

多自由度仿生撲翼機構分析雀類腕關節折曲運動於懸停飛行之氣動力效應 Aerodynamic Effect of Wrist Folding on Passerines in Hovering Flight with a Multi-articulated Flapping-wing Robot

陳威瀚、林芷瑩、葉思沂

Wei-Han Chen, Zhi-Ying Lin, Szu-I Yeh

國立成功大學航空與太空工程學系

Department of Aeronautic and Astronautic Engineering, National Cheng Kung University

摘要

本研究根據小型雀類尺寸、外型及飛行模式設計且製作一多自由度拍撲實驗機構，其單翅擁有五個可控自由度並能仿照雀類之懸停飛行之運動以進行升力量測與流場可視化實驗。近年，開始有研究學者投入大量心力以昆蟲或簡化的鳥類模型分析探討拍撲飛行之空氣動力學機制及效應。然而，由於鳥類在飛行時的翅膀運動學較為複雜，因此這類多自由度之空氣動力學機制仍然有待深入研究。本研究根據雀類懸停飛行之運動學軌跡衍伸出兩種運動模式進行觀察與實驗，其中一種之運動軌跡與真實雀類相似，另一種則將翅膀上拍時的折曲幅度縮小為二分之一，探討雀類腕關節折曲運動於懸停飛行之氣動力效應。實驗中首先利用直接線性轉換(DLT)進行運動學分析，驗證本研究之拍撲機構能確實重現此兩種運動模式後，接續進行升力量測及流場可視化實驗。本研究根據力平衡儀量測之結果，將一個拍撲週期分為四階段並可由運動學觀察以及流場可視化之結果詳加說明。實驗結果指出，折曲幅度較小之運動模式雖然會於上拍時產生極大之負升力，但同時也會誘發下拍初期的「尾流捕捉」效應，使其在下拍初期便產生極大升力。也因此，其整體升力反而較另一模式略大一些。然而，單純擁有較大之升力並不代表該運動模式會是對飛行之表現及效率有益的。

關鍵字：拍撲翼、懸停飛行、翅膀折曲、力量測、粒子影像測速法、翼前緣渦流、尾流捕捉

ABSTRACT

In this study, a novel multiarticulate flapping-wing robot with five degrees of freedom on each wing was designed and fabricated to replicate hovering motion of passerines for force measurement and PIV experiments. Recent years, several researchers have focused on exploring the aerodynamic characteristics of insects and also some simplified model of birds. However, birds, like passerines, perform much more complicated wing kinematics which are rarely tested. The detailed aerodynamic effect of wings with higher degrees of freedom still remains to be further investigated. Two modified wing trajectories from previous observed wing kinematics of passerines were experimented in this research to investigate the aerodynamic differences, one with a larger folding amplitude, similar to that of real passerines, and one with only half the amplitude. Kinematics of the robot was verified utilizing direct linear transformation (DLT) which confirmed that the wing trajectories had high correlation with the desired motion. According to the lift force measurements, 4 phases of the wingbeat cycle were characterized and elaborated through camera images and flow visualization result. We found that although less folding caused higher negative lift during upstrokes it also induced greater lift at the initial downstroke through ‘wake capture’ which ended up producing higher cycle-averaged lift. However, this does not imply that less folding benefits flight performance.

KEYWORDS: flapping wing, hovering flight, wing folding, force measurement, PIV, leading-edge vortex, wake capture

一、前言

一直以來，人們都致力於能像鳥類一樣翱翔天際。飛行長久以來一直是人類關注的議題，古希臘阿爾塔斯製造機械鴿；十五世紀達文西觀察鳥類的飛行姿態，設計繪出拍撲器[1]；隨著十九工業迅速發展，真正實現人類飛行的夢想是在 1903 年美國萊特兄弟製造出第一架的固定翼飛機，經過百年的發展，隨著科技的進步，固定翼從客機縮小至小型無人機，但隨著人造飛行器對於救援的需求提升，人類更致力於研發出機動性更強、更微小、更輕盈的高效能與高應用價值的微型飛行器 (Micro Aerial Vehicle, MAV)。

鳥類是人類最早仿效的拍撲飛行生物，儘管生物拍撲飛行的動作相當複雜且多元，但因為具有良好的飛行性能，近年來仍有相當多的學者投入於生物拍撲飛行的相關研究，在仿生拍撲領域當中，主要分為兩個研究方向，第一個著重在微型飛行器的設計、製造以及控制，而另一個著重於研發目前未發展的空氣動力學機制研究。鳥類拍撲運動學會造成周邊流場的改變，進而影響升力的產生，很多研究不僅觀察真實鳥類的翅膀運動學，也研究簡化的拍撲機構。

Oorschot et al.[2] 觀察到鳥類在一次拍撲週期時會延伸並縮起翅膀，並在相同起飛和滑翔條件下利用不同物種的翅膀試驗了其伸展和縮起間翅膀的空氣動力學差異。結果發現，延伸翅膀在拍撲時會產生較高的升阻比，但在滑翔中卻沒有很大的差異。Ros et al.[3] 根據統計發現鴿子在 90 度轉彎飛行中會產生氣動扭矩 (aerodynamic torque)，而非利用身體及翅膀間傳遞的慣性角動量 (inertial angular momentum)，且氣動扭矩是通過不對稱的翅膀軌跡生成的，而非拍撲速度的改變。Feshalami et al.[4] 在具有兩個分量力平衡的風洞中，對海鷗大小的拍撲機構在前飛測試中，量測不同手腕彎曲 (wrist bending) 角度對於氣動力學的影響。結果發現在上拍中，角度變化越大產生的升力及推力也越大，代表手腕彎曲運動有助於飛行。

由於人類對脊椎動物的空氣動力學機制還未得到充分的了解，以及雀類在懸停飛行中呈現出獨特的拍打動作，因此本研究旨在更深入的探討拍撲運動學中增加自由度對於空氣動力學的影響。本研究設計出一多自由度拍撲機構，並仿效雀類在懸停過程中的動作。在水箱中做空氣動力學分析，利用粒子影像測速儀 (Particle Image Velocimetry, PIV) 及升力分析做更深入的探討。

二、研究方法

2.1 機構設計

本研究以綠繡眼 (Japanese White-eye) 做為參考鳥類，設計出一擁有五個自由度的拍撲機構。為了使設計的機構可以和真實雀類相互比較，在設計前需要考慮三個相似性：幾何相似性、運動學相似性及動力學相似性。幾何相似性設計機構翼展長(b)、弦長(c)等和真實雀類作等比例縮小。運動學相似需要考慮機構拍撲方向和真實雀類相同。其最重要的為動力學相似性，需要考慮力的量測，並且利用白金漢 π 理論 (Buckingham π theory) 得到無因次化參數。在仿生實驗中，當考慮不穩定空氣動力學影響拍撲情形時，判斷的一個重要參數為簡約頻率 (reduce frequency, k)。當 $k=0$ 時為穩定流， $0 \leq k \leq 0.05$ 為擬穩態 (quasi-steady)，當 $k \geq 0.05$ 為不穩定流。對於鳥類而言，k 的範圍為介於 0.1 至 0.5 之間。

$$k = \frac{f \bar{c}}{2V} \quad (1)$$

根據文獻[5-8]我們知道實驗機構的大小應該落在測量空間的 15% - 30%，由於實驗水箱的大小為 $1800 \times 800 \times 900 \text{ mm}^3$ 、綠繡眼半翼展長為 66 mm，本研究設計將機構的大小設為水箱寬度的 18%，因此設計出拍撲機構的半翼展大小為 150 mm，藉由真實雀類以及拍撲機構的翼展長算出縮放比例，而作進一步的無因次化參數分析。

$$\text{Scaling Factor} = \frac{150 \text{ mm}}{66 \text{ mm}} = 2.27 \quad (2)$$

由於雀類平均翼尖速度為 9.4 m/s 且拍撲頻率為 24.4 Hz，為了讓設計機構和真實雀類的雷諾數相同，由下列相似度計算可以得到 $V_{\text{wrobot}} = 0.2379 \text{ m/s}$ 且 $f_{\text{wrobot}} = 0.2720 \text{ Hz}$

$$\text{Re}_{\text{robot}} = \text{Re}_{\text{bird}} = \frac{V_{\text{wrobot}} \bar{c}_{\text{robot}}}{\nu_{\text{water}}} = \frac{V_{\text{wbird}} \bar{c}_{\text{bird}}}{\nu_{\text{air}}} \quad (3)$$

本拍撲機構由圖 1 可以了解五個自由度的位置情形。肩膀關節連接身體以及手臂控制 3 個自由度變化，分別為：拍動、手臂掃動 (arm-sweeping) 以及轉動 (twisting)。而軸關節為連接手臂及手的位置控制 2 個自由度的變化，分別為折曲 (folding)、手掃 (hand-sweeping) 的角度變化。

由於此拍撲機構會在水箱內做實驗，因此控制的電子設備、馬達設計放在水箱上面，由圖 2 可以看出本研究能量供應示意圖。為了連接馬達

及機構，本研究利用彈性鐵氟龍管一端固定在馬達上，另一端連接至機構，當馬達啟動時，鐵氟龍管開始轉動，進而帶動機構轉動，就如同人體關節旁的肌肉帶動關節變化一樣[9]。

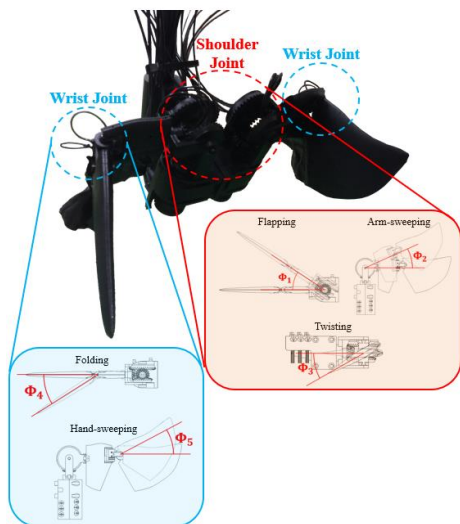


圖 1、拍撲機構各自由度示意圖

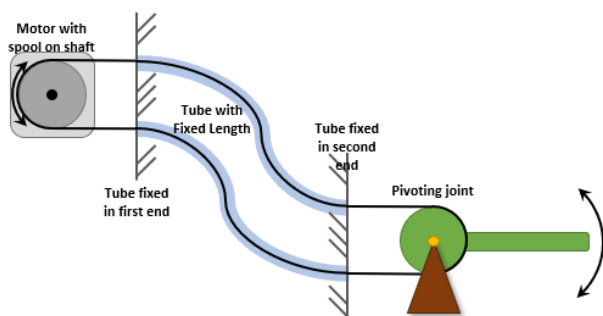


圖 2、能量供應示意圖

2.2 鳥類飛行動作解析

由文獻[10]可以找到鳥類懸停時每一次拍撲週期時的角度變化，參考的鳥類五個拍撲角度定義分別為拍撲角 (flapping (θ_1)), 轉動角 (twisting (θ_2)), 折曲角 (folding (θ_3)), 手臂掃角 (arm-sweeping (θ_4)) and 手掃角 (hand-sweeping angles (θ_5)). 就理想狀態而言，當拍撲週期結束時，每一個角度應該要回到最初時的位置，但從圖 3 可以看出當週期結束時，每一個角度不會和週期開始時的角度吻合，有些甚至有超過 20 度的差別，這些誤差可能來自於拍攝時取點的誤差、機構翅膀缺乏真實鳥類羽毛擁有的彈性，無法產生與真實雀類翅膀擁有的形變、折曲，進而產生此誤差。此誤差可以利用傅立葉轉換而修正，以

及基因演算法(GA)修正此誤差。經修正過後可以由圖 4 看出每一角度經過一週期循環後會和一開始的角度吻合。最後藉由此修正數學轉換式設計本機構的拍撲動作，並做更深入的動作分析。

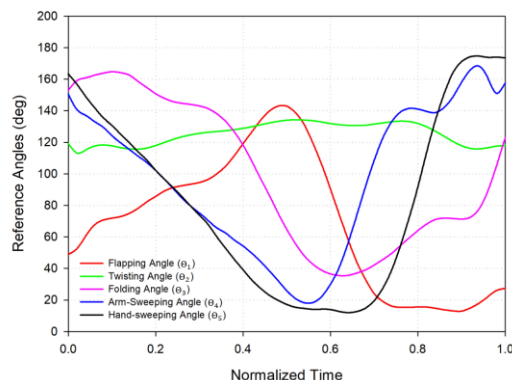


圖 3、參考文獻之各運動角度隨時間變化情形[10]

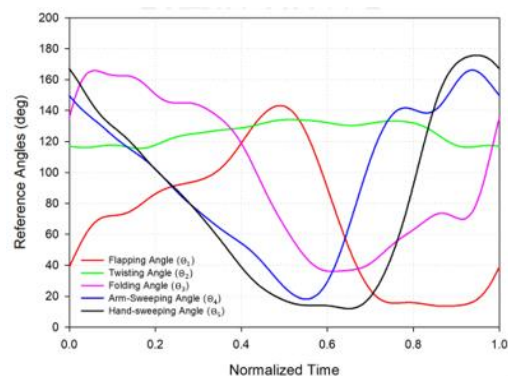


圖 4、運動角度修正後隨時間變化圖

2.3 實驗設計

本研究根據雀類懸停飛行之運動學軌跡衍伸出兩種運動模式進行觀察與實驗，嘗試找出雀類在懸停時、下拍到上拍有最大折曲角度的原因，設計兩種不同運動軌跡，其中一種與真實雀類相似，擁有最大折曲角；另一種則將翅膀上拍時的折曲幅度縮小二分之一。在本研究中將與真實雀類折曲幅度相同的實驗定義為 Case 1，將上拍時折曲幅度縮小二分之一的運動軌跡定義為 Case 2。

在下拍到上拍的過程當中，不同折曲角度會造成不同的空氣動力學變化，根據 Feshalami 等人的研究[11]，隨著翅膀折曲幅度的增加，由於翅膀面積減小，平均升力產生也隨之增加，同時在前向飛行期間輸入的動力也隨之減少。因此在本研究中，可以預期的是在懸停條件下，較小的折曲幅度由於翼面積較大在上拍期間會產生較大的負升力，代表機構產生的總升力較小。

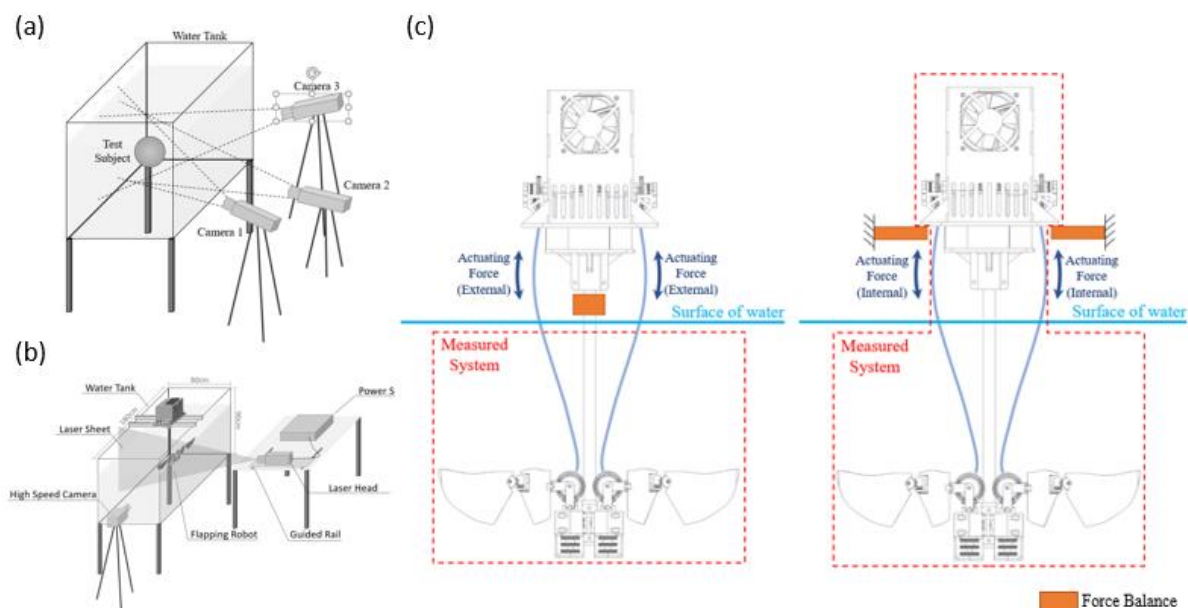


圖 5、(a)動作分析校正實驗架設、(b)PIV 實驗架設、(c)力量測實驗架設

2.4 實驗設備與架設

本研究旨在探討小型雀類拍撲時翅膀折曲幅度大小對於飛行氣動力之影響，整個研究將實驗觀測分成兩個部分，第一個為動作分析，將此雀類拍撲機構放入水箱內觀測其拍撲動作隨時間變化，第二部分為升力量測，藉由升力的變化搭配可視化流場分析，比較當上拍時折曲幅度縮小二分之一時與原始雀類拍撲時有何差別，了解不同折曲角度對於飛行表現的影響。

2.4.1 動作分析實驗架設

在決定本研究機構的拍撲自由度後，需要利用動作分析確認以及證實設計的機構運動學和真實雀類是相對應的，由圖 5(a)可以看出本研究進行拍撲動作分析之設備架設。為了重建該機構的三維運動，使用了直接線性變化(DLT)，建立像點座標以及相對應物點空間座標進而做線性關係轉換，利用轉換式重建三維座標。由觀測箱以及三部 DSLR 相機所組成，拍攝影像之解析度為 1920×1080 pixel，由於拍撲頻率緩慢，因此取樣頻率設為 30 Hz，設計了一個 $150 \times 150 \times 150$ mm³ 校正網格，利用 2 mm 的銅線製作成 64 個立體校正點，進而找出向量 L 和 R。最後利用 Matlab 得到每次機構拍撲的軌跡圖。

由於相機架設於水箱外面，需要考慮折射問題，因此使用直接線性變化增加其精準度。相機拍攝角度由中心線(0 度)開始每 10 度拍一張，本

研究觀察 0 度到 50 度間的變化情形。

儘管在整個實驗過程中，相機都是圍繞校正正立方體，但從圖 6 可以看出當轉動角度越大的時候，正立方體並不會在校正中心，加上折射會導致些微誤差，而這些誤差需要利用直接線性變化進行修正。

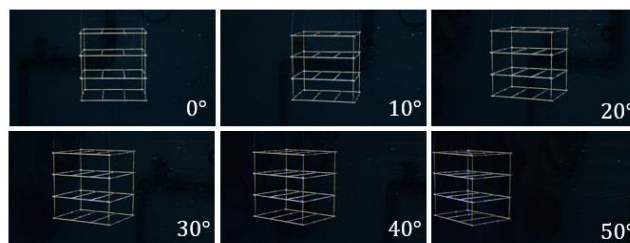


圖 6、相機校正結果

2.4.2 可視流場 PIV 實驗架設

為進行懸停拍撲過程中的流場分析，本研究所架設之 PIV 量測系統圖 5(b)所示，由同一觀測箱搭配雷射系統(Elforlight HPG-5000)與高速攝影機(Photron Fastcam SA-X)所組成拍攝影像之解析度為 1024×1024 pixels，本研究使用 Dr. Thielicke 所寫的 PIVlab [11]進行流場分析計算，PIVlab 具有簡單直觀的圖形用戶介面，提供 PIV 分析以及影像數據整理。

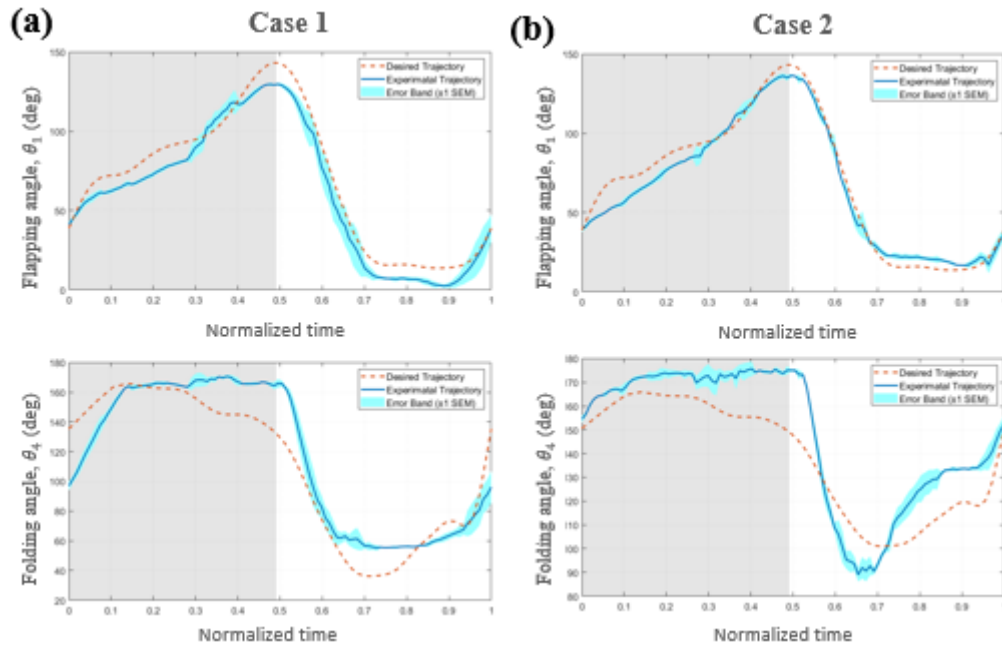


圖 7、(a) case1 拍撲角度、折曲角度隨時間變化圖、(b)case2 拍撲角度、折曲角度隨時間變化圖

2.4.3 力量測實驗架設

在目前的研究當中，升力是我們唯一感興趣的力分量，因此我們使用一維力感測器加上秤重傳感器(HX711)量測垂直分量的力，放大器及取樣頻率分別為 128 Hz 以及 80 Hz。然而本研究升力量測時需要考慮兩個因素，第一個為由於機構在水箱做實驗，而本裝置沒有防水設計因此本實驗在水上操作，第二部分為由於本研究藉由鐵氟龍管帶動機構運轉，為了正確量取升力，力平衡器沒有辦法直接置於機構和底部間，因此選擇使用 4 個支撐每個角的秤重傳感器，由圖 5(c)可以看出本研究控制系統的定義，將整個控制箱包含於被測系統中，使得力平衡量測到的力為整個系統的力變化情形。

三、結果與討論

3.1 運動學分析

在做動作分析時，每一次拍攝都記錄了五個拍撲週期，並只取用中間三組資料做分析。根據動力學相似算出平均計錄頻率為 0.27 Hz，每一次完整拍撲週期定 $T=1$ ，標準化週期間隔 $T=0.1$ 。從實驗資料及文獻資料算出相關係數、平均誤差以及最大誤差。由圖 7 比較出兩個 case 拍撲及折曲角度仿生預期軌跡路線及實驗拍撲軌跡隨時間變化情形，圖片左邊深色部分定義為下拍時，紅色虛線軌跡為預期路線、藍色實線為實驗軌跡路線。本研究根據動作分析結果計算出相關係數、平均誤差和最大誤差，利用以上數據分析此機構是否完整，並分別比較 case1 及 case2 五個自由度下相關係數、平均誤差及最大誤差的差異。

表 1、case 1 及 case 2 相關性與誤差分析

		Flapping Angle	Arm-Sweeping Angle	Twisting Angle	Folding Angle	Hand-Sweeping Angle
Correlation Coefficient	Case1	0.9929	0.9805	0.5151	0.9299	0.9701
	Case2	0.9897	0.9143	0.6042	0.9311	0.9174
Mean Error	Case1	9.53° (7.35%)	14.48° (9.78%)	23.48° (126.15%)	18.57° (14.32%)	19.75° (10.12%)
	Case2	7.12° (5.50%)	26.82° (18.11%)	26.78° (143.91%)	14.47° (22.32%)	17.52° (11.15%)

由表 1 可以看出 case 1 五個自由度除了扭轉角，其他角度都可以達到相關係數大於 0.9 且平均誤差約 10%，不僅表明了此機構可以符合預期的運動，也證實了參考運動學角度(Θ)和馬達角轉動角度(Ψ)之間的運動學轉換是正確的。經過檢查後我們發現其誤差來源主要由於齒輪系統中的反衝，可能因為轉輪的背隙以及鐵氟龍管的變形超過其可以承受的張力而在作用下產生了誤差。另一方面，扭轉角和其他角度相比之下，相關係數較低且誤差較大，較低的相關係數主要是因為這時候由於機翼的倒轉以及旋轉軸位於 1/4 弦位置附近而引起的附加質量效應，導致機翼上的俯仰力矩過高進而導致扭轉角急遽增加。

Case 2 大部分的運動角都和 case 1 顯示的趨勢差不多，但需要注意的為 case 2 的手臂掃角度相關係數稍低且誤差較大，可能因為較小的折曲角度在上拍過程中需要迅速地展開，導致出現了較高的空氣動力學負載，進而抵抗了整個機翼的後掠運動。

總結而言，我們可以從 case 1 和 case 2 的運動學驗證結果得到幾個重點。首先，由於幾乎所有運動角度都具有高度相關性，因此先前得到的運動轉換方程式是正確的。第二個為期望軌跡與實際軌跡路線之間的誤差主要是因為機構的不完美，例如反衝、變形及間隙。第三個為折曲角度的減小導致上拍過程中作用在機翼上的不利力，因為上拍時翼面積較大而擁有較大的阻力，這部分會透過力量測和流場分析做進一步的討論。

3.2 升力分析

儘管 HX711 放大器擁有內置的的雜訊控制，但仍然需要校正及做噪音處理，為了瞭解此力量測系統的特性，先在沒有其他外力作用下量測五分鐘，觀察到飄移現象以及一些雜訊，由於飄移似乎是線性的，因此我們可以使用線性回歸結果及傅立葉轉換(FFT)補償分析過程中的漂移現象。為了確保有效的數據擷取，每個 case 的力量測都分成三個階段進行。第一階段為漂移估計，先量測兩分鐘飄移特徵進而補償偏移。第二階段為測量驗證以及校正階段，我們將已知重量的砝碼放在力平衡上驗證補償是否正確。最後一個階段為拍撲實驗階段，總共拍撲 9 次，並且只取中間五次數據進行平均和分析。從圖 8 拍撲週期總升力分布曲線我們將每次拍撲結果分成四個階段，定義第一階段為：下拍前、第二階段：下拍時、第三

階段：折曲上拍、第四階段：無升力上拍。因為從升力曲線分布我們可以發現第四階段升力幾乎為零，因此我們將第四階段定義為無升力上拍階段。將每次拍撲週期都分成四個階段探討，並搭配 PIV 的結果共同探討不同 case 對於空氣動力學所產生的影響為何。

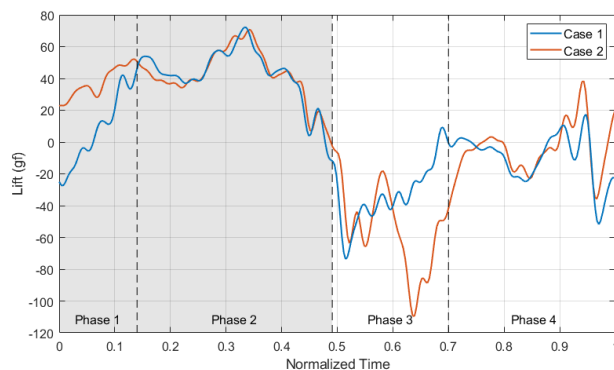


圖 8、升力曲線隨時間變化情形

3.3 拍撲機制討論

本研究將升力量測結果、PIV 可視流場結果及動作分析三者合併分析。首先，第一階段為下拍前，此時的流場由於受到附加質量效應(added mass)或是尾流的影響，造成此階段的流場非常不穩定，從圖 9 可視流場發現 case 1 在一開始只有一點尾流，而 case 2 在此階段卻可以觀察到較大的尾流，且在 $T=0$ 時 case 2 上表面有明顯的 LEV，代表 case 1 會比 case 2 較慢產生升力，雖然可視流場可以看到輕微的向後噴射流，但因為 case 1 折曲角的延伸導致下翼面會往下拍的反方向移動，造成翼面上方流場往下推而產生了負升力。從升力曲線圖 8 可以證實 case 1 在一開始就產生負升力，且以較緩慢的速率增加升力，且由於尾流效應而迅速展開升力，升力漸趨穩定，在此階段 case 2 比 case 1 多了約五倍升力。

第二階段為下拍過程，在此階段兩個 case 擁有幾乎相同的翅膀運動學，其兩個 case 所產生的升力趨近相同，由於拍撲時最大升力在下拍時產生，從圖 8 可以證實升力為整個懸停飛行最主要的升力來源，此階段的升力和真實雀類差不多，平均升力在 case 1 及 case 2 為 42.518 gf 及 42.554 gf，從可視流場圖我們發現在 $T = 0.47$ 兩個 case 在動作轉成上拍時產生了拋翼(clap)現象，向下產生了噴射流，證實了當準備上拍前會有拋翼現象增加升力。

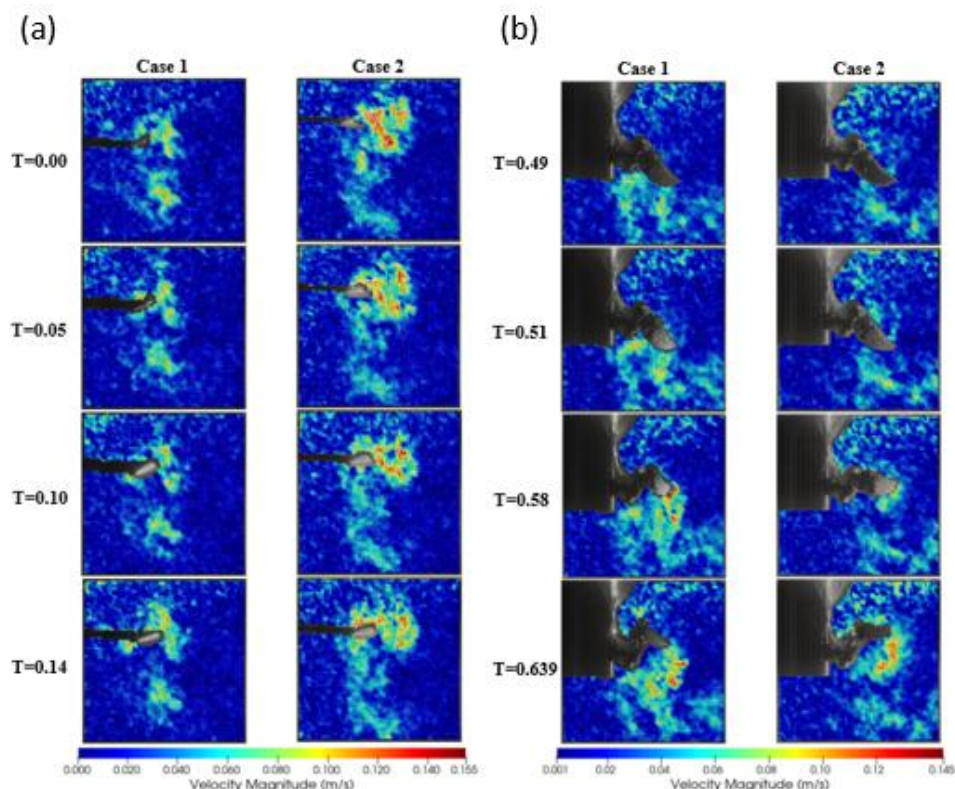


圖 9、(a) case 1、case 2 第一階段可視流場圖、(b) case 1、case 2 第三階段可視流場圖

第三階段為折曲階段，也是本研究中兩個不同 case 主要的差異階段，本研究預期 case 1 由於上拍時折曲較大、面積較小會產生較小升力，首先從動作分析發現在 $T=0.58$ 時 case 1 開始折曲而 case 2 還沒有開始，從圖 9 發現由於 case 1 開始折曲在翼面下方產生向上的噴射流，而擁有比 case 2 低的負升力，且 case 2 在下翼面產生較大的低壓區，由於 case 2 在下拍時折曲較小擁有較大的翼面積，在快速掃回及俯仰運動期間，在翅膀下方產生了大的低壓區域，而導致周圍流場向內及向上產生了預期的負升力。從圖 8 升力曲線也證實上拍時 case 1 有較小的負升力產生，此階段 case 1 及 case 2 平均升力分別為 -32.535 gf 和 -54.260 gf，case 2 產生的負升力約為體重的兩倍。PIV 及升力量測結果都跟預期一樣。

第四階段為無升力上拍過程，case 1 和 case 2 產生的升力都比其他階段來得低，在 $T=0.7$ 到 0.8 間，case 2 就開始無折曲，比 case 1 較早開始展開翅膀，由圖可以看出產生一些負升力，也導致了之後下拍過程中升力的產生，而 case 1 在此階段幾乎沒有產生升力，因為兩個 case 在接近拍撲週期結束時翅膀會快速往後移動準備下一秒的下拍，因此從圖 8 接近週期結束階段可以觀察到升力的浮動。

四、結論

本研究致力於多自由度拍撲機構的研究，旨在探討鳥類翅膀在不同的折曲角度下會有什麼影響。在準備過程中，由參考文獻中的翅膀運動學透過數學轉換以及基因演算法(GA)設計本研究之拍撲機構。首先，由機翼拍撲運動學結果可以發現幾乎所有角度的相關係數都超過 0.9 且大部分角度下的平均誤差都小於 20%，這個結果表示本研究在數學轉換式是正確的。其中的誤差來自於翅膀的剛度使得每個自由度在負載下會有些微的旋轉。

從升力量測結果可看出，真實鳥類拍翅動作所得到的平均升力，反而較縮小折曲角的對照組低了 8%，但是其在動作過程中的能量損耗較對照組(case 2)低了 23%，亦即代表了較優異的飛行效率。從流場分析結果中即可看出 case 2 在上拍時因為折曲小、翼面積較大，在翅膀折曲階段會在下方產生較大的低壓區，因而在上拍期間產生較大的阻力與負升力。阻力的產生導致其所需的能量供應相對提高；負升力的產生也使得 case 2 雖然有較高的平均升力，但是在整個拍撲週期的升力波動也是較明顯的，上述現象都將不利於維持懸停動作。

本研究開發出具多自由度並可於水下操作的仿鳥類拍撲機構，可由飛行動作分析成果為基礎，將飛行運動參數對飛行特性的影響融入仿生飛行載具之設計，並可根據環境流體的不同，適用於不同尺度的仿鳥類拍撲動作之研究，提供具工程應用與學術創新之仿生飛行器設計參考。

致謝

感謝成功大學航太系張克勤教授團隊所借用之雷射與高速攝影機；感謝科技部給予經費上的補助與支持(計畫編號：MOST 108-2221-E-006-067-MY2)

參考文獻

- [1] D. A. Reay, *The History of Man-Powered Flight*. Elsevier Science, 2014.
- [2] B. K. van Oorschot, E. A. Mistick, and B. W. Tobalske, "Aerodynamic consequences of wing morphing during emulated take-off and gliding in birds," *Journal of Experimental Biology*, vol. 219, no. 19, pp. 3146-3154, 2016.
- [3] I. G. Ros, M. A. Badger, A. N. Pierson, L. C. Bassman, and A. A. Biewener, "Pigeons produce aerodynamic torques through changes in wing trajectory during low speed aerial turns," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 218, no. 3, pp. 480-490, 2015.
- [4] B. F. Feshalami, M. Djavareshkian, M. Yousefi, A. Zaree, and A. Mehraban, "Experimental investigation of flapping mechanism of the black-headed gull in forward flight," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, p. 0954410018819292, 2018.
- [5] T. Van Truong, D. Byun, M. J. Kim, K. J. Yoon, and H. C. Park, "Aerodynamic forces and flow structures of the leading edge vortex on a flapping wing considering ground effect," *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 8, no. 3, p. 036007, 2013.
- [6] L. Y. Jen, "Aerodynamics of Three-Dimensional Flapping Wing," Doctor of Philosophy, National University of Singapore, 2017.
- [7] Y. Lu and G. X. Shen, "Three-dimensional flow structures and evolution of the leading-edge vortices on a flapping wing," *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, no. 8, pp. 1221-1230, 2008.
- [8] J.-s. Han, J. W. Chang, J.-k. Kim, and J.-h. Han, "Role of trailing-edge vortices on the hawkmothlike flapping wing," *Journal of Aircraft*, vol. 52, no. 4, pp. 1256-1266, 2015.
- [9] J. W. Bahlman, S. M. Swartz, and K. S. Breuer, "Design and characterization of a multi-articulated robotic bat wing," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 8, no. 1, p. 016009, 2013.
- [10] 章聿珩, "運動學參數對鳥類拍撲翼之升力影響," 機械工程學研究所, 臺灣大學, 2010 年, 2010.
- [11] W. Thielicke and E. Stamhuis, "PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB," *Journal of Open Research Software*, vol. 2, no. 1, 2014.