

仿生飛行研究及其工程應用之發展

葉思沂¹、陳威瀚¹、楊鏡堂²

¹ 國立成功大學航空太空工程學系

² 國立台灣大學機械工程學系

● 仿生飛行起源與發展

想飛，想在湛藍的天空下遨翔，這一直是人類的夢想；想要飛得更高、更遠、更快、更靈活，也是航太工業能夠快速發展的重要動力。人類歷史紀錄上第一次試圖進行飛行嘗試與飛行器設計，是十五世紀文藝復興時期由著名的大師李奧納多·達文西（Leonardo da Vinci）所繪製的一系列工程圖稿 ornithopter (如圖 1)，以大型鳥類以及蝙蝠為設計靈感，再加上了不同於鳥類羽毛的翅膀薄膜與結構骨架設計，以及可將外力踩踏的動作轉換成翅膀拍動的滑輪與連桿機構。雖然目前沒有相關證據可以證明從文藝復興時期人類即開始進行飛行器的建造，但達文西的這份手稿已超越發想的階段，試圖將飛行的夢想以工程的方式進行實踐。

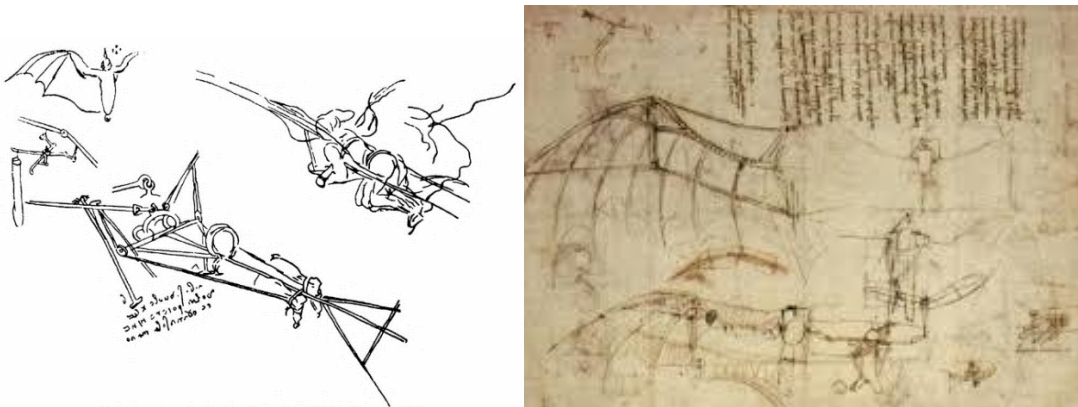


圖 1、達文西設計之拍撲飛行器手稿(Reay, 2014)

生物的拍撲飛行動作，並不是單純的往復運動，包含了相當複雜的拍動角度變化與姿態控制，背後其實運用了相當複雜的飛行機制與空氣動力學原理，飛行器設計與操控門檻都相當高，也因此人類在經過一陣子的嘗試後，英國航空之父喬治·凱利(Sir George Cayley)提出了固定翼的飛行器設計概念，經過德國滑翔翼大師奧托·李林塔爾(Otto Lilienthal)的持續努力，最後由萊特兄弟(Wright brothers)在 1903 年實現了人類歷史上首次可控的載人動力飛行，為飛行器的實用化奠定了基礎，並帶動了以固定翼飛行器為主要設計概念的航空工業發展。固定翼飛行器在經過一個世紀多的發展後，相關的空氣動力學理論、飛行操控技術等等都已經相當成熟，從可遠端操控的各型無人飛機、小型的單座特技飛機，到可乘載數百人的大型越洋客機、速度可達數倍音速的協和號與各式軍用戰機，現今固定翼飛行器已可適用於多種飛行速度與不同任務需求，目前設計上更多的考量轉變為成本與效益的搭配。

近年來，著眼於軍事偵察、特殊的惡劣環境探勘與搜救等更廣泛的無人機應用需求，美國國防部高等研究計畫局(U.S. Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在1997年提出微飛行器(Micro aerials vehicles, MAVs)設計概念，開始進行相關研究計畫。根據DARPA定義，微飛行器的翼展尺寸約為15公分，飛行速度為10-20 m/s，在這個尺度下所計算出的雷諾數(Reynolds number)將小於 10^5 ，而在此低雷諾數範圍內的流體，將由於邊界層內的流動動量不足，難以克服翼型尾部的逆壓梯度，容易在機翼表面產生分離泡(separated bubble)，進而有層流分離的現象發生，降低升力的同時也會引起飛行的不穩定Ol, McCauliffe et al. (2005)。此外，較低的升力也意味著飛行操控性能將受到限制，這對於機動性要求很高的微飛行器設計目標來說，亦較為不利。

自然界中的飛行生物主要可分為昆蟲、鳥類以及哺乳類中的蝙蝠等三大類，儘管他們的尺寸與外表型態有很大的差異，但都同樣的使用拍翅飛行的方式，並都具有快速起降與高機動性的飛行特點。這不僅僅是物競天擇的結果，在學理上，當雷諾數較小時，固定翼飛行器的空氣動力性能將大幅降低，但是自然界中的飛行生物，能因應不同的氣流主動改變其翼面拍撲方式，在最省力的狀況下提供足夠的升力，除了可以穩定的飛行外還可以做出懸停、急轉彎、快速起飛等困難的動作，更可以隨著週遭環境變化與飛行目標採取不同的飛行策略。因此隨著對於微飛行器的需求逐漸加重，研究飛行生物飛行機制的「仿生學(Biomimetics)」成為近年來的熱門研究主題，解開生物操控飛行的靈活技巧之謎將更有助於提升無人飛行載具的應用領域，促進航太工業的發展。

拍翅飛行與定翼飛行最大的不同在於，翅膀拍撲所產生的力，即使是在穩定前飛的過程，仍然在整個拍翅動作週期隨著時間而改變，也就是屬於非穩態(unsteady)；而固定翼飛行在穩定前飛的狀態下，則有穩定的升阻力大小與方向，是穩態(steady)的，也因此拍翅飛行的分析與操控都相當困難。另外，拍翅飛行的主要特點，是由翅膀的拍撲同時進行飛行速度與飛行方向的控制，不像傳統固定翼飛行器，由推進系統產生推力，再由機翼產生向上的升力。生物藉由控制翅膀的拍翅頻率、翅膀角度與拍翅軌跡等等，讓所產生的空氣作用力分解後得到前進方向以及重力反方向等兩個分量，即為飛行時所需之推力與升力，也因此詳細探討各種飛行生物的飛行動作與對應的飛行機制，是仿生飛行研究的第一步，從觀察生物得到啟發進而模仿生物特長，方能開發出更高效能的工程應用。

如果有人問到：「鳥是怎麼飛的？」任何人都會回答因為有翅膀拍打空氣所以可以飛之類的答案，但如果將問題延伸成：「鳥是怎麼利用翅膀拍打空氣所以可以飛？」那這問題就難倒大部分人了，因為受限於人類肉眼的極限，常人無法看清楚鳥類拍翅的動作，更不用說想知道拍翅時的軌跡、速度等重要參數。因此仿生飛行的相關研究上，大多以高速攝影機或高擷取頻率的感測器進行飛行動作的解析，近年來再搭配使用粒子影像測速儀(particle image velocimetry, PIV)進行相對應的流場分析，探討所產生的空氣動力學現象，並了解不同飛行生物在不同條件下的飛行機制(章聿珩，2010；蘇健元，2013)。

● 仿生飛行空氣動力學及飛行機制

鳥類、昆蟲與蝙蝠三種飛行生物的翅膀型態與尺寸有相當大的差異(如圖 2)，也因此拍撲飛行的動態與機制上也有所不同。鳥類的翅膀由肌肉及羽毛所覆蓋，並且有多個關節來控制翅膀的姿態，拍翅過程中除了翅膀的上下拍動外，關節處也會有折疊及旋轉等動作以達到較佳的飛行性能(Chin and Lentink, 2016)，近年來，亦有相關研究探討鳥類羽毛在飛行過程中的變化，以及其相對應的空氣動力學效應(Feduccia and Tordoff, 1979; Wu and Popović, 2003)；昆蟲與蝙蝠的翅膀雖然都是薄膜狀，但在結構型態上仍有很大的不同，昆蟲的翅膀上有縱橫交錯的翅脈，翅脈實際上是翅面在氣管部位加厚形成的，就像骨架一樣有支撐及加固的作用，也與飛行時翅膀的扭轉運動有關，昆蟲綱有超過一百萬種的生物，因此在翅膀結構上每一種昆蟲都有獨特的脈相分布，有的昆蟲翅脈細密，如蜻蜓、蜉蝣、草蛉等，也有的翅脈稀少，如蠅類，而在翅膀類型上，又根據前後翅不同程度的骨化或退化，而有不同的飛行方式，但因為昆蟲的翅膀沒有羽毛與肌肉等結構，相對鳥類更易於利用工程方式實現，也因此有相當多的研究探討不同昆蟲的飛行機制(Sane, 2003; Shyy, Kang et al., 2016)，此外昆蟲的飛行方式與翅膀結構，也是目前多數為飛行器的設計參考對象；蝙蝠的飛行器官稱為翼手(不是翅膀)，由指骨末端至肱骨、體側、後肢及尾巴之間的柔軟而堅韌的翼膜形成，翼膜有很好的彈性與伸展性，可根據翼骨的折疊伸展而改變其形狀，在拍撲過程中隨著來流而變形產生足夠的飛行升力，以及操控姿態的能力，而由於翼骨相互連接的關節多達數十個，因此蝙蝠飛行過程中的翼面自由度也高達數十個，蝙蝠飛行機制的相關研究與微飛行器的研發重點即為多個自由度運動設計與操控(Ramezani, Ahmed et al., 2017; Ramezani, Chung et al., 2017)。以下將分別說明三種飛行生物在飛行機制與相關空氣動力學的研究發展。

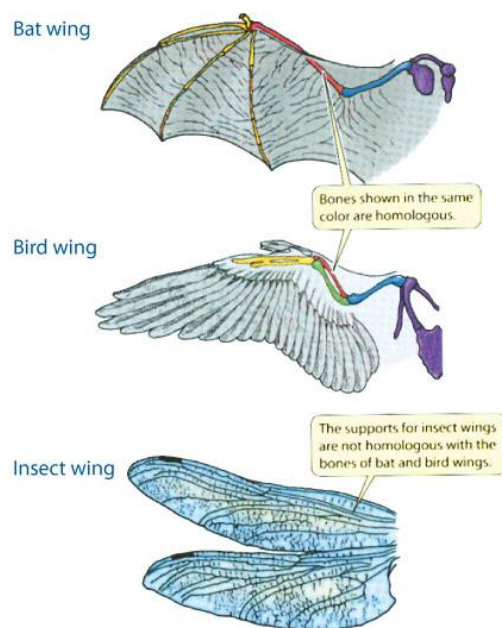


圖 2、三種飛行生物翅膀構造圖(Gilbert and Barresi, 2016)

鳥類的飛行

希臘哲學家亞里斯多德(Aristotle)曾留下許多觀察鳥類飛行後，對於鳥類飛行原理的假說，雖然亞里斯多德的理論與現今我們所了解到的仿生飛行知識有一段差距，但這是文獻記載中最早開始的仿生飛行研究。隨著近代高速攝影技術的發展，人類得以精確的觀察鳥類飛行，並利用多台正交架設的高速攝影機，得到三維的飛行數據，其後配合近代流體力學量測技術的進展，將鳥類飛行的研究延伸到流場分析，利用粒子影像測速儀(PIV)來追蹤鳥類飛行的尾流區流場，以此分析飛行動作和流體之間的交互關係。

最早期的鳥類飛行機制的相關研究，仍以廣泛應用於定翼機機翼的葉素理論(Blade-Element Theory, BEM)和動量定理為主，計算鳥類飛行過程中的升力、阻力與消耗功率(Norberg, 1990)。使用葉素理論需要知道翅膀的不同位置翼剖面在運動過程中的實時運動速度與攻角，以及不同翼剖面所對應的升、阻力係數，然而鳥類拍撲過程中翅膀的形態變化與相關運動學參數變化相當複雜，鳥的翅膀是由上臂、前臂和掌所構成，骨骼則是由肱骨(humerus)、尺骨(ulna)、徑骨(radius)與拇指(alula)阻成，各部位均有關節，可藉由骨骼與肌肉主動控制翅膀的動作，翅膀可分成五個可動部位做到伸展、摺疊與收攏等各種多樣動作。此外早期的這種研究方式僅能得到氣動力與能耗的變化，仍無法得知鳥類飛行過程中，翅膀是如何與周圍氣流交互作用而產生足夠氣動力。

鳥類翅膀的拍撲主要由三種動作所組成，拍動(flapping)、扭轉(twisting)與摺疊(folding)。利用這三種動作的交互配合，鳥在飛行過程中可以不斷改變攻角、翼面形狀與翼表面積，藉此達到最有效率的飛行模式。一個拍撲飛行週期分成上拍(upstroke)與下拍(downstroke)，當鳥類翅膀下拍時會將整個翅膀展開，以對地座標而言是同時向前方與下方拍打，由此產生相對風(如圖 3)；當鳥類翅膀進行上拍動作時，部分外翼內摺，以對地座標來看，此時相對風由前上方而來，並會在外翼部分產生些許阻力，由於上拍時初級飛羽會張開形成縫隙，進而降低翼面積，故可減少外翼部分的阻力。故以力學分析來看，鳥類的外翼主要提供推力、內翼則提供升力(Alexander, 2004)。

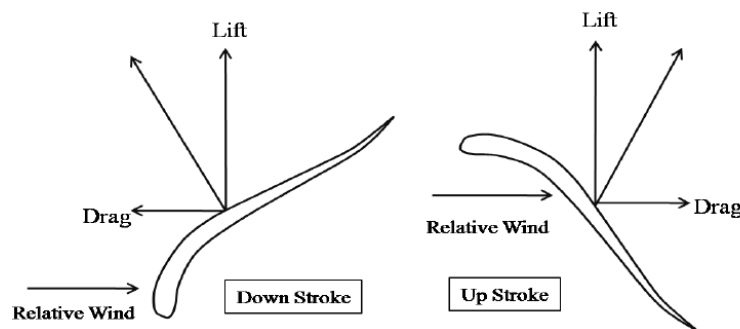


圖 3、鳥類撲翼之相對風現象(Alexander, 2004)

而由於鳥類在飛行過程中，包括起飛、懸停與轉彎等等各種不同飛行模式又都有因應的不同飛行動作，無法以一貫通的飛行機制進行說明，因此科學家們開始在設計好的環境下(譬如風洞)，進行各種特定飛行動作的流場分析，並利用飛

行尾流區流場以及對應的渦量(vorticity)動力學，來探討鳥類拍撲動作。南加州大學(University of Southern California, USC)的 Geoffrey Spedding 研究團隊，系統性的觀測了夜鶯(Spedding, Rosén et al., 2003)、知更鳥(Hedenström, Rosén et al., 2006)、雨燕(Henningsson, Muijres et al., 2010)、斑鷓(Muijres, Bowlin et al., 2012)等不同鳥類在不同飛行速度下，尾流區渦流結構發展。結果顯示，在較低飛行速度，尾流區主要流場結構為多對的渦旋環，下拍時會產生直徑較大、環流量(circulation)較大的渦流，上拍則會產生較小較弱的渦流；而在較高飛行速度，尾流區可觀察到兩個由左右翼尖產生的流向渦旋(stream-wise vortex)以及連接兩個渦旋的展向渦旋(span-wise vortex)，流向渦旋的環流量沿軸線呈現周期性的變化，兩個流向渦旋的間距和垂直位置也為周期變化，藉由這些渦流的分析，可以解析鳥類拍撲過程中，上拍與下拍各自所產生的升阻力變化。

近年來，更多的研究工作著重於翅膀在拍撲過程中的形態學變化和運動學參數的詳細量測，以及對應的翅膀周圍流場，進而進行更多飛行力學與飛行機制的探討與分析，台灣大學楊鏡堂教授的研究團隊多年來即致力於鳥類拍撲飛行機制的相關研究。以鳥類的懸停動作為例，實驗觀察到綠繡眼、胡錦、錦花和紅梅花雀等在懸停飛行時，翅膀下拍末期都有胸前翼拍擊的行為，並根據 PIV 量測結果與對應的升力分析(如圖 4)，詳細解析整個懸停飛行過程中的拍撲動作與空氣動力學機制。整個主要產生升力的下拍過程可以分成三個相位(如圖 5)，相位一時，兩翅膀的翼前緣開始接近彼此，從鳥身體正面的角度，可以發現強烈的翼前緣渦流(leading-edge vortices, LEV)產生於翼兩側，此渦流結構被視為增強升力，使鳥翅膀上拍時即便處於無升力狀態，身體可持續停留在空間的主因之一。此對稱渦流於兩側的旋轉方向剛好相反，並會持續流到翼後緣，成為翼後緣渦流(trailing-edge vortex, TEV)。在第二相位，翅膀持續往下拍並靠近彼此，翅膀的攻角同步迅速增加，因此兩側翅膀前緣上游、靠近身體處的位置產生一個微弱的向上噴流。在這段過程中，翼前緣渦流持續附著於兩側翼前緣且強度比先前更大，渦流環結構變得明顯，同時兩側翅膀中央、渦流環中間開始產生向下噴流。第三相位時，兩翅膀於鳥胸前拍擊且兩側翼後緣也碰觸到彼此，由於翅膀之間的空氣因翅膀碰觸壓縮，急速增加的空氣壓力使得於第二相位產生的向下噴流更為強大，並於翅膀碰撞的那刻產生極強大的瞬時升力(Chang, Ting et al., 2013)。此種鳥類飛行機制的研究方式為近年來的研究主流，亦可確實幫助對於鳥類拍撲飛行的了解，可由更多文獻中發現更多有趣的研究成果(Chin and Lentink, 2016)。

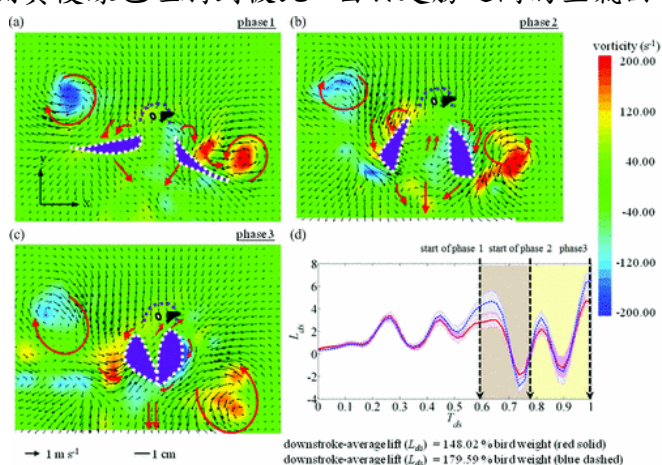


圖 4、小型鳥類懸停下拍之流場與升力變化 (Chang, Ting et al., 2013)

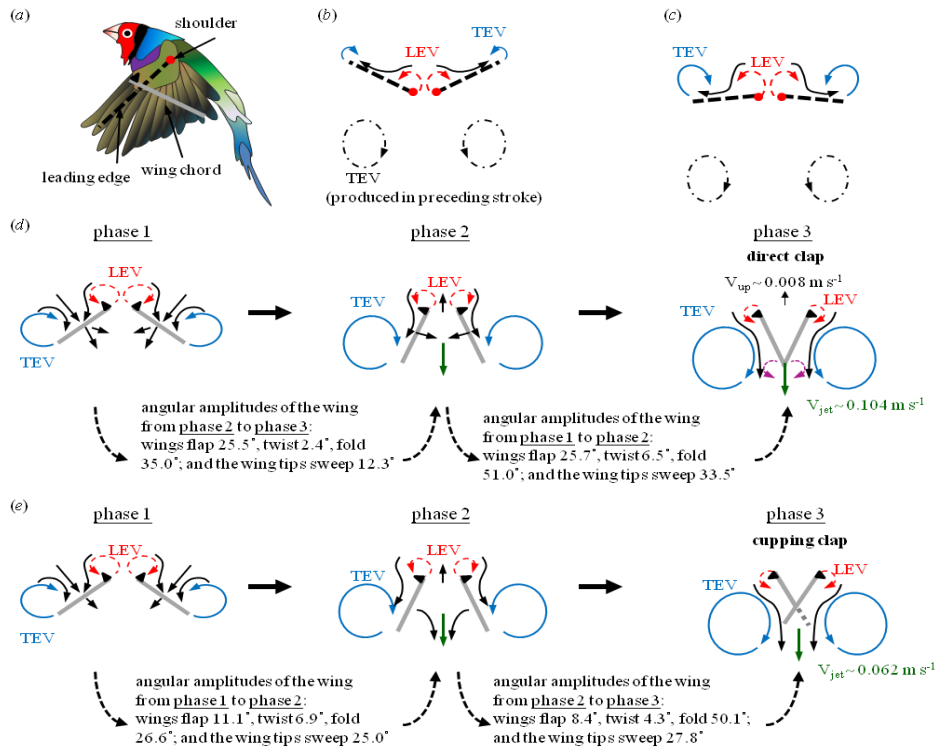


圖 5、小型鳥類懸停飛行機制分析(Chang, Ting et al., 2013)

昆蟲的飛行

昆蟲的翅膀構造與鳥類有很大差異，翅膀本身由翅脈及附著其上的薄膜所構成，沒有骨骼與關節控制翅膀的型態，僅以肌肉群直接或間接從翅膀根部控制整個拍撲動作。大多數昆蟲的拍撲過程中，拍動平面與身體的夾角是固定的(果蠅即為其中一個常見的例外)，所以在早期的昆蟲飛行氣動力的研究是以旋翼或螺旋槳的概念來進行，也就是以翅膀的拍撲頻率以及拍動角度來計算翅膀速度後，用葉素理論以及動量方程式來進行升阻力與能耗的推算，但由於昆蟲的翅膀面積相對鳥類來說較小，這樣的估算結果所得到的升力，遠遠不及昆蟲的身體重量，因此許多學者試圖用非穩態的理論模型來解讀昆蟲拍撲過程的空氣動力學機制。

最早為人熟知的昆蟲拍撲機制是夾翼與拋翼(clap and fling)，是 Weis-Fogh (1973) 研究一種蜂類時所提出的升力機制，又稱為 Weis-Fogh 機制，可用來解釋昆蟲如何在飛行時產生足夠升力。圖 6 中黑點為翼前緣；藍色粗線為空氣作用力；藍色細線為誘導氣流。圖中 A-C 為夾翼動作，部份昆蟲會在上拍結束時，將兩翼翼面背側從翼前緣開始貼合至翼後緣，將兩翼間空氣擠出，給予昆蟲額外推進力。在夾翼結束後，翼後緣不動而先將翼前緣分離，這即是第二階段的拋翼動作(圖 6D-F)，拋翼動作結束後(圖 6G-I)，兩翼間會產生低壓區，氣流大量注入，迅速增加環流量，有助於翅膀產生升力(Sane, 2003)。由於不是所有的昆蟲都有夾翼與拋翼的動作，因此在經過數十年流場技術與數值模擬技術的進展下，陸續有學者提出不同的暫態空氣動力學機制，用以解釋不同昆蟲的拍撲飛行機制，例如延遲失速(delay stall)、尾流捕獲(wake capture)、翅膀旋轉(wing rotation)等等(侯祠軒，2017)。

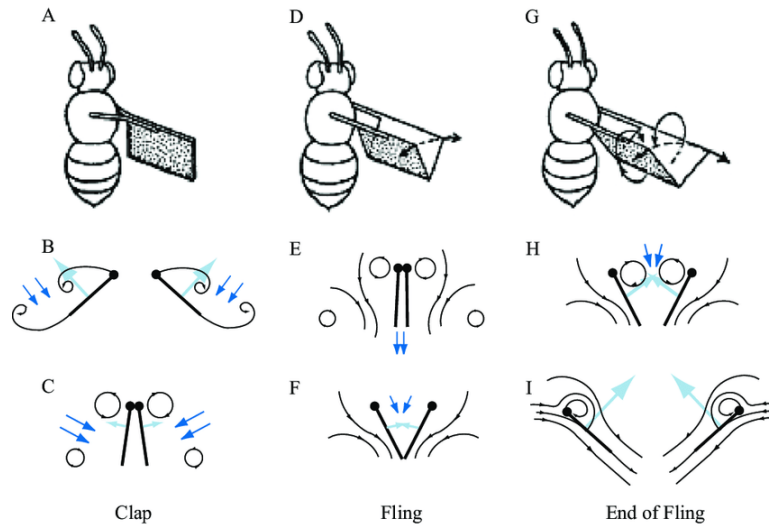


圖 6、夾翼與拋翼示意圖(Sane, 2003)

其他各種昆蟲拍撲飛行機制中，被公認最廣泛存在的是由翼前緣渦流貼附現象所產生的延遲失速機制，一般定翼機在當飛行攻角超過 15° 時，即可能發生失速的現象造成升力頓減，然而，觀察昆蟲的拍撲飛行姿態可以發現，翼面往往處於高攻角狀態卻並未有失速的情形。有研究學者利用仿菸草蛾拍撲機構(Ellington, Van Den Berg et al., 1996)，在翼根施放染色煙霧做流場可視化實驗中，可看到當機構開始拍撲時，翼前緣有渦流迅速產生，而隨著拍撲動作，渦流尺寸開始增大並在翼面上逐漸維持在穩定大小，直到下一個拍撲週期動作轉換時方才脫離翼面(如圖 7)，LEV 形成的低壓區可以給予翼面飛行時足夠的升力。

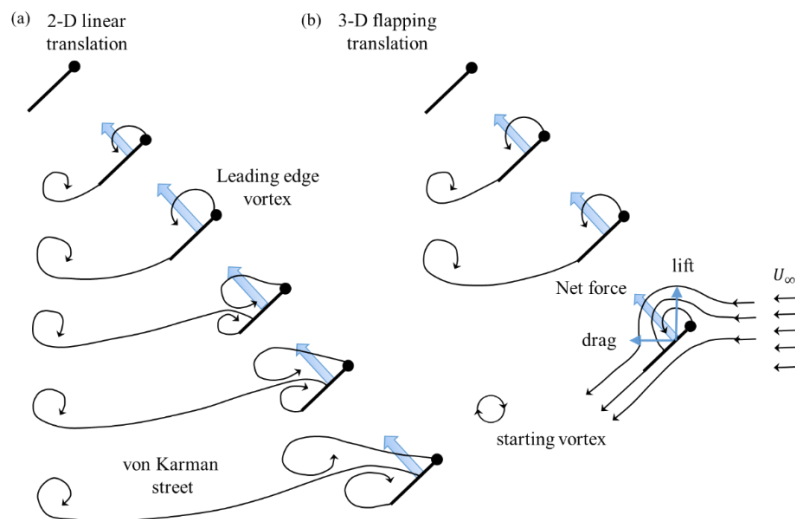


圖 7、翼前緣渦流貼附現象示意圖(Sane, 2003)

而關於 LEV 能夠穩定貼附的機制，陸續有相當多的學者提出各種解釋，譬如拍撲飛行時所產生的展向流(span-wise flow)能夠將環流量帶至翼尖，避免 LEV 成長過快而脫離翼面(Ellington, Van Den Berg et al., 1996)；或者也有因為翼前緣渦流會連接翼尖渦流和翼後緣渦流形成渦流環，由翼尖渦流幫助翼前緣渦流貼附

的說法(Shyy, Trizila et al., 2009)。近年來的最新研究則指出，LEV 的貼附現象與側向氣流(展向流)無關，而 LEV 受到的側向拉伸有關，因此與翅膀的展弦比、飛行時的雷諾數(Re)等參數有關，有學者重新整理拍撲飛行的動量方程式後，提出了三個對翼前緣渦旋的穩定性有所影響的無因次參數(Lentink and Dickinson, 2009a; Lentink and Dickinson, 2009b)：角加速度數(angular acceleration number)、向心加速度數(centripetal acceleration number)以及羅斯貝數(Rossby number, RO)。儘管翼前緣貼附的現象已經被普遍發現存在於昆蟲拍撲飛行動作中，但相關的理論機制與各無因次參數及氣動力現象的關聯仍有待進一步的探討。

昆蟲的拍撲飛行動態，在接近每一個拍撲結束的階段，昆蟲翅膀都會延著翼展方向旋轉，讓上拍和下拍的過程中，攻角都保持正值，使升力持續產生，這個動作稱之為翅膀旋轉(wing rotation, 圖 8A)，亦是一個特殊的飛行機制(Dickinson, Lehmann et al., 1999)；另外，透過往復的拍撲動作，翼面會與前一個拍撲所遺留的渦旋，亦即所謂的尾流產生交互作用(wing-wake interaction, 圖 8B)，都同樣有增強升力的效果(Lehmann, 2008)。研究昆蟲飛行機制最特別的一點即是在於，昆蟲綱有近百萬種可以飛行的物種，體型大小以及拍翅速度的差異也極大，因此目前已知的各種空氣動力學機制並非是每一種昆蟲都具有每一種飛行機制，不同的昆蟲拍撲飛行方式，會由不同的數種飛行機制結合而成，同一種昆蟲在不同的拍撲週期中，也會利用不同的空氣動力學機制(圖 9)，如何從中找到適用於設計目標的飛行機制，就有賴對於各種飛行機制了解後的靈活運用。

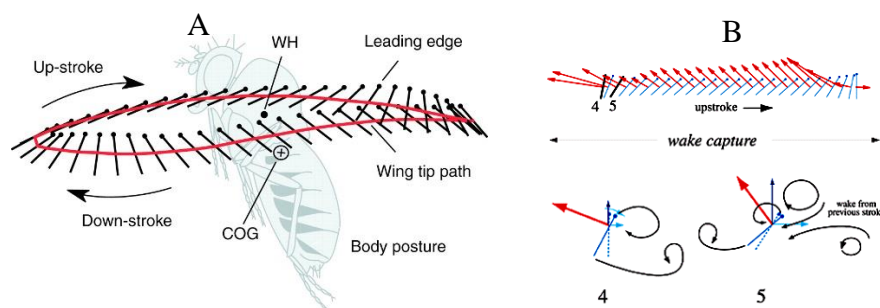


圖 8、翅膀旋轉(A)與尾流捕獲(B)示意圖(Sane, 2003; Lehmann and Pick, 2007)

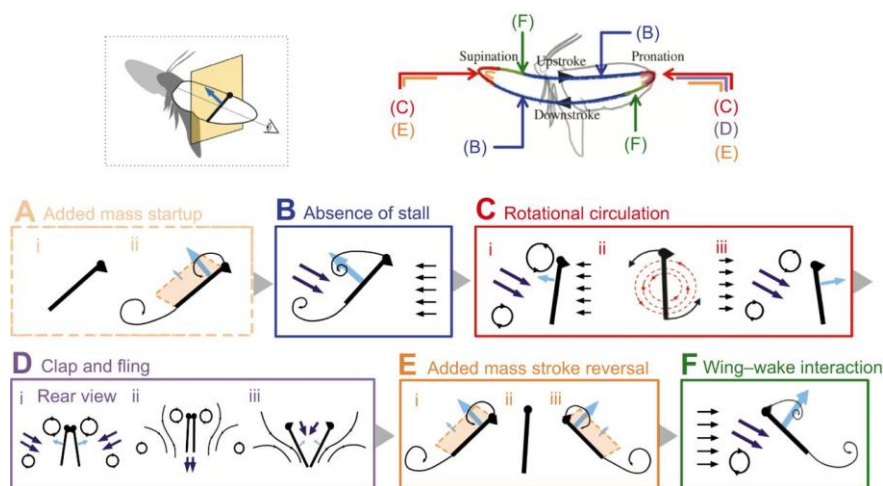


圖 9、各種昆蟲拍撲飛行空氣動力學機制示意圖(Chin and Lentink, 2016)

蝙蝠的飛行

蝙蝠是唯一能飛行的哺乳類動物，與鳥類同樣為飛行的脊椎動物，但是由於演化到飛行的途徑與鳥類大不相同，雖然兩者體型與飛行時的雷諾數相當，但是蝙蝠在翅膀結構與飛行型態上都與鳥類有很大的差異。蝙蝠因為沒有羽毛，飛行時主要藉助兩翼上的翼膜來產生升力，翼膜依附在纖細修長的翼骨上，有很好的彈性可以折疊或延展。翼膜由薄膜般的肌肉和彈性組織及外面的皮膚構成，薄膜狀的肌肉使翼膜平滑而形成特殊翼面，飛行時，翼膜需要一定的張力維持其形狀。蝙蝠每次拍撲時，翼膜和翼骨都會隨時改變形狀，因此雖然翅膀的拍撲模式類似昆蟲(特別是黃蜂)，但是所產生的氣動力效應卻較昆蟲更為複雜。蝙蝠拍撲飛行動作的幾個主要特徵為，蝙蝠翼與身體側邊完全相連(如圖 10)，這種構造使得蝙蝠翼不能像鳥類和昆蟲一樣自由旋轉，有特定自由度的限制，另外在飛行時，蝙蝠可以利用腳的上下擺動，影響翅膀的有效攻角(因為腳也跟翅膀連在一起)，這是昆蟲和鳥類做不到的一個特點；蝙蝠翼具有多骨骼和關節結構，整個翅膀的變形有高達 40 個以上的自由度；特殊的翼膜結構使得拍撲飛行過程中翼剖面的變形也相當大，因此整個翅膀的變形包含了骨骼控制的主動大變形和翼膜的被動變形(余永亮，2018)。

蝙蝠拍撲飛行的研究比鳥類起步晚，但擷取了鳥類研究中所得到的經驗，在近年來有快速的進展，瑞典隆德大學(Lund University)Anders Hedenström 研究團隊發表相當多蝙蝠飛行的研究成果，該團隊並與前述擅長鳥類飛行尾流研究的 Speeding 研究團隊有長期的合作關係，兩研究團隊使用了相同的設備、類似的實驗技術與分析技巧，因此對於鳥類與蝙蝠的飛行機制異同有相當多精彩的比較與探討(Hedenström, Johansson et al., 2007; Hedenström and Johansson, 2015)。該團隊的實驗結果顯示，在低速飛行時蝙蝠的翅膀兩側皆會產生一個渦流(與鳥類不同)，而高速飛行時的尾流則與鳥類相似(Hedenström, Johansson et al., 2007)，這是因為鳥類在飛行時兩翼後側分別產生的渦流發生合併，是為了盡可能地減少飛行中產生的擾動和身體後方的拉力；而蝙蝠膜狀翼後方產生的渦流不會合併，兩翼基本保持獨立運行，儘管這樣會減少空氣作用力的效率，但會使蝙蝠具有更高的機動性進行快速轉彎等動作(Hubel, Riskin et al., 2010; Muijres, Johansson et al., 2011)。

近年來關於蝙蝠飛行機制的相關研究，得到了中小型蝙蝠拍翅產生的渦流結構比鳥類複雜、蝙蝠翼下拍過程能產生正升力、以及蝙蝠中低速飛行時，必須考慮非穩態空氣動力學的影響這三點共同的結論，但是在高升力和推力機制上尚未有所共識，有的認為是由下拍過程的起始渦(starting vortex)和終止渦(stopping vortex)產生高升力(Hedenström, Johansson et al., 2009)；有的認為是由蝙蝠翼下拍

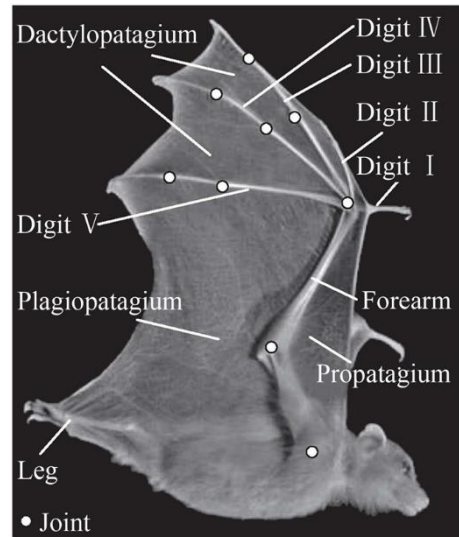


圖 10、蝙蝠翼骨骼、關節與翼膜結構(Taylor, Carruthers et al., 2012)

時翼尖渦流(wing-tip vortex)和反向的根部渦流導致的高升力(Hubel, Breuer et al., 2008)；有的認為是翼前緣渦流(LED)所導致的(Muijres, Johansson et al., 2014)；也有認為上拍過程可以產生推力的相關研究(Hedenström, Johansson et al., 2007)。造成這麼多分歧的主要原因即是關於蝙蝠拍撲飛行過程中，相較於其他飛行生物，更大的翅膀變形效應以及更複雜的變形調控機制，皆尚未能夠被完全解析所造成的，也因此目前許多研究團隊嘗試導入流固耦合的數值模擬研究結果，或者是設計開發仿蝙蝠飛行機構來進行更深入的氣動力機制的探討。

● 仿生拍撲飛行器發展

從希臘神話中著名工匠代達羅斯 (Daedalus) 為他的兒子做了一對翅膀，以及達文西繪製的人力撲翼飛機的工程圖等等，都可以看出人類對於像生物一般飛行的渴望，而隨著對於生物飛行機制的更多了解、工程技術的發展，以及對於飛行器更多應用層面所產生的微飛行器設計開發需求，有相當多的學研單位、科技公司甚至是國防研究單位陸續投入仿生拍撲微飛行器的研發，目前亦有相當豐富的成果，以下將介紹其中較為知名的數個工程研究團隊。

喬治亞理工研究院(Georgia Tech Research Institute, GTRI)

GTRI 為美國喬治亞理工學院(Georgia Institute of Technology)設立之非營利研究機構，該機構所屬教授 Robert C. Michelson 自 1997 年開始發表撲翼飛行器 – Entomopter(圖 11)之相關研究(Michelson, Helmick et al., 1997)，後因其在火星探測的領域有極大發展潛力，使其在研究期間獲得美國國防高等研究計畫署(DARPA)、美國空軍研究實驗室(AFRL)及美國國家航空暨太空總署(NASA)等單位的計劃支持(Michelson, 2008)。



圖 11、Entomopter

傳統定翼飛行器在火星飛行會因火星表面稀薄之大氣導致無法產生足夠升力，因此為了在火星飛行，飛行器必須擁有極大之翼面積或者以超過時速 300 公里之速度飛行，就算如此其機動性仍無法滿足火星探測之需求(Colozza, Michelson et al., 2002)。Entomopter 之設計除了可以克服以上困難外，其動力系統採用往復式化學肌肉(Reciprocating Chemical Muscle, RCM)，利用非燃燒之化學反應生成氣體產生往復式運動使機翼拍動，並可以同時產生微小電力驅動機上微機電系統(Microelectromechanical Systems, MEMS)(Colozza, Michelson et al., 2002)。另該化學反應生成之氣體甚至足夠以環量控制(Circulation Control)的方式提高機翼升力(Englar, Smith et al., 1994)，使翅膀上下拍動皆可產生正向升力(Positive Lift)(Michelson, 2008)，提高載具整體效率。Entomopter 所使用的技術概念在當時

RCM)，利用非燃燒之化學反應生成氣體產生往復式運動使機翼拍動，並可以同時產生微小電力驅動機上微機電系統(Microelectromechanical Systems, MEMS)(Colozza, Michelson et al., 2002)。另該化學反應生成之氣體甚至足夠以環量控制(Circulation Control)的方式提高機翼升力(Englar, Smith et al., 1994)，使翅膀上下拍動皆可產生正向升力(Positive Lift)(Michelson, 2008)，提高載具整體效率。Entomopter 所使用的技術概念在當時

電力儲存設備還不發達時可說是極具突破性之解決方案。

加州理工大學(California Institute of Technology, Caltech)

加州理工學院微機電實驗室(Caltech MEMS Lab)自 1998 年開始研發全世界第一架以電力驅動之撲翼微飛行器 – Microbat(Pornsirak-Sirirak, Tai et al., 2001)。其最初原型(圖 12-a)以兩顆超級電容(Super Capacitor)供電，總重僅 7.5 公克，雖然飛行時間只有短短 9 秒鐘，但卻立下首次以電力驅動撲翼飛行的里程碑。

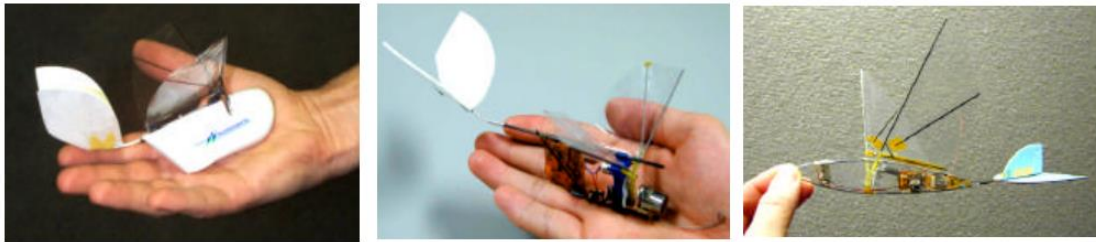


圖 12、Microbat (a)第一代原型 (b)第二代原型 (c)第三代原型

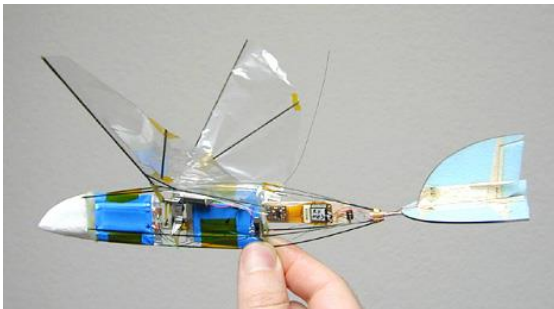


圖 13、第四代 Microbat

為了達成更長之飛行時間，研究團隊在第二架原型(圖 12-b)上裝載電壓 1 伏特的鎳鎘電池(NiCd)，並使用直流轉換器(DC-to-DC Converter)將電壓提升至馬達所需之 4~6 伏特範圍，此設計成功將飛行時間延長至 18 秒。上述兩種設計均只能任由飛行器自由飛行而無操控系統，因此第三代原型(圖 12-c)加入了遙控系統且加大其翼展，可由人以無線電操作油門、升降舵及方向舵，並提升滯空時間至 42 秒。後續該團隊仍持續改進設計，將原先之鎳鎘電池更改為鋰電池(PLion)，並以第四代原型(圖 13)在 2001 年底成功創下滯空時間長達 6 分 17 秒之紀錄(Caltech MEMS Lab, 2011)。

台夫特理工大學(Technische Universiteit Delft, TUDelft)

荷蘭頂尖理工大學 TUDelft 於 2005 年由十一名學生共同設計撲翼微飛行器 – DelFly I(G.C.H.E. de Croon, 2016)(圖 14)參加當年度歐洲微飛行器競賽(European Micro Air Vehicle conference and competitions, EMAV)，並獲得「最奇特微飛行器(Most exotic MAV)」獎項。該飛行器翼展 35 公分、總重 21 公克，並且還裝載一攝影鏡頭，而最長滯空時間達到 17 分鐘。此成果造就 TUDelft 成立微飛行器實驗室(MAVLab)，並持續發展各類微飛行器之設計與研究工作。



圖 14、DelFly I



圖 15、DelFly II

DelFly 系列飛行器機翼以 X 型設計為主，同一拍撲平面上有兩對翅膀上下拍動，與鳥類或蜻蜓等一般拍翅飛行生物較不相似。不過該設計可運用一次或兩次夾翼與拋翼之效果提高飛行器整體升力或推力，而該團隊亦對此效應與翅膀彈性等因素之影響透過粒子影像測速儀 (PIV) 等方式做過詳細研究與分析 (Percin, Hu et al., 2011)。

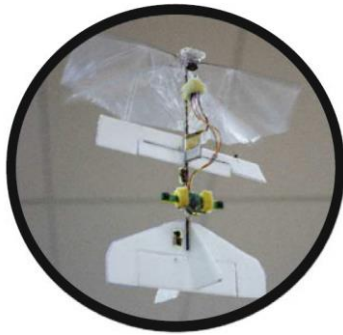


圖 17、DelFly Explorer

DelFly 團隊除了專注於空氣動力及材料上的研究以外，對於控制系統發展亦有相當顯著之成果。團隊於 2013 年發表全世界第一架可以自主飛行之撲翼飛行器 - DelFly Explorer (圖 17)。該飛行器裝載慣性量測單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)、氣壓高度計以及立體視覺相機 (Stereo-vision Camera)，並且只需要仰賴機上處理器便能達成起飛、懸停以及避障等動作。不過該飛行器最大限制仍然在於電池，雖然現在電池技術相較以往已大幅提升，但仍很難滿足撲翼飛行器長時間滯空之需求。

AeroVironment

AeroVironment 為美國科技公司，其產品主要包含能源系統、電動車及無人飛行載具等。2006 年，AeroVironment 因獲得 DARPA 計劃支持發展奈米飛行器 (Nano Air Vehicle, NAV) 而開發 Nano Hummingbird (Keennon, Klingebiel et al., 2012) (圖 18)。憑藉該公司早先曾參與 Microbat 之研究而在 2011 年成功開發出翼展 16.5 公分、總重 19 公克，外型與蜂鳥相近之原型。該飛行器能夠懸停及往四面八方移動外，更有高機動性且能抵抗些微陣風之能力，符合 DARPA 所設定之目標。

AeroVironment 於研發過程中建立該飛行器之設計方法及流程，除了以數值方式計算以外，亦執行多次材料及構型實驗取得足夠參考數據，並透過如梯度下降法 (Gradient Descent) 等最佳化方式設計載具機翼構型。

後續改良型 DelFly II (圖 15) 雖然翼展較小只有 28 公分，但其飛行性能較為優異，除可以懸停及向前飛行 (7 m/s) 之外，亦能向後飛行 (1 m/s) (G.C.H.E. de Croon, 2016)。該團隊在此基礎下於 2008 年發表 DelFly Micro (圖 16)，此翼展 10 公分、重量僅 3.07 公克之撲翼飛行器至今仍保有「全世界最小且裝載攝影機及圖像傳輸模組之飛行器 (Smallest Camera Plane)」的金氏世界紀錄，僅管其飛行時間僅 3 分鐘。



圖 16、DelFly Micro



圖 18、Nano Hummingbird

Animal Dynamics

Animal Dynamics 為英國牛津大學(University of Oxford)於所成立之科技公司，主要發展各類極具挑戰性之仿生科技。該公司與英國國防部所屬國防科技實驗所(Defence Science and Technology Laboratory, Dstl)於 2015 年開始合作研發以蜻蜓為藍圖之仿生飛行器 – Skeeter(Colozza, Michelson et al., 2002)(圖 19)。該飛行器目前仍在研發階段，設計之任務目標將做為短程之偵察平台，預計達成之性能除了能夠抗風外，也能以較低功耗超越現有微飛行器之航程。未來發展上亦可以做為搜救、量測或者農業等相關用途。

Skeeter 前後兩組翅膀相互之間的影响，透過調整其拍撲頻率、振幅或相位差等參數，預期可以以尾流補捉(Wake Capture)或其他相關氣動力機制提升載具效率。



圖 19、Skeeter 概念圖

FESTO

FESTO 為德國知名自動化科技公司，其基本產品包含機電驅動器、氣動設備、感測器等，為各工業領域提供自動化產品與技術服務。除了自動化工業技術外，FESTO 公司最廣為人知的是其致力於發展仿生技術，成果中包含以鳥(SmartBird)、蜻蜓(BionicOpter)、蝴蝶(eMotionButterflies)及蝙蝠(BionicFlyingFox)等飛行生物為參考所開發之仿生飛行器。以下就這四種仿生飛行器做簡單介紹：

仿生鳥: SmartBird

SmartBird(FESTO, 2011)為 FESTO 公司於 2011 年發表之仿生機器鳥 (圖 20)，其外型源自於一種大型鳥類 – 銀鷗(Larus argentatus)。為了達成不靠外力便能起飛、飛行及降落的目標，工程師們經過無數次的討論、測試以及從失敗的飛行中學習並修正。這架翼展 2 公尺的仿生鳥，重量只有 450 公克，且飛行消耗功率僅僅 23 瓦。SmartBird 結構約由 130 件零件組裝而成，骨架採用薄碳纖維板切割，蒙皮則以聚氨脂(Polyurethane, PU)製作成形，以達成結構輕量化的目標。其翅膀拍撲運動宛如真實鳥類之運動，上臂主要用以產生升力，下臂則配合拍撲動作以小型伺服馬達改變攻角以產生推力，另方向控制係以頭部及尾部左右擺動達成。

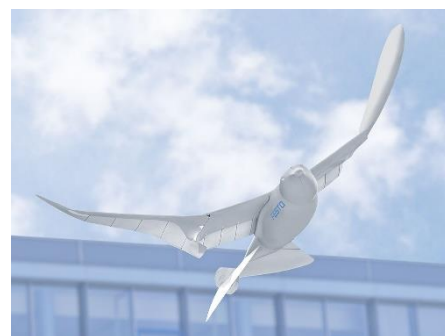


圖 20、SmartBird

仿生蜻蜓: BionicOpter



圖 21、BionicOpter

繼 SmartBird 仿生鳥之後，FESTO 公司於 2013 年再次推出 BionicOpter(FESTO, 2013)仿生蜻蜓(圖 21)。該飛行器之翼展為 63 公分，總重僅約 175 公克，但卻擁有多達 13 個自由度。除控制拍撲頻率外，其四片翅膀亦可以獨立控制振幅以及轉角，再加上頭部及尾部垂直及水平方向之運動，BionicOpter 便可做全向性運動，達到極高

之機動性。操作上，BionicOpter 可以透過機上微控制器(Microcontroller) 即時整合操控者之操控訊號及機上慣性量測單元(IMU)之姿態感測數據，並用以計算載具機構各自由度所需之控制參數，完成各項飛行任務。

仿生蝴蝶: eMotionButterflies

eMotionButterflies(FESTO, 2015) 仿生蝴蝶(圖 22)的設計概念結合 FESTO 公司過去所發表的 BionicOpter 以及 eMotionSpheres (FESTO, 2014)(圖 23)，利用仿生蜻蜓的輕量化結構配合 eMotionSpheres 的室內定位技術(Indoor GPS)達到數隻仿生蝴蝶能夠在同一空間中同時飛行並避免相互之間碰撞。該技術歸功於飛行器上之 IMU 提供姿態資訊、10 台紅外線攝影機提供全域定位影像及 1 台外部中央處理電腦負責通訊及影像處理，將所有資訊整合並計算所需要之姿態控制訊號，即時以無線方式傳送回到每架飛行器，以達到數架飛行器之間防撞甚至任務編隊飛行的可能性。

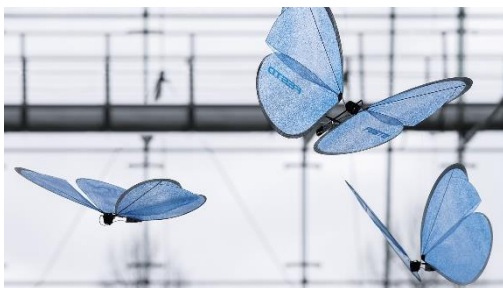


圖 22、eMotionButterflies

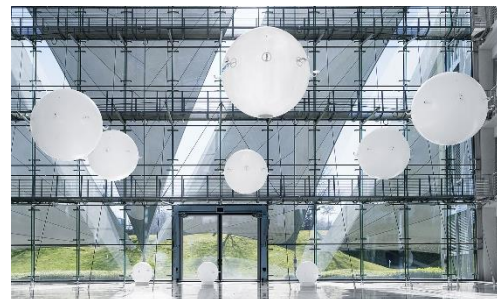


圖 23、eMotionSpheres

仿生蝙蝠: BionicFlyingFox

BionicFlyingFox(FESTO, 2018) 仿生蝙蝠(圖 14)為 FESTO 公司於 2018 年初新推出之仿生飛行器。在過去幾種飛行器的機構、材料及控制系統基礎上，FESTO 公司除了挑戰更複雜的傳動機構及薄膜材料用以逼近真實蝙蝠外，他們更導入機器學習(Machine Learning)相關技術使 BionicFlyingFox 成為智慧化之仿生飛行器。

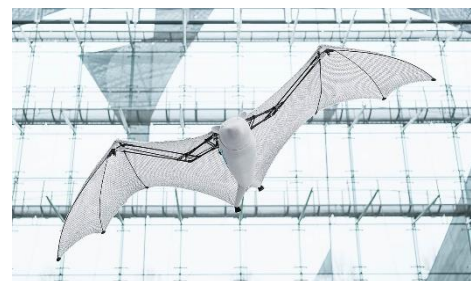


圖 24、BionicFlyingFox

該飛行器僅有起飛及降落由人主動控制，一旦進入飛行後就由機上微控制器計算所需之控制訊號，使飛行器在空間中繞行預設之飛行路徑，並隨著飛行時間增加，

由外部中央處理電腦分析、學習並持續改善該飛行器之控制演算法，達成最佳化之飛行控制。

FESTO 所研發的四種仿生飛行器，乍看之下似乎是四種不同飛行機制的獨立研究成果，但其實各不同飛行器間卻有緊密的關聯及技術上之延續，並同時不斷加入新的元素，朝向多工化、自動化及智慧化的目標邁進。此技術除了航空工業應用外，在其他物流、製造業等工業上，對於提升生產效率及良率等目標亦有相當高的發展性，除了提供了我們關於仿生飛行乃至於整體無人飛行器的工程應用更多的想像，也用其紮實的工程實作成果展示了實踐想像的無限可能。

● 仿生飛行未來發展與挑戰

仿生飛行機制的探討，以及仿生飛行器得研發，是相輔相成的，隨著更多仿生飛行機制的釐清，不論是相關空氣動力學理論，或是包括翅膀及骨架材料、肌肉與骨骼乃至於神經的傳導與控制等等，都能夠應用到仿生飛行器的設計與開發，以達到更精妙、更靈巧以及更多應用可能性的終極目標，具有相當高的工程應用潛力。目前，除了拍撲飛行機制以及各種不同種類的生物在不同情境下的飛行動態值得我們繼續去探究外，在工程實踐上，也有幾個需要持續挑戰的課題。飛行動力以及能源的問題是目前微飛行器所遇到的難關，電能的供給是目前影響微飛行器效能的主要關鍵，受限於輕量化的設計要求，目前已開發的拍撲是微飛行器都未具備有足夠實際應用的續航時間，未來新的動力元件或者大能量密度電池的開發，都是提高仿生飛行器的重要研發方向；在驅動機構以及元件功能上，如何減輕重量並做到微型化，也是一個重要發展課題，機構設計上勢必會有越來越多的複合運動，如何降低緊湊機構間的摩擦阻力，是一個需要解決的困難，另外為了達到微飛行器的工程應用，微型攝影機、通訊系統以及各種導航與姿態控制系統等等，都需要能夠更進一步微小化的技術。

「仿生」結合了生物與工程的思維，如何將工程上不斷開拓創新的量測技術，應用到探索大自然奧秘的科學研究上；如何將探索到的科學知識，汲取出可在工程上加以應用的精髓；如同生物演化所累積的智慧一般，期許我們，期許人類也能不斷透過各種努力從大自然中累積知識，成為未來科技進步的動力。

參考資料

- Alexander, D. E. (2004). Nature's flyers: birds, insects, and the biomechanics of flight, JHU Press.
- Chang, Y.-H., S.-C. Ting, J.-Y. Su, C.-Y. Soong and J.-T. Yang (2013). "Ventral-clap modes of hovering passerines." Physical Review E **87**(2): 022707.
- Chin, D. D. and D. Lentink (2016). "Flapping wing aerodynamics: from insects to vertebrates." Journal of Experimental Biology **219**(7): 920-932.
- Colozza, A., R. Michelson and M. Naqvi (2002). "Planetary exploration using biomimetics-an entomopter for flight on mars." Phase II Final Report, NASA Institute for Advanced Concepts Project NAS5-98051.

- Dickinson, M. H., F.-O. Lehmann and S. P. Sane (1999). "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight." *Science* **284**(5422): 1954-1960.
- Ellington, C. P., C. Van Den Berg, A. P. Willmott and A. L. Thomas (1996). "Leading-edge vortices in insect flight." *Nature* **384**(6610): 626.
- Englar, R. J., M. J. Smith, S. M. Kelley and R. C. Rover III (1994). "Application of Circulation Control to Advanced Subsonic Transport Aircraft, Part I-Airfoil Development." *Journal of Aircraft* **31**(5): 1160-1168.
- Feduccia, A. and H. B. Tordoff (1979). "Feathers of Archaeopteryx: asymmetric vanes indicate aerodynamic function." *Science* **203**(4384): 1021-1022.
- FESTO. (2011). "SmartBird - Bird flight deciphered."
- FESTO. (2013). "BionicOpter - Inspiration, Dragonfly flight."
- FESTO. (2014). "eMotionSpheres - Collision-free motion of autonomous systems in an area."
- FESTO. (2015). "eMotionButterflies - Ultralight flying objects with collective behaviour."
- FESTO. (2018). "BionicFlyingFox - Ultra-lightweight flying object with intelligent kinematics."
- G.C.H.E. de Croon, M. P., B.D.W. Remes, R. Ruijsink, Christophe De Wagter (2016). *The DelFly - Design, Aerodynamics, and Artificial Intelligence of a Flapping Wing Robot*, Springer Netherlands.
- Gilbert, S. F. and M. J. F. Barresi (2016). *Developmental Biology*, Sinauer Associates, Inc.
- Hedenström, A., L. Johansson, M. Wolf, R. Von Busse, Y. Winter and G. R. Spedding (2007). "Bat flight generates complex aerodynamic tracks." *Science* **316**(5826): 894-897.
- Hedenström, A. and L. C. Johansson (2015). "Bat flight: aerodynamics, kinematics and flight morphology." *Journal of Experimental Biology* **218**(5): 653-663.
- Hedenström, A., L. C. Johansson and G. R. Spedding (2009). "Bird or bat: comparing airframe design and flight performance." *Bioinspiration & Biomimetics* **4**(1): 015001.
- Hedenström, A., M. Rosén and G. Spedding (2006). "Vortex wakes generated by robins *Erithacus rubecula* during free flight in a wind tunnel." *Journal of The Royal Society Interface* **3**(7): 263-276.
- Henningson, P., F. T. Muijres and A. Hedenström (2010). "Time-resolved vortex wake of a common swift flying over a range of flight speeds." *Journal of The Royal Society Interface*: rsif20100533.
- Hubel, T., K. Breuer, A. Song and S. Swartz (2008). "Wing motion and wake structure of bat flight." *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **150**(3): S77.
- Hubel, T. Y., D. K. Riskin, S. M. Swartz and K. S. Breuer (2010). "Wake structure and wing kinematics: the flight of the lesser dog-faced fruit bat, *Cynopterus brachyotis*." *Journal of Experimental Biology* **213**(20): 3427-3440.
- Keennon, M., K. Klingebiel and H. Won (2012). *Development of the nano hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle*. 50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition.
- Lehmann, F.-O. (2008). "When wings touch wakes: understanding locomotor force control by wake-wing interference in insect wings." *Journal of Experimental Biology* **211**(2): 224-233.
- Lehmann, F.-O. and S. Pick (2007). "The aerodynamic benefit of wing-wing interaction depends on

- stroke trajectory in flapping insect wings." Journal of experimental biology **210**(8): 1362-1377.
- Lentink, D. and M. H. Dickinson (2009a). "Biofluiddynamic scaling of flapping, spinning and translating fins and wings." Journal of Experimental Biology **212**(16): 2691-2704.
- Lentink, D. and M. H. Dickinson (2009b). "Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings." Journal of Experimental Biology **212**(16): 2705-2719.
- Michelson, R., D. Helmick, S. Reece and C. Amarena (1997). "A reciprocating chemical muscle (RCM) for micro air vehicle 'Entomopter' flight." Proceedings of the Association for Unmanned Vehicle Systems: 429-435.
- Michelson, R. C. (2008). "Test and evaluation for fully autonomous micro air vehicles." ITEA Journal **29**(4): 367-374.
- Caltech MEMS Lab (2011). "Microbat." from <http://touch.caltech.edu/research/bat/bat.htm>
- Muijres, F. T., M. S. Bowlin, L. C. Johansson and A. Hedenström (2012). "Vortex wake, downwash distribution, aerodynamic performance and wingbeat kinematics in slow-flying pied flycatchers." Journal of the Royal Society Interface **9**(67): 292-303.
- Muijres, F. T., L. C. Johansson, Y. Winter and A. Hedenström (2011). "Comparative aerodynamic performance of flapping flight in two bat species using time-resolved wake visualization." Journal of The Royal Society Interface: rsif20110015.
- Muijres, F. T., L. C. Johansson, Y. Winter and A. Hedenström (2014). "Leading edge vortices in lesser long-nosed bats occurring at slow but not fast flight speeds." Bioinspiration & biomimetics **9**(2): 025006.
- Norberg, U. (1990). "Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology." Ecology and Evolution. Springer-Verlag, Berlin.
- Ol, M., B. McCauliffe, E. Hanff, U. Scholz and C. Kähler (2005). Comparison of laminar separation bubble measurements on a low Reynolds number airfoil in three facilities. 35th AIAA fluid dynamics conference and exhibit.
- Percin, M., Y. Hu, B. Van Oudheusden, B. Remes and F. Scarano (2011). "Wing flexibility effects in clap-and-fling." International Journal of Micro Air Vehicles **3**(4): 217-227.
- Pornsirirak, T. N., Y.-C. Tai, C.-M. Ho and M. Keennon (2001). Microbat: A palm-sized electrically powered ornithopter. Proceedings of NASA/JPL Workshop on Biomorphic Robotics.
- Ramezani, A., S. U. Ahmed, J. Hoff, S.-J. Chung and S. Hutchinson (2017). Describing robotic bat flight with stable periodic orbits. Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Springer.
- Ramezani, A., S.-J. Chung and S. Hutchinson (2017). "A biomimetic robotic platform to study flight specializations of bats." Science Robotics **2**(3): Art. No. eaal2505.
- Reay, D. A. (2014). The history of man-powered flight, Elsevier.
- Sane, S. P. (2003). "The aerodynamics of insect flight." Journal of experimental biology **206**(23): 4191-4208.
- Shyy, W., C.-k. Kang, P. Chirarattananon, S. Ravi and H. Liu (2016). "Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight." Proc. R. Soc. A **472**(2186): 20150712.

- Shyy, W., P. Trizila, C.-k. Kang and H. Aono (2009). "Can tip vortices enhance lift of a flapping wing?" AIAA journal **47**(2): 289-293.
- Spedding, G., M. Rosén and A. Hedenström (2003). "A family of vortex wakes generated by a thrush nightingale in free flight in a wind tunnel over its entire natural range of flight speeds." Journal of Experimental Biology **206**(14): 2313-2344.
- Taylor, G. K., A. C. Carruthers, T. Y. Hubel and S. M. Walker (2012). "Wing morphing in insects, birds and bats: mechanism and function." Morphing Aerospace vehicles and structures: 11-40.
- 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.
- Wu, J. C. and Z. Popović (2003). Realistic modeling of bird flight animations. ACM Transactions on Graphics (TOG), ACM.
- 余永亮 (2018). "蝙蝠飛行的空氣動力學研究進展." 空氣動力學學報 **36**(1): 129-134.
- 蘇健元，綠繡眼高操控性飛行之生物力學研究，台灣大學機械工程學系博士論文，2013。
- 章聿珩，運動學參數對鳥類拍撲翼之升力影響，台灣大學機械工程學系碩士論文，2010。
- 侯祠軒，蝴蝶翼展尺寸效應及飛行動態策略，台灣大學機械工程學系碩士論文，2017。