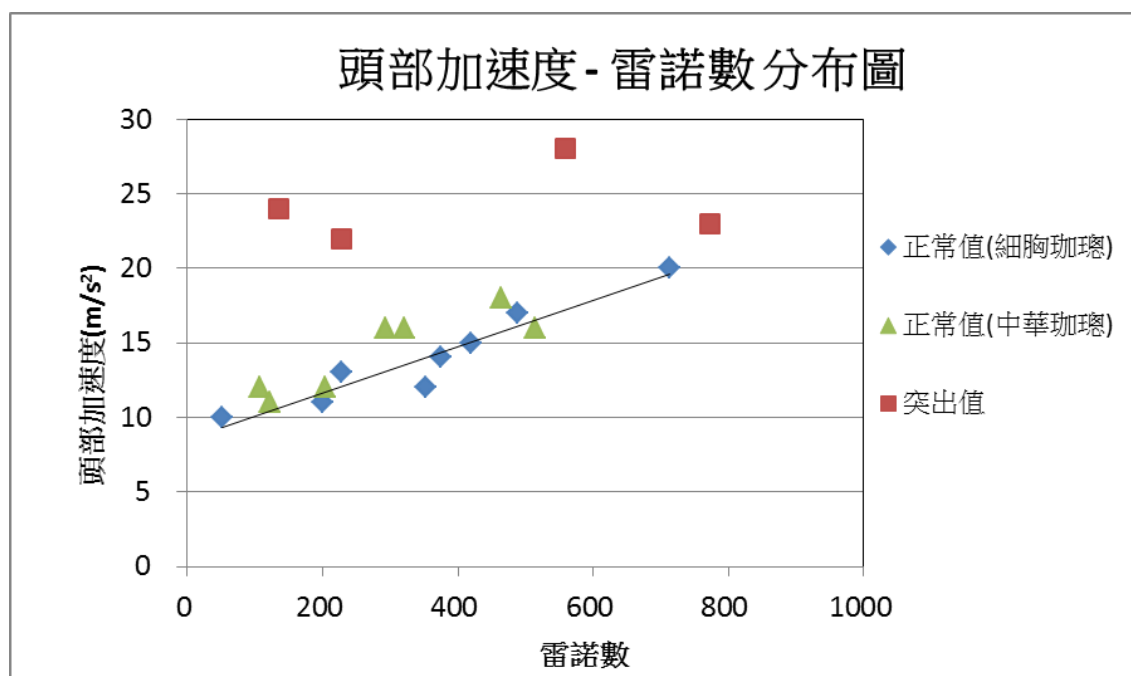


圖 4-3 頭部加速度與雷諾數分布圖



### 4-1.3 前飛和迴轉動作比較

穩定前飛	往復式 ( $Re < 300$ )	旋轉式 ( $240 < Re < 590$ )	旋轉式 ( $Re > 560$ )
$t/T=0$ 			
$t/T=0.125$ 			
$t/T=0.25$ 			
$t/T=0.375$ 			
$t/T=0.5$ 			
$t/T=0.625$ 			
$t/T=0.75$ 			
$t/T=0.875$ 			
$t/T=1$ 			

圖 4-4 豆娘飛行分解動作比較圖




圖 4-4 擷取了豆娘在不同飛行雷諾數下，不同運動模式下側面拍翅的剪影，圖中所顯示的兩個翅膀分別是位於同一側的前翅與後翅。觀察後可以發現，豆娘在進行高速前飛時，前翅會以稍微領先的相位開始下拍，雙翅皆以負向的攻角迎向來流，在無因次週期 0.375~0.750 由下拍轉上拍的期間，前後翅皆有快速的翼旋轉現象，隨後都有高攻角的上拍。

豆娘在不同雷諾數下呈現出漸進變化的迴旋模式：在低雷諾數的急停迴旋中，豆娘以高攻角開始下拍，在 0.5 拍撲週期時可發現前後翅翼尖的擺幅超過頭部，大於穩定前飛，在高攻角的配合下提供強勁的向後推力；在上下拍轉換時同樣觀察到翼旋轉的機制。另外，在 0.325~0.625 週期下拍轉上拍階段，豆娘不但有橫向飛行速度的逆轉，其水平高度也在拍翅過程中有微幅的抬升，原因是高攻角拍翅下不但產生短暫逆向推力，升力也同時獲得提高。由圖上顯示，迴旋週期中並無明顯身體俯仰角度的變化，因此定義：在迴旋拍撲週期中，身體俯仰角變化 10 度以下、有相似動作並且雷諾數相對較低之急迴旋稱為「往復式急迴旋」。

隨著雷諾數增加至 240 左右，此時身體慣性增加，觀察發現，豆娘在前一個前飛拍翅週期會藉由調整拍翅平面角，使得身體俯仰角有第一階段的增加(節 4-1.7 有詳細探討)，飛行速度也多了垂直向上分量，使得迴旋拍撲週期開始時豆娘姿態如圖中所示。接著雙翅向前拍翅至頭部前上方，同時身體俯仰角有第二階段的增加。並且和較低雷諾數對照發現，雙翅上拍結束時 ( $t/T=1$ ) 並沒有回復至背部上方之初始位置，在不需要大幅改變拍翅頻率的狀態下，豆娘在原先拍翅軌跡的中途開始新的拍翅週期。當雷諾數提高至 560 左右，豆娘迴旋時，拍翅方向有大幅度的傾斜，並且身體俯仰角快速並連續的增加，週期中並沒有明顯的垂直方向位移；雙翅之間的距離較大，並且在上下拍轉換時前後翅的時間差較為明顯。相對於往復式急迴旋，身體俯仰角變化超過 10 度、有相似動作並且雷諾數相對較高之迴旋稱為「旋轉式急迴旋」。

圖中紅色框線標出了豆娘在不同迴旋動作下後翅達到拍翅最大振幅的時間格，歸納後發現發現雷諾數越大，或者說在迴旋週期間身體俯仰角改變越劇烈，前後翅間距會縮短，並且後翅尖極限位置會向頭部上移動，在操控上可做為日後四翼之運動軌跡參考。

#### 4-1.4 頻率調控機制

表 4-2 頻率調控資料

雷諾數	加速度	前飛頻率	轉彎頻率	頻率增幅(%)	急迴旋模式	物種
488	17	18.2	19.2	5.5	旋轉式	細胸珈璫
464	18	16.1	11.0	-31.7	旋轉式	中華珈璫
419	15	24.3	23.8	-2.1	旋轉式	細胸珈璫
375	14	23.8	20.8	-12.6	旋轉式	細胸珈璫
352	12	22.7	18.5	-18.5	旋轉式	細胸珈璫
293	16	14.7	13.9	-5.4	往復式	中華珈璫
321	16	13.3	12.0	-9.8	往復式	中華珈璫
229	13	21.3	19.6	-8.0	旋轉式	細胸珈璫
204	12	10.2	12.2	19.6	往復式	中華珈璫
136	<b>24</b>	14.7	18.5	<b>25.9</b>	往復式	中華珈璫
121	11	13.9	15.4	10.8	往復式	中華珈璫
107	12	13.9	15.2	9.4	往復式	中華珈璫

表 4-2 呈現了雷諾數 100 至 500 區間下豆娘前飛時和迴旋時的拍翅頻率變化，觀察發現，豆娘進行往復式急迴旋時，普遍會藉由提高拍翅頻率以達成轉向，在  $Re=136$  時更觀察到豆娘藉由提高拍翅頻率 26% 使得頭部加速度較相近雷諾數之對照組有兩倍的提升，來到  $24 \text{ m/s}^2$ ，可以做為日後極低雷諾數下雙翅拍撲飛行器的控制參考。

隨著雷諾數提高至 300 左右頻率增幅現象趨於不明顯，反而進入到旋轉式急迴旋範圍時，拍翅頻率普遍有負向的變化，推斷豆娘在旋轉式迴旋時拍翅軌跡隨著身體旋轉而被延長，為了要讓拍翅達到最大振幅以獲得足夠的迴旋力，拍翅週期因而提高。



### 4-1.5 拍翅平面角度調控機制

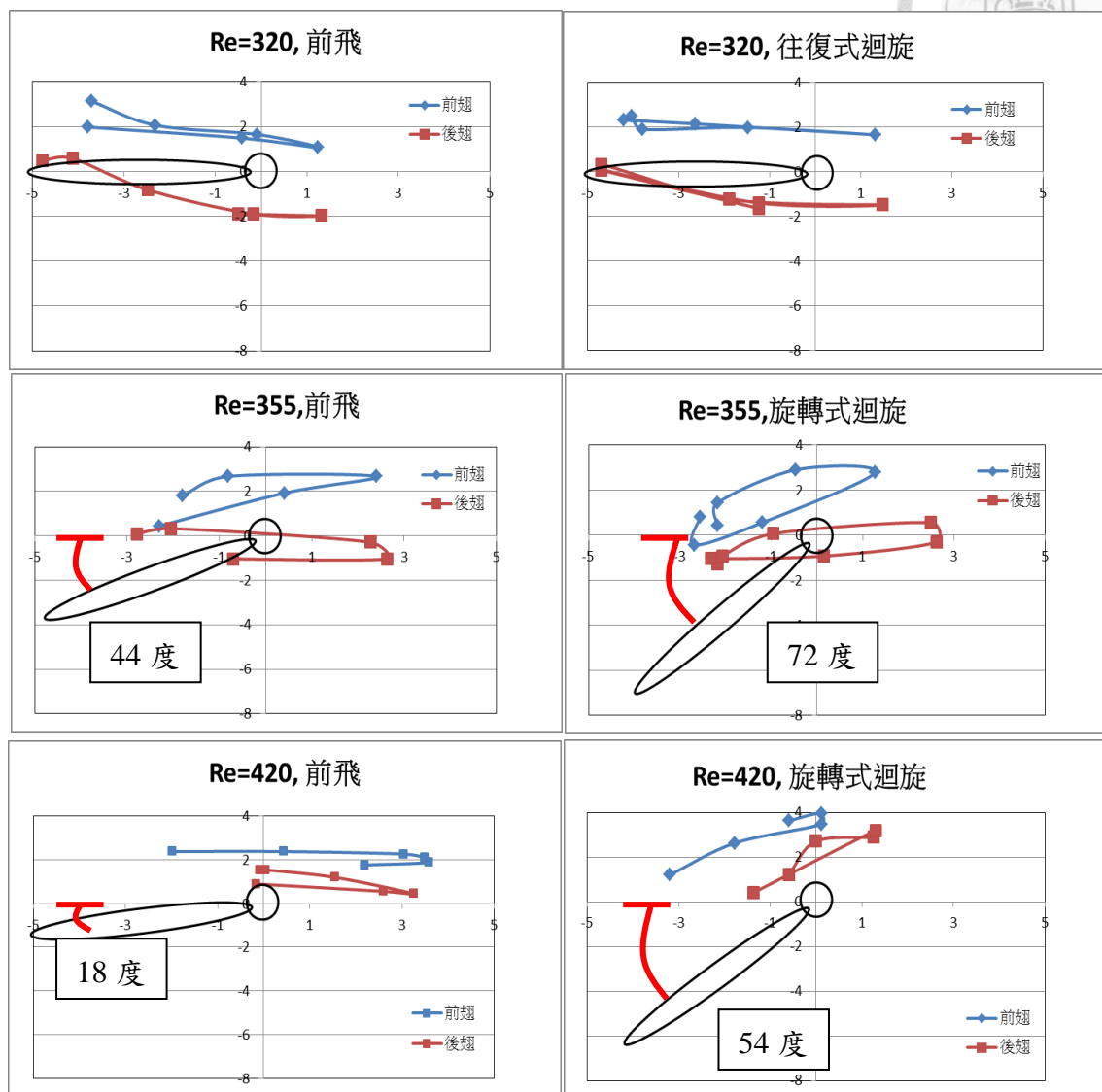


圖 4-5 拍翅平面角度調控示意圖

圖 4-5 顯示拍翅平面角的急遽改變對於身體俯仰角所帶來的影響，雷諾數 320 下豆娘採用了往復式迴旋，其拍翅平面角幾乎維持固定，而身體俯仰角也維持一定；雷諾數 355 時豆娘於迴旋期間拍翅平面角度增加了 20 至 25 度左右，並且雙翅下拍極限點往頭部前方移動，進而使身體俯仰角有 28 度左右的變化。直至雷諾數 420 時豆娘進一步將下拍極限點向前移動，並且後翅之拍翅平面已完全未於頭部上方，在一個拍撲週期內拍翅平面角度更有近 45 度的變化，使得身體俯仰角的變化達到 36 度。



### 4-1.6 攻角

高速轉彎過程中，近乎直角的拍撲角度對於經常利用延遲失速 (delayed stall) 技巧產生暫態高升力與推力的昆蟲而言似乎可行，若將來流方向列入考慮，並比較高速與低速兩種情況，如圖 4-6 所示，可以發現豆娘的實際攻角在兩種情況下都在 30 度左右，並非使用了垂直的攻角。豆娘在高速迴旋時身體的位移方向會由原本低速時的一維橫向移動轉為二維的曲線運動，為了要讓翅膀能持續和來流保持一定角度以產生足夠的升力和推力，需要持續增加攻角，如圖 4-7 所示。

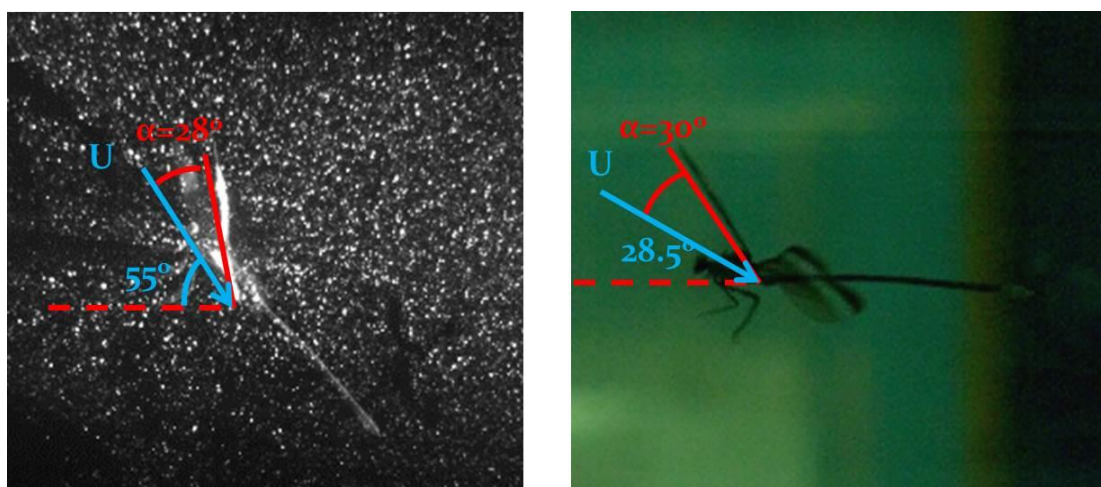


圖 4-6 攻角比較圖

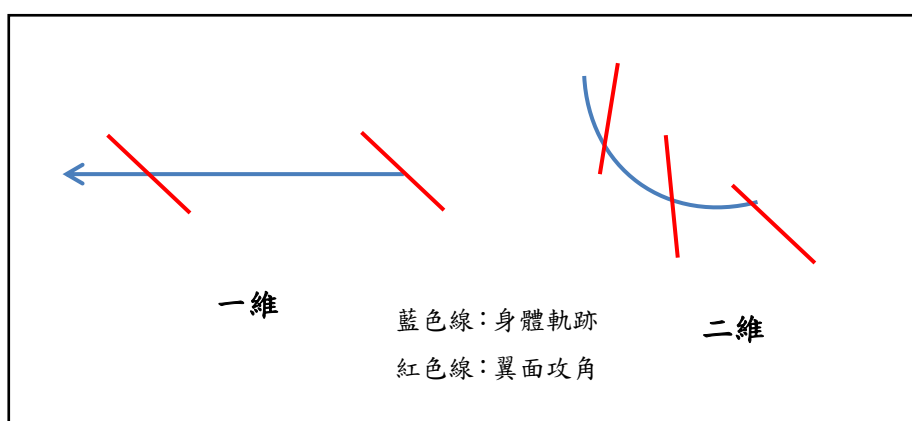


圖 4-7 攻角示意圖



#### 4-1.7 身體俯仰角調控機制與轉彎策略

身體俯仰角是旋轉式迴旋和往復式迴旋最明顯的差異。表 4-3 顯示，豆娘在往復式迴旋時身體與水平維持一個固定的微小角度(約 5~10 度)，而旋轉式迴旋時在迴旋拍撲週期內有 20~55 度以上的大幅度旋轉。身體旋轉在旋轉式急迴旋中對於頭部加速度有明顯的提升，在雷諾數 229 時恰好有兩組迴旋數據，相對於其中一組俯仰角增加 28 度、加速度為  $13 \text{ m/s}^2$  的對照組，當身體俯仰角在一週期內迴旋達到 46 度，頭部加速度可以達到  $22 \text{ m/s}^2$ ；另外，所有數據中加速度最大值  $28 \text{ m/s}^2$  也出現在身體俯仰角增幅有最大值 55 度之迴旋中。

表 4-3 身體俯仰角變化資料

雷諾數	加速度 a	身體俯仰角變化	迴旋模式
774	20	+6.00	側轉
714	23	+43.00	旋轉式
559	28	+55.00	旋轉式
488	17	+20.00	旋轉式
419	15	+36.00	旋轉式
375	14	+37.00	旋轉式
352	12	+28.00	旋轉式
229	13	+28.00	旋轉式
229	22	+46.00	旋轉式
200	11	+40.00	側轉
52	10	+38.00	旋轉式
514	16	+10.00	側轉
464	18	+37.00	旋轉式
321	16	+10.00	旋轉式
293	16	+5.00	往復式
204	12	+5.00	往復式
136	24	+5.00	往復式
121	11	+5.00	往復式
107	12	+5.00	往復式

圖 4-13 說明豆娘分別根據雷諾數採用往復式迴旋與旋轉式迴旋機制的原因。在低速時，當豆娘遭遇前方障礙物時，一方面反應時間長，另一方面身體慣性小，在身體維持水平的狀態下，可以單純藉由拍翅使得合力位置經過質心，一方面升力當然大於或等於重量，另一方面向後的推力可以使質心有向後的加速度，達成橫向的迴旋。然而在高速下，豆娘的反應時間短，身體慣性又大，若是以相同拍撲方式迴旋，不一定能產生足夠的推力，因此在前飛週期時，豆娘就會先微幅調整身體姿態並開始加入垂直方向(沒有障礙物)的運動，直至轉彎拍撲週期開始時，進一步的將合力方向作用於質心的上方，此時依照剛體運動的觀念，質心依然會受到向後的加速度，且剛體本身也會產生一個順時針的轉動，而位於質心上方的頭部即可利用 1. 此轉動造成之向後線速度以及 2. 身體向前的慣性達成提前轉向的目的。

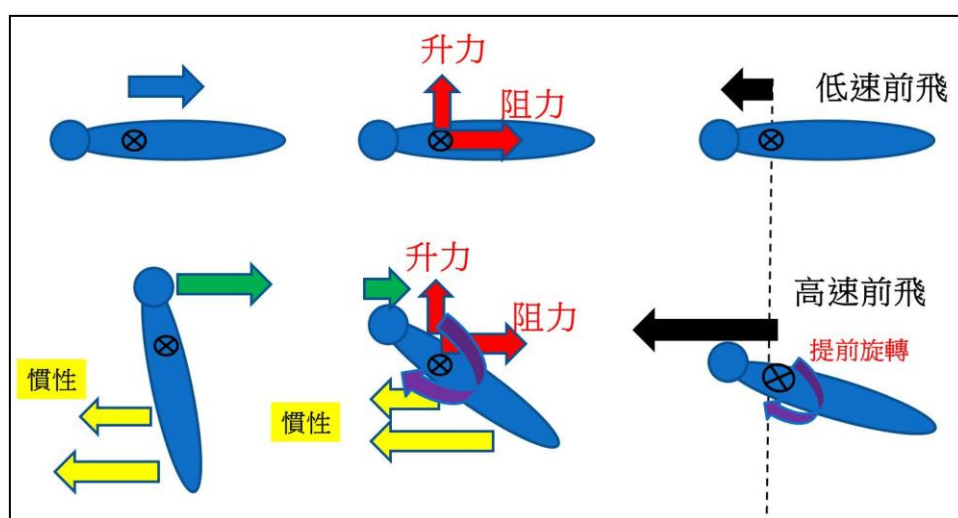



圖 4-8 轉彎策略示意圖

## 4-2 流場分析

### 4-2.1 穩定前飛

圖 4-9 呈現豆娘在雷諾數 640 下穩定前飛的流場變化。在  $t/T = 0.44$  時前翅下拍產生明顯的翼前緣渦旋，並且開始進入下拍轉上拍的翼旋轉階段，觀察  $t/T=0.48\sim 0.52$  時翼前緣渦旋強度雖然稍微減弱然而仍是穩定的附著，並且後翅翼



前緣渦旋強度逐漸提升。 $t/T=0.56$  時隨著翼旋轉角度增加，前翅翼前緣渦旋強度再次提升，並且中心開始向翼後緣方向移動，逐漸靠近由後方接近的後翅上緣，直至  $t/T=0.6$  時前翅翼前緣渦旋與後翅翼前緣渦旋在雙翅所夾之空隙間會合，形成一個高強度的渦旋區，這會使得豆娘的後翅不必為了產生足夠的翼前緣渦旋強度而使用過高的攻角，推對此效應有節能的效果。接著  $t/T=0.64$  時前翅開始進行平移上拍，後翅翼旋轉角度加大，此渦旋區仍繼續維持其範圍及強度。 $t/T=0.68$  渦旋微幅分散，但強度沒有明顯的下降，接著  $t/T=0.72$  時後翅達到拍翅極限點，翼旋轉效應更趨明顯，使得雙翅間的渦旋再次聚合並得以維持其強度，此時也觀察到渦旋開始向後翅之翼後緣方向移動。前翅於  $t/T=0.76$  開始快速上拍，在其翼後緣位置，恰好配合上後翅的翼旋轉效應，產生強勁的翼後緣渦旋，此渦旋也與圖中豆娘後上方的逆向渦旋形成逆卡門渦街，代表著推力的產生，緊接著在  $t/T=0.80$  與  $0.84$  後翅也開始強勁的上拍，再次產生一個強勁的翼後緣渦旋，與圖中所標示豆娘後方之逆向渦旋同樣形成逆卡門渦街，持續性的產生推力，再者，根據 Dickinson (1994) 所提出關於翼旋轉時翼後方夾帶射流的方向變化(如圖 4-10)，由於豆娘在下拍時已經過長距離的平移，當前翅和後翅上拍時可以捕捉到與翼面較為垂直的射流，因此在產生推力的同時豆娘也獲得了相當的升力。

#### 4-2.2 急迴旋

與穩定前飛比較，豆娘進行急迴旋時來流速度急遽下降，可將此暫態過程視為懸停的操控，因此在獲得向後推力開始向後飛行之前豆娘必須有效地產生升力並運用大約一個拍撲週期之間所產生之渦旋。圖 4-11 顯示豆娘在雷諾數 560 時下拍轉上拍的短暫時間，可看出在  $t/T=0.44\sim 0.48$  之間豆娘之翼旋轉速度較穩定前飛的更加急遽，克拉瑪效應(Kramer's effect)強化之下，即使在來流速度遽降情形下，前翅翼前緣渦旋仍達到一定的強度，接著開始向翼後緣方向移動，由後方靠近之後翅即可利用到前翅翼前緣渦旋產生之低壓區效應而獲得升力；及至上拍結束後，由圖 4-11 下方雷諾數 420 之迴旋可看出，此時豆娘準備開始一強勁的下拍



以改變飛行方向，呈現一懸停狀態，此時後翅無法形成過大的攻角向後拍翅以產生翼前緣渦旋，這樣會產生額外向前的推力，然而已經開始下拍的前翅此時產生了強勁的翼後緣渦旋，使得下方的後翅可以持續獲得升力。

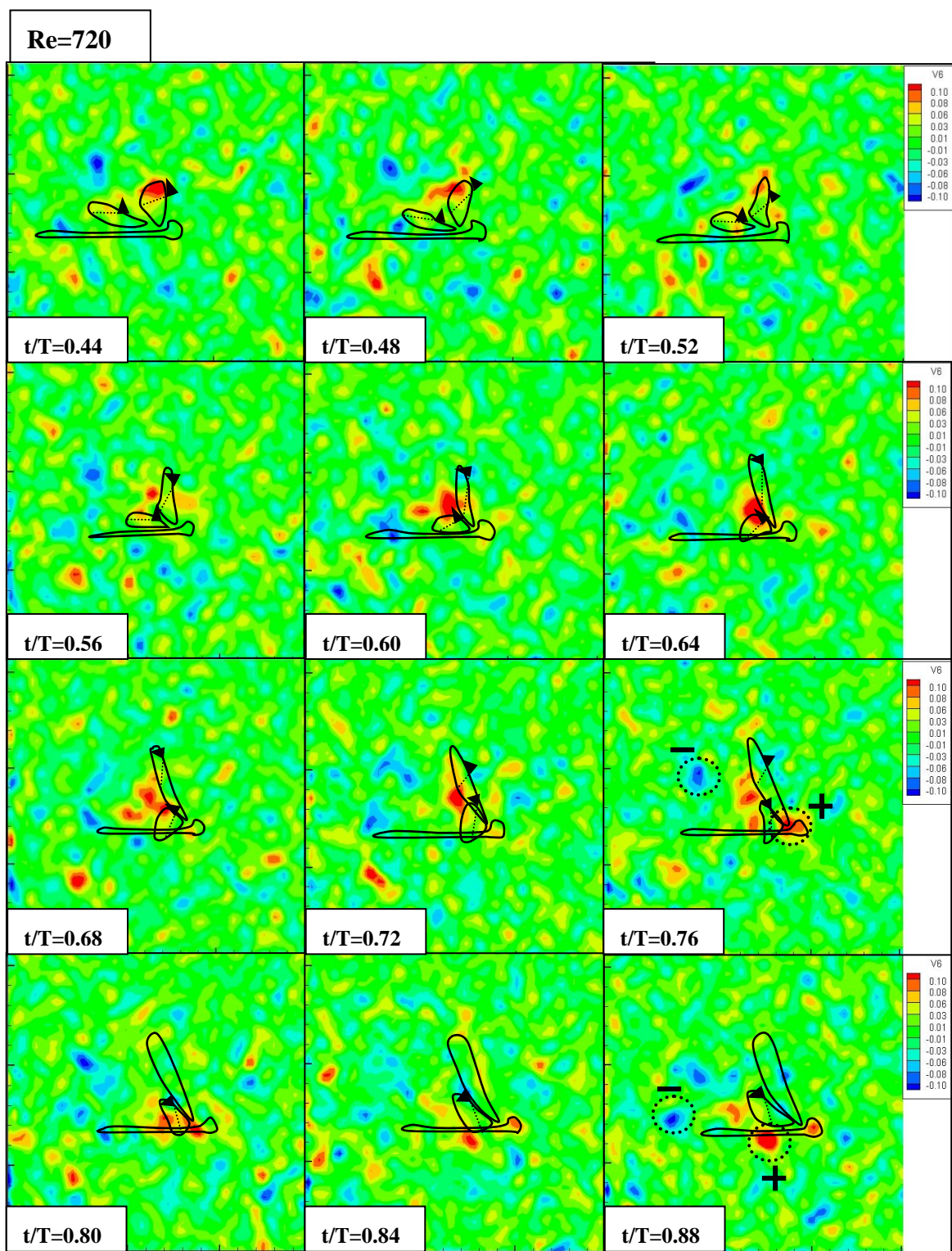


圖 4-9 前飛渦旋時序變化圖

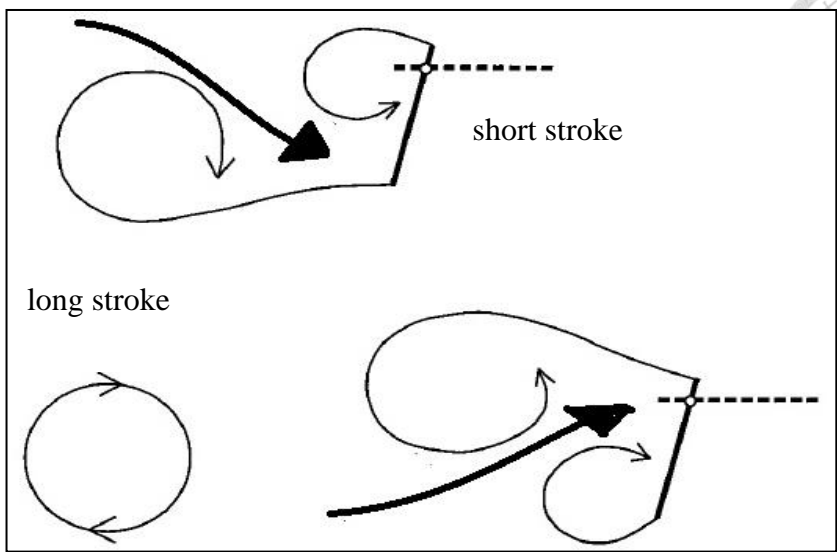
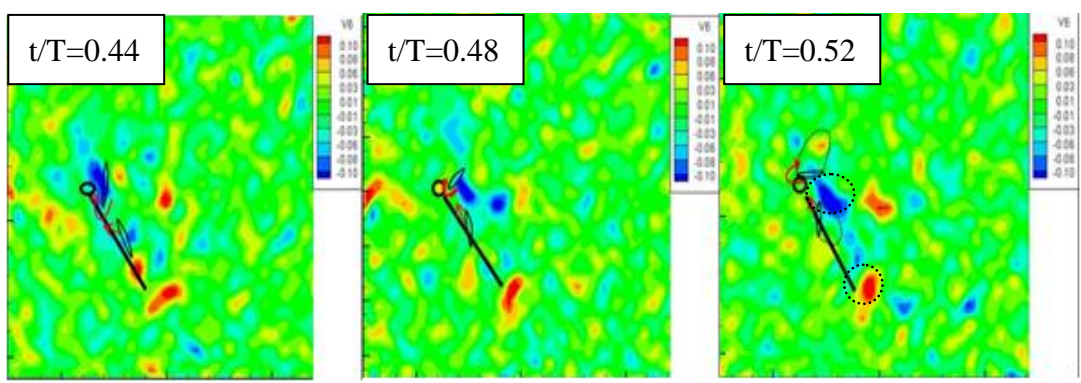
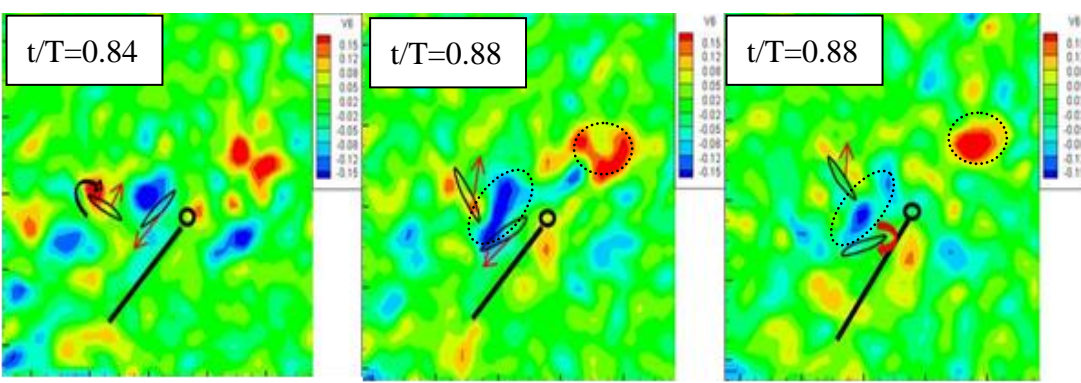


圖 4-10 翼後方射流方向變化圖



Re=560, fore wing supination



Re=420, fore wing pronation

圖 4-11 急迴旋上下拍轉換渦旋時序變化圖



$t/T=0.44\sim 0.88$  穩定前飛  $Re=720$  速度場與渦度場疊合圖

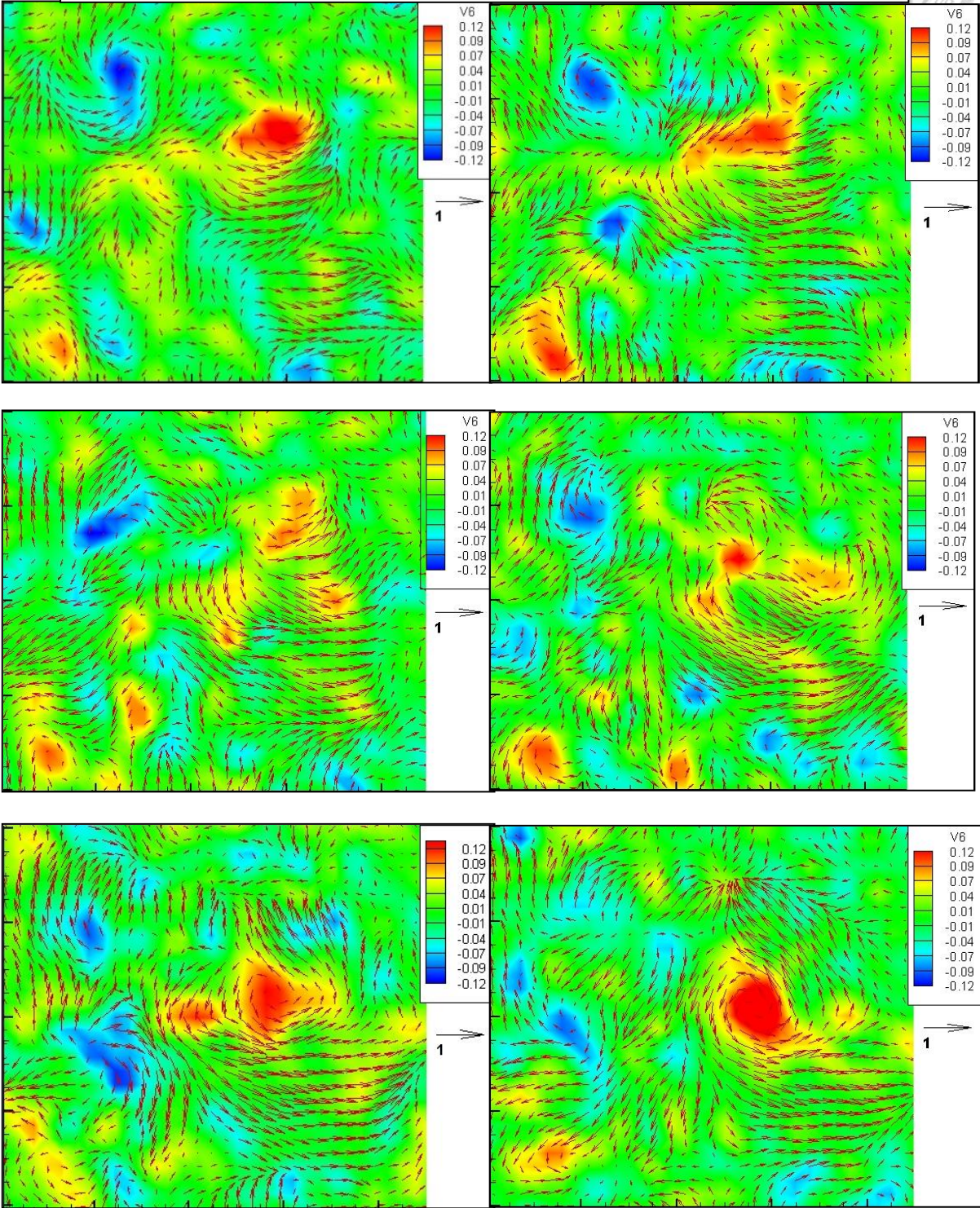


圖 4-12  $t/T=0.44\sim 0.60$  穩定前飛  $Re=720$  速度場與渦度場疊合圖

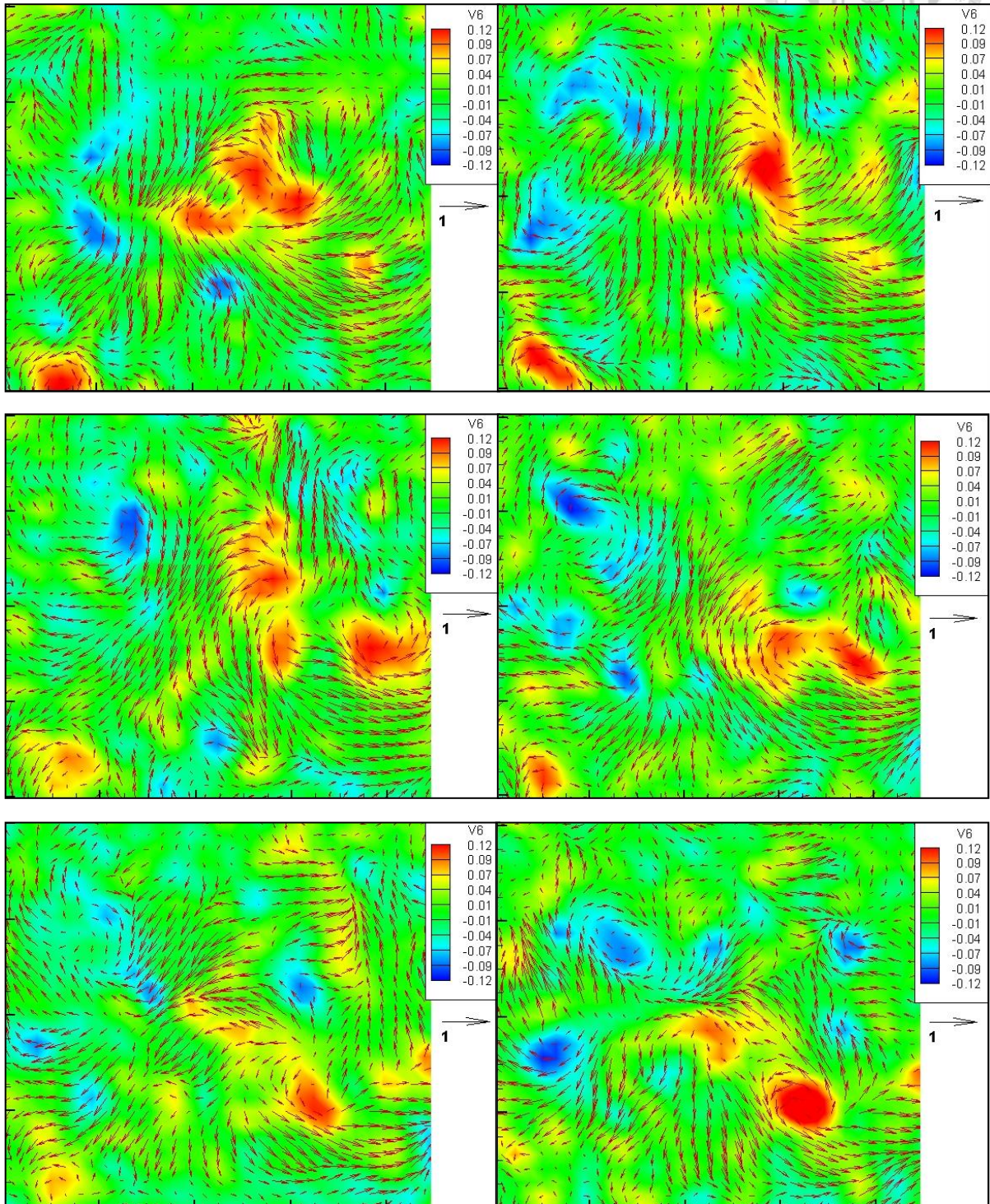


圖 4-13  $t/T=0.64\sim 0.88$  穩定前飛  $Re=720$  速度場與渦度場疊合圖

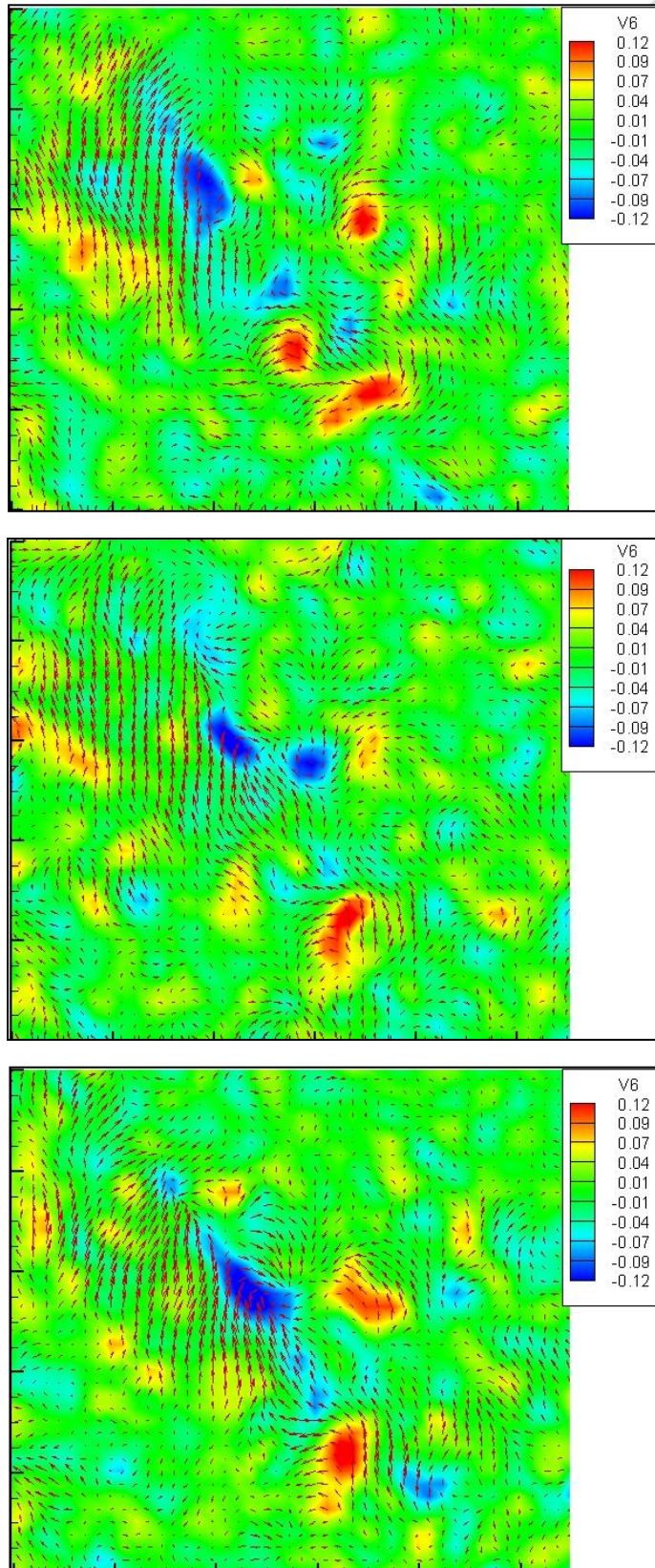


圖 4-14  $t/T=0.44\sim 0.52$  急迴旋下拍轉上拍,  $Re=560$ ,  
速度場與渦度場疊合圖

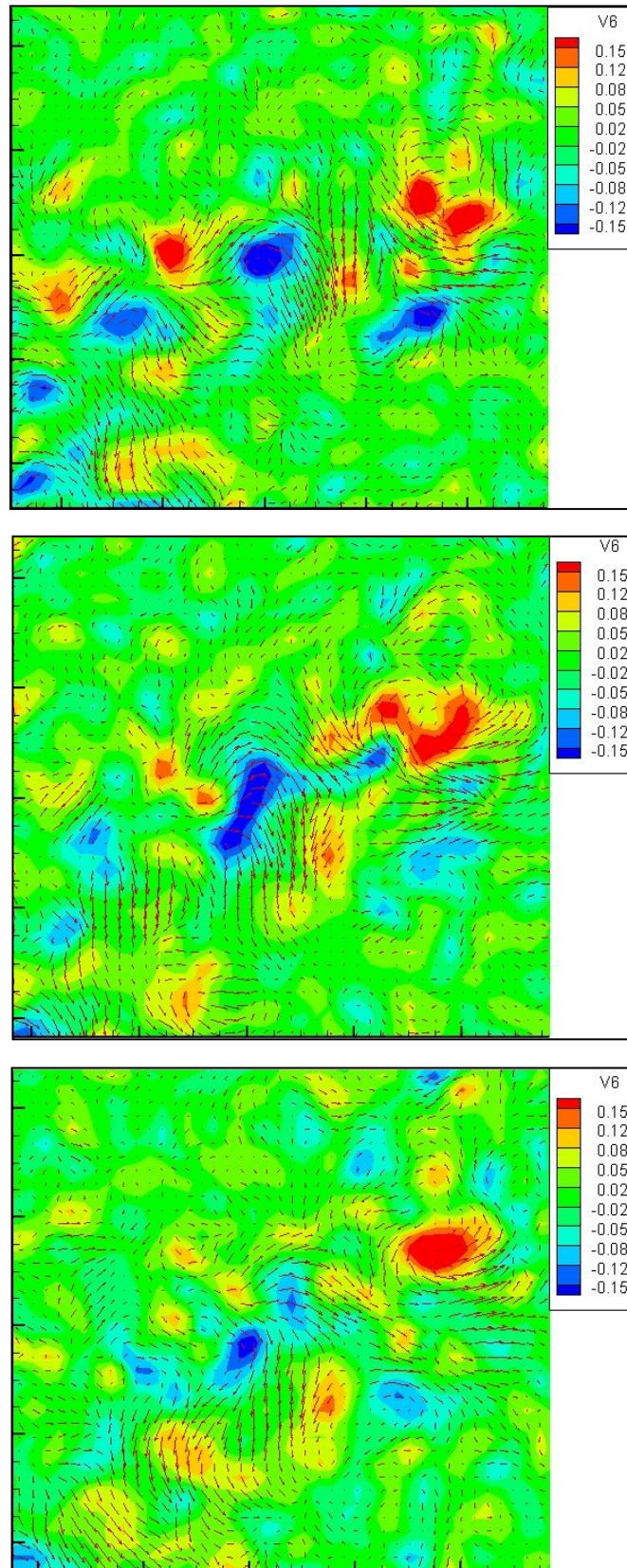
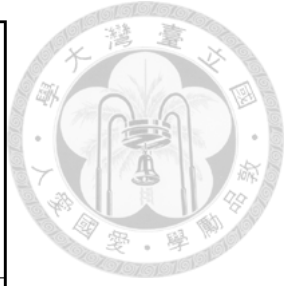


圖 4-15  $t/T=0.84\sim 0.88$  急迴旋上拍轉下拍,  $Re=420$ ,

速度場與渦度場疊合圖

由圖 4-14 可清楚觀察到豆娘利用下拍進行迴旋動作時，前翅翼前緣渦旋與後翅翼後緣渦旋形成一對渦旋對，在左右翅對稱拍翅的情況下很有可能在三維空間中形成渦旋環之結構。因此利用圖 4-14 中無因次週期為 0.48 之渦旋圖做為計算參考，可得各參數之測量值，如表 4-4 所示。接著 4-2 式利用 Stokes' Theory 將一個渦旋之環流量大小以渦度為 100 (1/s) 所包覆之面積估算，其值會較實際值為低；將所得之環流量強度帶入渦旋環理論，由 4-3 計算兩渦旋中心所提供之反作用力，再利用 4-4 式計算垂直分量(提供升力)以及水平分量(提供阻力)，結果發現升力為 0.148(gw)，略大於豆娘之體重，可以提供豆娘足夠之升力，而計算之阻力值為 0.256(gw)，利用 4-5 式計算之身體加速度為 18 (m/s<sup>2</sup>)，數量級落在與頭部加速度之測量值相近之區間，然而頭部因為身體旋轉之效應使得加速度量值較高。此結果顯示，雖然豆娘以兩對翅拍翅所造成之流場結構和雙翅拍翅下相對較為單純之流場結構有差異，然而由二維流場延伸之渦旋環結構可以合理的估算升力與推力，簡化過度繁複的計算，提供日後估計迴旋能力的參考。

表 4-4 渦旋環計算參數測量值

參數符號	物理意義	測量值
$\omega_y$	垂直於紙面之渦度值	100(1/s)
$D$	渦旋直徑	0.5(cm)
$R_{ring}$	渦旋環半徑	2(cm)
$t_{PIV}$	PIV 時間距	0.001(s)
$m$	豆娘質量	0.14(g)
$\rho_{air}$	空氣密度	1.18(kg/m <sup>3</sup> )
$\beta$	渦旋環連線與垂直線夾角	30(degree)



$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} \stackrel{\text{Stokes' Theory}}{=} \iint \vec{\omega} \cdot d\vec{A} \stackrel{\text{lumping}}{=} |\vec{\omega}| \cdot A_{\text{vortex}} \dots\dots\dots(4-2)$$

$$= 1.96 \times 10^{-3} (m^2 / s)$$

$$F = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\rho_{air} A_{ring} \Gamma}{t_{PIV}} = \frac{\rho_{air} \pi R_{ring}^2 \Gamma}{t_{PIV}} \dots\dots\dots(4-3)$$

$$= 2.9 \times 10^{-3} (N) = 0.296 (gw)$$

$$\begin{cases} F_L = F \sin \theta = 0.148 (gw) \\ F_D = F \cos \theta = 0.256 (gw) \end{cases} \dots\dots\dots(4-4)$$

$$a = \frac{F_D}{m} = 18 (m/s^2) \dots\dots\dots(4-5)$$

### 4-3 中華珈瓏與細胸珈瓏力學特性比較

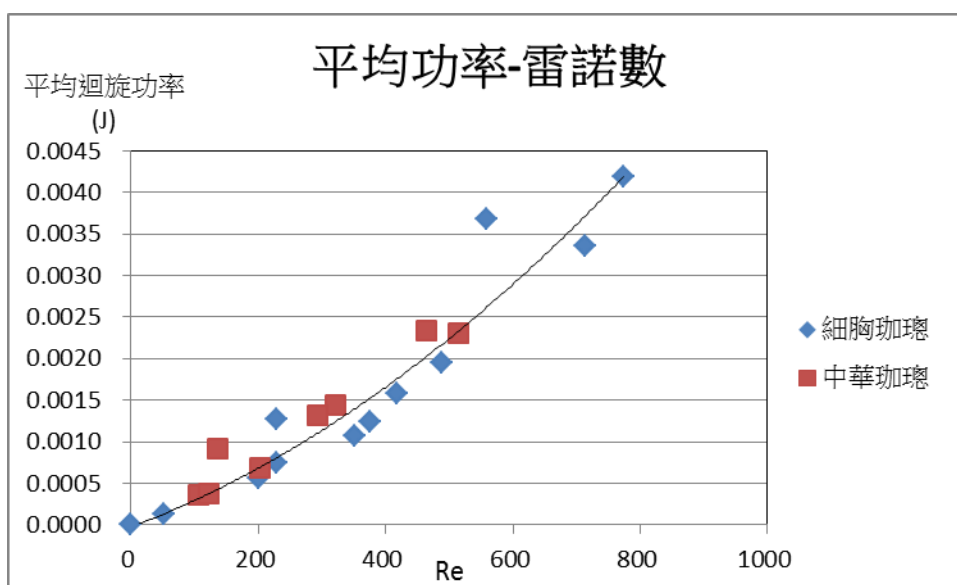


圖 4-16 兩物種平均迴旋功率對雷諾數圖

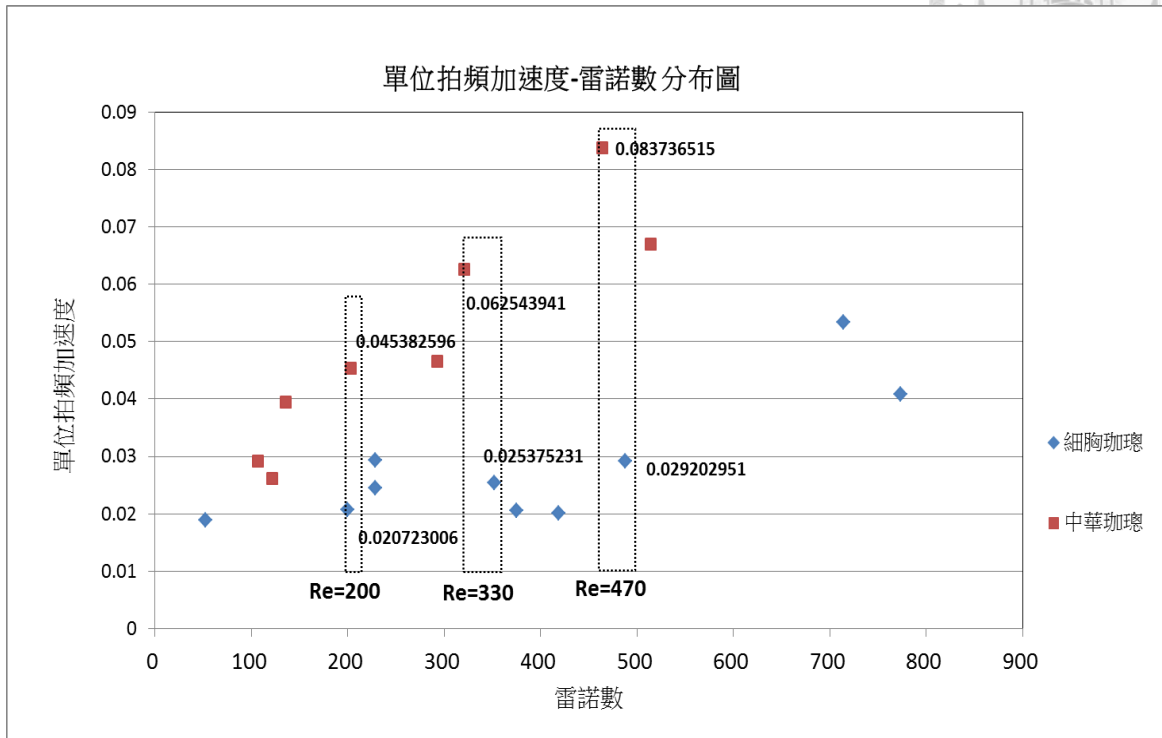



圖 4-17 兩物種單位拍頻加速度對雷諾數作圖

$$\text{平均迴旋功率} = \frac{(\text{豆娘迴旋消耗之動能})}{(\text{等加速度運動時間})} = \frac{\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mV^2}{\frac{V}{a}} = \frac{1}{2}mVa \quad (5-1)$$

$$\text{單位拍頻加速度} \equiv \frac{(\text{豆娘迴旋等加速度})}{(\text{拍撲週期性運動向心加速度})} = \frac{a}{R\omega^2} = \frac{a}{4\pi^2 Rf^2} \quad (5-2)$$

由前面分析結果發現，兩種豆娘在相同雷諾數下具有相近的頭部加速度值以及操作之史卓荷數，但在本質上，兩種豆娘具有不同拍翅頻率及體型，因此進一步之分析是必要的。首先檢驗平均迴旋功率，如 5-1 式所示，定義為豆娘在一個等加速度運動之迴旋週期中所消耗之前飛動能，此值等於豆娘體重、前飛速度以及等加速度三者乘積之一半，作圖後發現兩物種在相同雷諾數下具有相近之值，代表兩物種在迴旋時藉由拍翅而獲得流體所做之負功大小接近；然而繼續檢驗單位拍頻加速度，定義為迴旋等加速度除以拍撲週期運動之向心加速度，可以發現



隨著雷諾數增加，中華珈璽單位拍翅所獲得的加速度值為細胸珈璽之 2.2 至 2.9 倍。比較兩種參數可以獲得一個重要的結果：在同樣雷諾數下(本研究範圍  $Re=100\sim600$ )，體型較大但拍翅頻率較高之中華珈璽可在較低拍翅頻率下獲得與細胸珈璽相同之迴旋功率，使得日後微飛行器設計時可使用較為節能、拍翅頻率較低之振動機構，在流體操控達成相同的迴旋能力。

## 第五章 結論與展望

生物對於所處環境具有極高的適應力，本實驗藉由將豆娘放入極度狹窄，長寬高在 5~10 個體長之空間迫使其展現生物的飛行操控能力，結果發現豆娘會根據不同的飛行雷諾數，使用不同的急迴旋機制，其中雷諾數區間 200~250 是機制轉換的區域，在小於雷諾數 200 的低速轉彎中，豆娘藉由調控頻率可以有效提高頭部加速度至 26% 相對於同雷諾數之對照組，而在雷諾數高於 250 高速迴旋時，由於身體慣性提高，無法使用原本一維空間的往復式迴旋以有效迴避障礙，豆娘於是藉由改變振幅與拍翅平面角度來調整所受阻力的方向，使得身體產生旋轉，進展成為二維空間的曲線運動，位於豆娘身體上方頭部因此獲得剛體運動之角加速度而使線加速度大幅提升，可以較同雷諾數之對照組增加 100~120%，而最高可達  $28\text{ m/s}^2$ ；此現象展現了生物在天然力量的限制下，藉由調整身體姿態以達到最佳的力學效應。

本研究藉由豆娘在低雷諾數的操控性飛行揭露了雙翅與渦旋互動所帶來之效益，結果顯示，豆娘急迴旋期間呈現懸停狀態，下拍時前翼翼前緣渦旋向後逸散非常緩慢，能夠在下拍轉上拍或是上拍轉下拍之翼旋轉期間位移至後翅上方，與後翅之翼前緣渦旋合併，且維持一定之強度，提供穩定的升力來源。而穩定前飛期間，前後翼翼前緣的合併渦旋不只提供升力，其引入之射流可以使前後翅在進行強勁的上拍時獲得高相對速度，展現尾流捕捉(wake capture)在雙翅拍撲飛行所



## 參考文獻



Alexander, D. E. (1986), "Wind tunnel studies of turns by flying dragonflies," *The Journal of Experimental Biology*, 122, pp. 81-98.

Azuma, Akira and Watanabe, Tadaaki (1988), "Flight performance of a dragonfly," *The Journal of Experimental Biology*, 137, pp. 221-252

Chung, H. C., Lal Kummari, K., Croucher, S. J., Lawson, N. J., Guo, S. J. and Huang, Z. (2008), "Coupled piezoelectric fans with two degree of freedom motion for the application of flapping wing micro aerial vehicles," *Sensors and Actuators A*, 147, pp. 607–612.

Dickinson, M. H. (1994), "The effects of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low Reynolds numbers," *The Journal of Experimental Biology*, 192, pp. 179–206.

Dickinson, M. H. (1999), "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight," *Science*, 284, pp. 1954-1960

Fry, S. N., Sayaman, R. and Dickinson, M. H. (2003), "The aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*," *Science*, 300, pp. 495-498

Fry, S. N., Sayaman, R. and Dickinson, M. H. (2005), "The aerodynamics of hovering flight in *drosophila*," *The Journal of Experimental Biology*, 208, pp. 2303-2318

Hsieh, C. T., Kung, C. F., Chang, C. C. and Chu, C. C. (2010), "Unsteady aerodynamics of dragonfly using a simple wing–wing model from the perspective of a force decomposition," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 663, pp. 233-252

Jardin, T., David, L. and Farcy, A. (2009), "Characterization of vortical structures and loads based on time-resolved PIV for asymmetric hovering flapping flight," *Experiments in Fluids*, 46, pp. 847–857

Marden, J. H., (1987), "Maximum lift production during takeoff in flying animals," *The Journal of Experimental Biology*, 130, pp.235-258

Norberg, R. A. (1975), "Hovering flight of the dragonfly *aeschna juncea* L., kinematics and aerodynamics," *Swimming and Flying in Nature*," vol.2, pp. 763-781

Pines, Darryl J. and Bohorquez, F. (2006), "Challenges facing future micro-air-vehicle development," *Journal of Aircraft*, vol. 43, No.2, pp. 290-305

Ristroph, L., Ristroph, G., Morozova, S., Bergou, A. J., Chang, S., Guckenheimer, J., Wang, Z. J. and Cohen, I. (2013), "Active and passive stabilization of body pitch in insect flight," *Journal of the Royal Society Interface*, 10, 20130237

Rudolph, R. (1976), "Preflight behaviour and the initiation of flight in tethered and unrestrained dragonfly, *Calopteryx splendens* (Harris) (Zygoptera: Calopterygidae)," *Odonatologica*, 5, p.p. 59-64

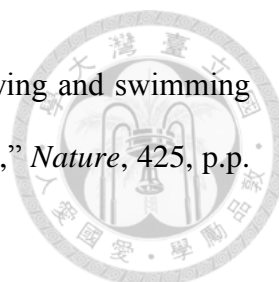
Sato, Machiko and Azuma, Akira (1997), "The flight performance of a damselfly *ceriagrion melanurum selys*," *The Journal of Experimental Biology*, 200, pp. 1765-1779

Sane, S. P. (2003), "The aerodynamics of insect flight," *The Journal of Experimental Biology*, 206, pp. 4191-4208

Shyy, W., Berg, M. and Ljungqvist, D. (1999), "Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, 35, pp.455-505

Sun, Mao and Lan, Shi-Long (2004), "A computational study of the aerodynamic forces and power requirements of dragonfly (*Aeschna juncea*) hovering," *The Journal of Experimental Biology*, 207, pp.1887-1901

Taylor, G. K. (2001), "Mechanics and aerodynamics of insect flight control," *Biological Reviews*, 76, pp. 449-471



Taylor G. K., Nudds, R. L. and Thomas, A. L. R. (2003), "Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency," *Nature*, 425, p.p. 707-711

Thomas, A. L. R., Taylor, G. K., Srygley, R. B., Nudds, R. L. and Bomphrey, R. J. (2004), "Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualizations reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack," *The Journal of Experimental Biology*, 207, pp. 4299-4323

Wakeling, J. M. and Ellington, C. P. (1997), "Dragonfly flight II. velocities, accelerations and kinematics of flapping flight," *The Journal of Experimental Biology*, 200, pp. 557-582

Wakeling, J. M. and Ellington, C. P. (1997), "Dragonfly flight III. lift and power requirements," *The Journal of Experimental Biology*, 200, pp. 583-600

Wagner, H. (1925). "The production of dynamic lift on wings," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 5.

Wang, H., Zeng, L., Liu, H., and Yin, C. (2003), "Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies," *The Journal of Experimental Biology*, 206, pp. 745-757

Weis-Fogh, T. (1973), "Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production," *The Journal of Experimental Biology*, 59, pp.169-230