

仿生飛行

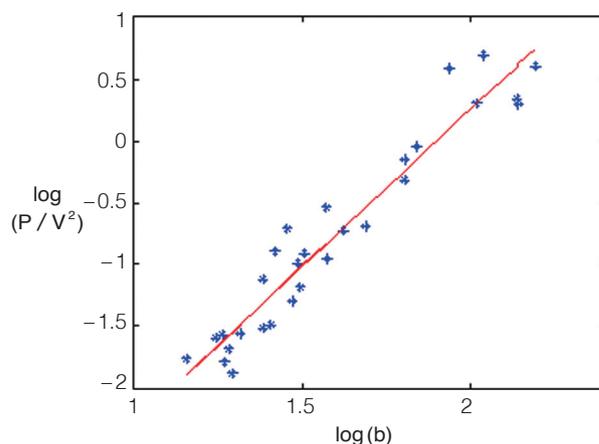
當未來朝向研發更小、更靈巧的微型飛機時，如何從鳥類或昆蟲的結構特性、氣動力原理及運動器官的高效率運作上，汲取可在工程上應用的精髓，是非常重要的努力方向。

■ 蕭飛賓、王地寶

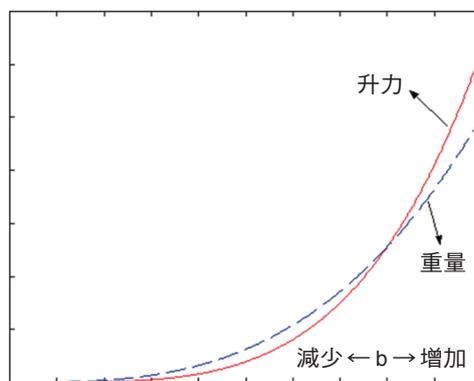
從人類飛行器談起

自從萊特兄弟發明載人飛行器以來，人類的航空科技已經發展近一個世紀了。小至單座的特技飛機，大至三、四百人的越洋客機，甚至快達數倍音速的協和號或軍用機，對現今的航空工業技術來說都是家常便飯。簡言之，現在的載人飛機想製造得多大、多快已經不是能不能，而是想不想或有沒有商業效益的事了。

近年來，由於軍用偵察及民用環境監測上的需求，無人飛機（unmanned aerial vehicle, UAV）一大小約在一般遙控飛機到小型單人座飛機間一的研發已經成為航空發展上的另一波趨勢，根本原因就在於低成本及零人員傷亡率。然而，針對某些特殊的資訊蒐集或環境探勘，如戰場上近距離作戰、情報偵察，或惡劣環境下的探測，為了因應 UAV 可能的損耗率及風險分擔，重量輕及成本低的微型無人載具（micro aerial vehicle, MAV）一大小一般在翼展 15 cm 以下（約成人巴掌大）一自是優先選擇。



飛行器 P/V^2 對 b 的對數統計分布圖。



飛行器可提供的升力與重量對尺寸的變化示意圖

希望製作一架微型飛機像鳥類或蝴蝶那麼小，就得向會飛的動物學習飛行技巧了。

當無人飛行器越做越小時，拍翅型的飛行方式應該是人類要參考及學習的。

這裡可能出現一個問題：MAV 若按照一般固定翼飛行器的飛行方式製造，可以任意變小、變輕嗎？答案可能是否定的。按照詹氏年鑑所記載的當代各型飛機資料，若以 P/V^2 對 b 作圖觀察（其中 P 是飛機發動機所產生的功率， V 是飛機巡航速率， b 是飛機翼展大小），可以發現相較於其他變數組合，兩者間有最大的相關性（相關係數約 0.96），並大致上有 P/V^2 正比於 b 的三次方的趨勢。

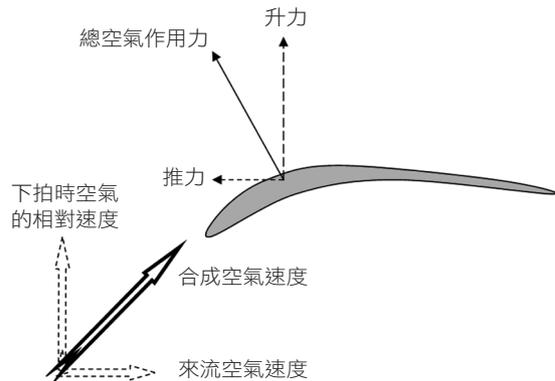
若把這樣的結果代入飛機升力公式，可以得到飛機所能提供的升力 L 與它的尺寸 b 的 4 次方成正比（註 1），即 $L \propto b^4$ 。而且飛機的重量 W 與尺寸 b 的 3 次方成正比，即 $W \propto b^3$ 。比較這二式，可以發現一個有趣的結果，即飛行器尺寸變小時，所能產生的升力會遞減得比重量快。

也就是說，固定翼型微型飛機有尺寸的下限，自然無法做得任意小（註 2）。若希望製作一架跨越這個底限的微型飛機，像鳥類或蝴蝶那麼小，該怎麼辦呢？答案似乎直指大自然的飛行定律，也就是得向會飛的動物學習飛行技巧了。

向自然學習

自然界一萬三千種溫血的脊椎動物中，有近一萬種可以飛翔，其中包括了九千種鳥類與一千種蝙蝠。另外，更有將近一百萬種的昆蟲擁有飛行的能力。無庸置疑的，就陸地單位距離的移動上，飛行絕對比爬行、行走或奔跑在能量使用上來得有經濟效益。

顯然地，這些動物採取的飛行方式大致說來只有一種，就是拍翅飛行。同時，由於從較大的飛行動物如恐龍時代的翼手龍，以



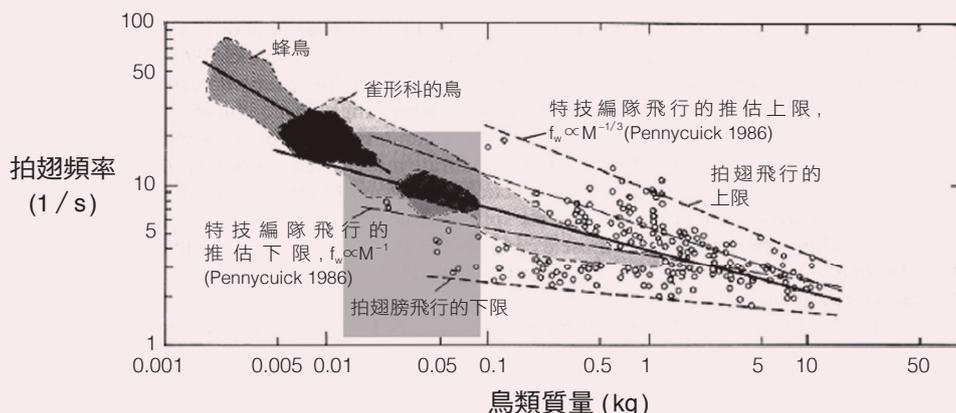
翅膀拍動時，空氣來流與其作用力示意圖。

及現今的鳥類，到很小的飛行動物如蚊子、蒼蠅，其尺寸大小約在前節所謂的 MAV 尺寸底限以下（含）。因此，大致上可以預測當無人飛行器越做越小時，拍翅型的飛行方式應該是人類要參考及學習的。

然而以飛行為主的移動方式涵蓋了這麼多種動物，其飛行的特性與方式自然有所不同。就目前所知，可以大概分為 3 部分討論。

升力與推力共生的拍翅運動 由於這些飛行動物並沒有演化出像螺旋槳或噴射引擎般的推進器官，飛行所需的推力（用以克服阻力）及升力（用以克服重力）來自軀幹上主要的可動件—翅膀。當翅膀下拍時，在翅膀的每一個截面上，所產生的空氣作用力會同時在前進方向（即推力）及重力的反方向（即升力）產生分量。

拍翅頻率的尺度變化 若仔細觀察這些飛行動物的拍翅快慢，會發現有特殊的分布特性。舉例來說，像蚊子、蒼蠅、蜜蜂等小昆蟲終日嗡嗡，翅膀拍個不停；



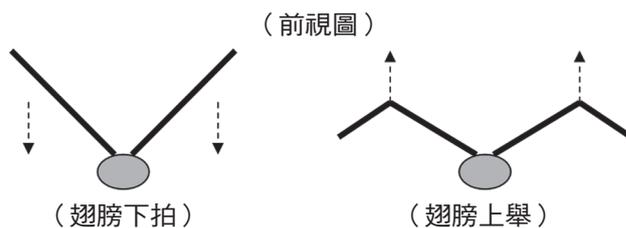
鳥類拍翅頻率與質量對數的統計分布（參考資料：Norberg, U. M. (1990) Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, morphology, Ecology and Evolution. Springer, New York, NY.）

鳥類（除了蜂鳥）則是在需要加速或起飛時才翅膀猛拍幾下，其他時候能滑翔就滑翔，悠閒自在。甚至，有些大型鳥類如信天翁或天鵝等，大部分的時間都張著大翅膀，乘著氣流遨翔天際。

到此，大致上已看出來飛行動物的拍翅頻率，其實是隨著尺寸增加而減少的。也就是越大的鳥類，拍翅頻率越小，而越小如昆蟲，其拍翅頻率是相當高的！有位學者 Norberg 曾經做過這方面的調查與研究，他估計鳥類的拍翅頻率上限與其質量的 $-1/3$ 次方成正比，拍翅頻率下限則與其質量的 $-1/6$ 次方成正比。

由於拍翅頻率高意味著滑翔少，且由本文開頭的討論大致可知：越小的動物，滑翔的能力越差。因此，越小的飛行動物越仰賴高頻率的振翅來產生足夠的升力，以支撐自身的重量。

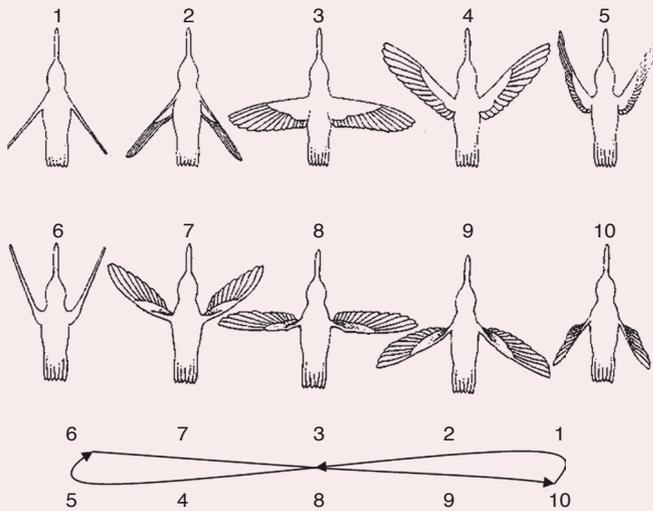
三種主要的拍翅方式 對拍翅的原理與特性有初步的了解後，接著了解各類飛行動物的拍翅方式有什麼差異。首先要提出來的是，自然界動物的拍翅方式大抵上都不是單純地上下拍動而已，牠們的拍翼行為是相當有變化的。



一般鳥類拍翅過程中翅膀折曲示意圖

一般鳥類的翅膀下拍與上舉的動作，最顯著的差異在於上舉時翅膀會折疊，以減少不必要的反向力。值得注意的是，鳥類翅膀除了拍動與折疊外，還伴隨著沿翼展方向的扭轉，以獲得適當的攻角（翅膀截面與迎向空氣所夾的角度）產生較高的升力。例如老鷹在空中翱翔或轉彎時的翅膀角度變化，尤其是翼尖的羽毛變化，就是自然的傑作。

多數昆蟲及蜂鳥的拍翅方式是所謂的 8 字型拍法，也就是翅膀兩端在拍動時的軌跡，從側面看是沿著寫 8 這個數字的筆順。這樣的拍法意味著翅膀的任一截面在每一時刻的傾斜程度，會呈現一個周期性變化，



蜂鳥停懸時拍翅過程的上視與側視圖

其傾斜程度的改變不外乎使翅膀在上拍時的反向力（其為反效果）減至最小。

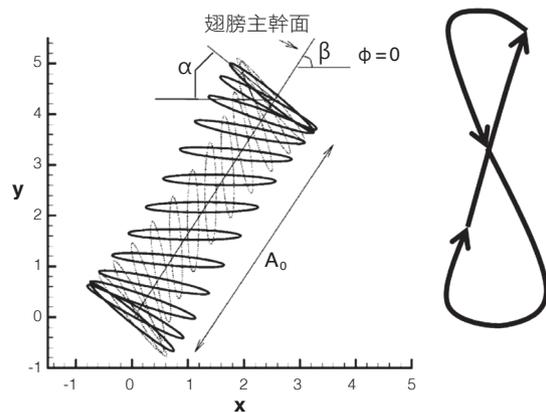
但蜂鳥及蒼蠅的拍翅方式略有不同，牠們的翅膀拍動軌跡是橫躺的8字型，如同「∞」符號。也就是主要拍翅方向幾乎與地面平行，尤其在停懸於空中時更是明顯。

氣動力原理的謎團

在1934年，一位昆蟲學家 Antoine Magnan 用傳統固定翼滑翔飛行的理論計算，得出一隻大黃蜂以牠本身所具有的翼面積與飛行速率，所產生的升力不可能支撐得了牠的重量，因而指出「一隻大黃蜂是不可能飛的！」這樣盛名遠播的矛盾結論。

這主要是因為當時空氣動力學的理論僅止於分析固定翼穩定狀態的流場，而動物拍翅運動所導致的流場並不是穩定的，而是變動不已的，更別說鳥類翅膀其實是有變化的。因此當初這位昆蟲學家勉強把計算飛機穩態下所產生升力的公式用在動物拍翅飛行上，自然得到與現實不符的結論。

截至目前為止，人類對動物拍翅飛行的力學理論估算公式還不完整。但拜電腦



一般昆蟲拍翅過程中翅膀剖面傾角及軌跡示意圖

的發明及儀器設備的進步，近十多年來計算流體力學家與實驗生物學家已經有能力在電腦數值模擬上與實驗室中，探索動物拍翅飛行的奧秘及原理。近年來的重要進展包括美國 Aero Vironment 公司的蜂鳥仿真遙控飛行機器，以及哈佛大學團隊所開發的線控昆蟲拍翅飛行機器。

不過，無論是否能夠從理論上精確分析出牠們的飛行機制與定量特性，古往今

大自然中有許多值得人類師法仿效的地方，因為這些都是幾千萬年以來演化去蕪存菁後的成果，動物的飛翔行為就是一例。

來，蟲鳥們還不是照樣翱翔在樹林天際間？因此向自然學習、向蟲鳥等動物學習飛行，是亙古不變的真理。

無可諱言的，大自然中有許多值得人類師法仿效的地方，因為這些都是幾千萬年以來演化去蕪存菁後的成果，動物的飛翔行為就是一例。

若以飛行體每秒鐘可前進的單位身體長度來看，鳥類平均每秒飛行 35 個單位體長以上，鴿子跟雨燕更是每秒飛行 60、70 個單位體長。反觀一般的無人飛機，平均也不過每秒飛行 20 個單位體長左右，比較快的差不多 50 個單位體長，即使是一般大型飛機（如民航機）也是介於 10～50 之間。甚至在每秒的轉動角速率或抗 G 能力上，鳥類也是高於人類所製的飛行器。如此看來，人類的飛行器在某種程度上只能算是自然界的山寨「機」。

無庸置疑的，21 世紀是生物科技的世紀，「仿生」更是其中橫跨工程與生物的重要思維。如雷達（仿蝙蝠）與類神經網路（仿人腦）等多項科技，都已吹響了仿

生的首部曲。接下來，醫藥、材料及微型載具（模仿利用魚類水中推進或鳥類昆蟲空中飛行的運動機械）更會在未來數十年發光發熱。因此，當未來朝向研發更小、更靈巧的微型飛機時，如何從鳥類或昆蟲的結構特性、氣動力原理及運動器官的高效率運作上，汲取出可在工程上加以應用的精髓，顯然是重要的努力方向。

註 1：定翼飛行器水平巡航飛行時所產生的推力 T 主要用於抵抗阻力 D 。在忽略摩擦阻力，主要考慮壓力阻力的前提下，由流體力學基本觀念可知 $D \propto V^2 \cdot A$ ，其中 A 是飛行器的截面積（同樣地，這裡暫不考慮雷諾數效應隨尺度改變所造成的阻力係數變化）。因此，代入後可以得到升力隨著尺度的 4 次方成正比。

註 2：這裡的考量純粹只是氣動力方面，若把結構及控制上的限制考慮進來，MAV 尺寸下限可能要再提高。

蕭飛賓、王地寶
成功大學航太所

