

昆蟲飛行探索與仿生應用

文・圖／楊鏡堂

大自然為師，從20世紀中發明的魔鬼毡，到近期奧運出現的鯊魚裝，皆是師法自然的結果。「飛上天空」是人類工程科技史上一大里程碑，除了飛行載具，近年來，小型輕巧的無人飛行器（micro aerials vehicle, MAV）更成了熱門話題。早在人類出現之前，許多生物早就以其靈巧的飛行能力主宰了天空；牠們經過物競天擇所發展出來的飛行方式以拍撲翼為主，與人類使用的固定翼飛行器及直升機的旋翼式大大不同，讓人想深入了解其優點和所蘊藏的智慧。

大部分飛行生物包括鳥、昆蟲、蝙蝠等，都是藉由拍動翅膀的動作獲取飛行時所需的升力及推進力，此即所謂的「拍撲飛行」。比起定翼式飛機調整機翼控制升降，拍撲的方式不易產生失速現象，可以做更大幅度的轉變、擁有更靈活的操控性能。許多飛行生物的外型很流線，在不需要做急轉、加速等動作改變飛行狀態時，可以選擇在空中不拍動翅膀，以滑翔的姿態延長滯空時間，這樣的操控性、機動性是固定翼飛行器所無法比美的。

人類歷史上最早的飛行嘗試就是模仿自生物界，如達文西的工程圖稿ornithopter，但經過多次嘗試後發覺難度很高，轉而朝其他方向思考，才發明了第一架固定翼飛機。看似單純的往復拍撲，事實上非常複雜。翅膀拍撲所產生的力，會在一個完整的動作週期中，隨著時間改變，在空氣動力學裡屬於非穩態（unsteady），與飛機平穩直飛時的穩態（steady）不同，後者飛機機翼有穩定的升阻力大小與方向。也因此要分析拍撲飛行較困難，其隨時間變化的升阻力也使得控制的門檻提高不少。此外，拍撲飛行在方向及速度控制上，全仰賴拍翅模式，如翅膀拍翅頻率、拍翅軌跡等，不若現在飛行機將推進與上升分別控制的做法來得容易。

在現行飛行領域，人工機器的表現仍遠不及生物。因此，即使有許多困難，不少科學家還是想將這種拍撲飛行模式帶入工程應用，讓現有飛行機有更多自由度。科學家觀察大自然，找出生物運動的特色，從中汲取靈感，進而將之運用於人類生活中，這是仿生學的主要宗旨。其中，昆蟲的飛行是仿生研究拍翼飛行的主要對象。原因是昆蟲有幾點特色：（1）昆蟲的翅膀不像鳥類、哺乳類複雜，僅以肌肉群直接或間接拉扯翅膀根部控制拍翅動作，而鳥類和哺乳類的翅膀被肌肉覆蓋，有多個控制關節，在工程上，實現昆蟲翅膀的拍撲較容易；（2）很多昆蟲有「懸停」的飛行能力，懸停是指能在空中定點停留，這在工程應用領域十分重要，因為很多功能執行，如搬運物品或定點觀測，需要在空中精準定位。昆蟲翅膀的振翅頻率高，在一個拍撲週期循環的時間短，快速連串的升阻力改變和精確的調控，幫助牠們可以滯留在想要的位置。

機械系熱流光束實驗室延續有關燕雀類飛行力學之研究基礎，目前聚焦於昆蟲仿生飛行的解

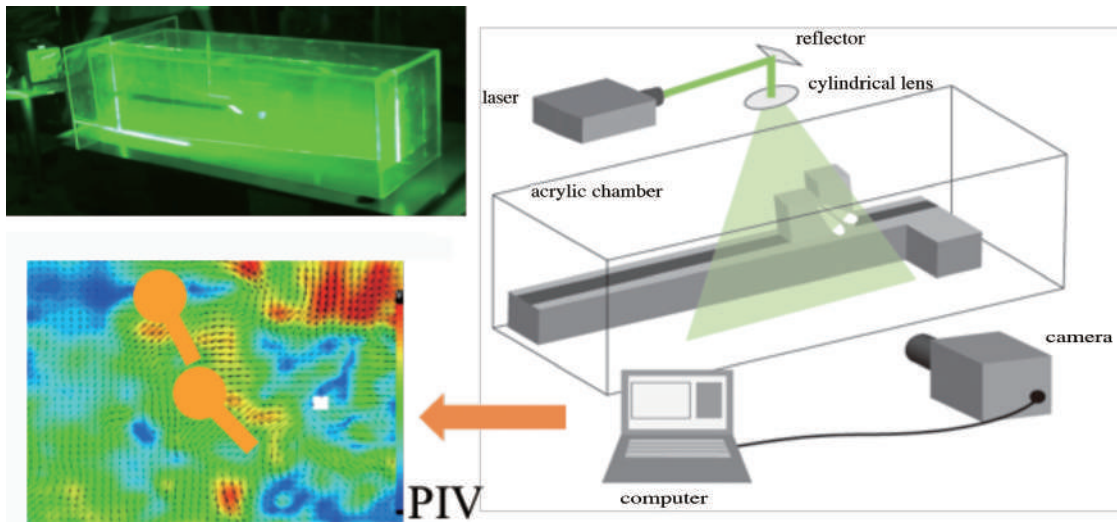


圖1：仿生實驗設計示意圖（生物實驗與機構測試）。

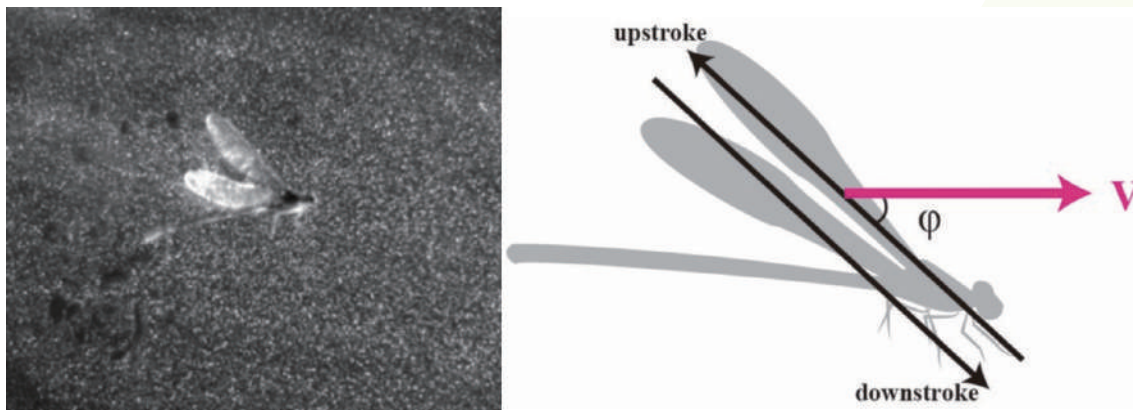


圖2：豆娘在測試區內之PIV飛行量測圖。

析，樣本有蜻蛉目昆蟲及蝴蝶，原因是這兩種動物有特色的拍翅飛行模式較適合發展仿生飛行器。蜻蛉目的昆蟲包括蜻蜓及豆娘兩大類，牠們的祖先最初出現在泥盆紀，渡過了幾億年以及大滅絕的考驗，是非常古老的昆蟲。另外，牠們也是非常強悍的掠食者。大部分昆蟲其中一對翅膀在演化的過程中變為保護身體的硬殼，或者直接退化。這說明昆蟲的飛行不必要兩對翅膀。蜻蜓、豆娘與其他昆蟲最大不同點在於他們保有兩對翅膀，而兩對翅膀的交互配合動作則可擁有敏捷的操縱性、高速飛行等特質。換而言之，牠們以擅長飛行為生存優勢。

在歷經生物物理觀測後，本團隊進一步探究蜻蜓、豆娘如何操作翅膀，以隨心所欲地飛行、捕食。首先利用高速攝影機捕捉牠們的動作、配合同步粒子影像測速技術量測拍動翅膀產生的流場切面（圖1、圖2），分析且歸納動作特色，然後引進工程優勢，建構拍翅機構模仿我們感興趣的部分，重複測試，更可以聚焦、探索主題，定義出比自然界更好的飛行模式。經由前述實驗，我們觀察到豆娘與蜻蜓協調拍翅的動作不同，並以機構去解析不同動作的利弊得失。目前的實驗結果顯示豆娘的拍撲模式可以讓翅膀的相互干擾減至最低，提升效率。

翩翩飛舞的蝴蝶是十分有趣的飛行昆蟲，牠們有極低的拍翅頻率和非常大的翅膀，可以做滑

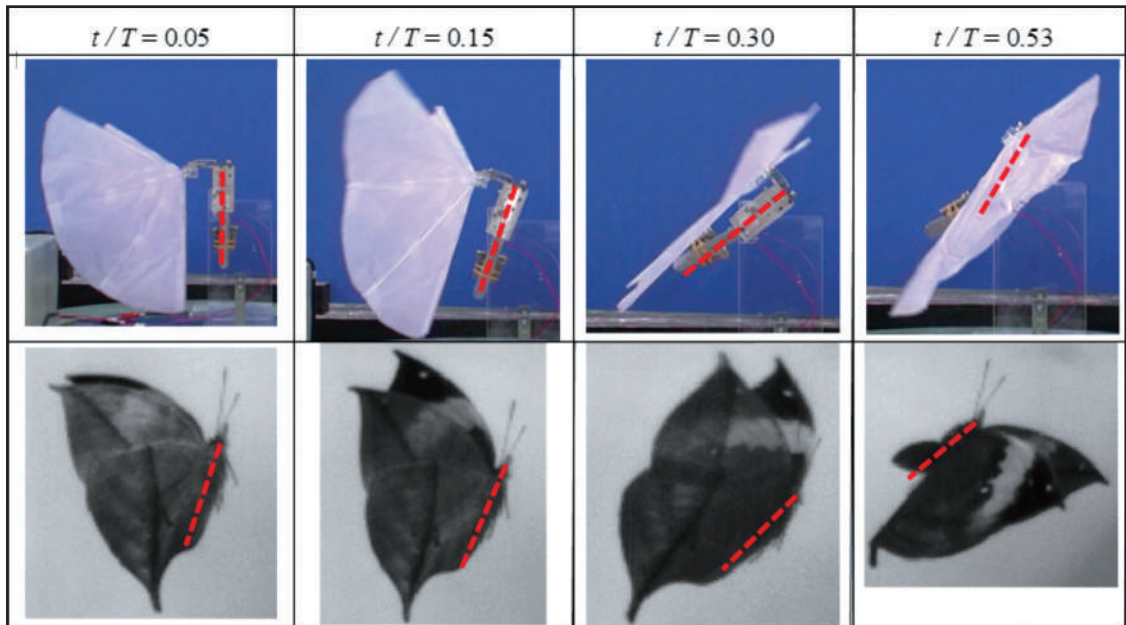


圖3：仿蝴蝶飛行機構之飛行動態實驗。

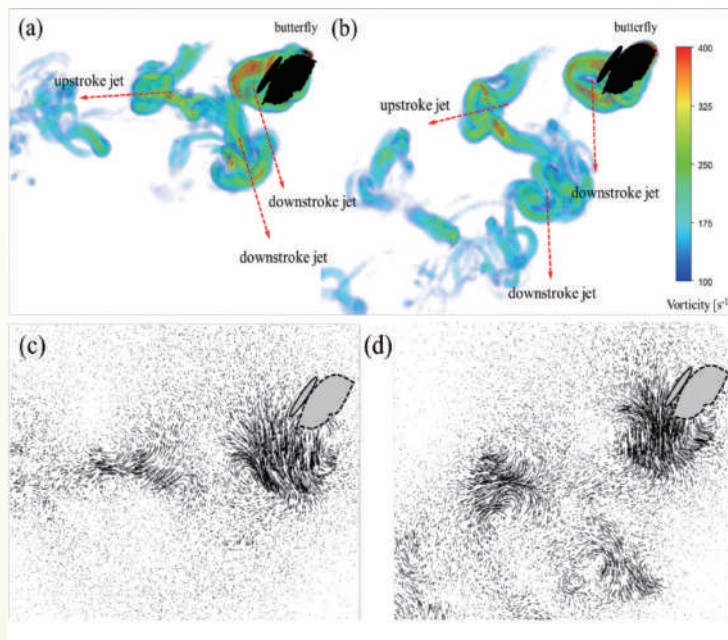


圖4：蝴蝶飛行流場之數值模擬分析結果。

翹、也可以精準的停在花朵上。經由高速攝影機觀察，我們發現蝴蝶飛行時身體的俯仰動作比一般昆蟲來得大，原因可能是拍翅慢，一個拍翅循環的時間長，以至於身體擺幅大。而身體的擺幅跟飛行有非常密切的關係，因為身體的方向會連帶影響拍翅的方向。那麼，蝴蝶要如何控制呢？我們觀察到蝴蝶的腹部在飛行時會隨著拍翅做出大角度的擺動。有沒有可能是靠這種

方式控制身體、進而控制翅膀的拍撲方向？或者以這種方式調控飛行，是不是可以應用為現代飛行機的控制方法？因此，我們建構機構去模仿利用身體質量的慣性力對飛行時身體角度的影響（圖3）。另外，用電腦數值模擬拍撲造成空氣流體的改變（圖4），也可以得到很多動力學上的重要機制，已有新的闡釋。

生物是複雜且奇妙的，生物演化累積出的智慧如同人類努力累積的知識一樣，非常值得探究，仿生學就是在此種觀點下被提出。工程研究是可以被自然環境所啟發的，期許這個觀點能成為科技進步的動力，同時也提醒身為自然界一分子的我們與之共榮共處的重要性。目

前實驗室之仿生研究成員（圖5）有一位博班研究生（費約翰）及四位碩班研究生（張家瑜、王彥傑、李哲安、侯詞軒），共同探究昆蟲飛行奧秘暨仿生科技之設計。圖（本專題策畫／化工系陳文章教授&生機系陳世銘教授）

延伸閱讀：

- [1] W. Shyy, H. Aono, C. K. Kang, and H. Liu, 2013, *An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics*, Cambridge University Press, New York.
- [2] 蔡承志(譯), 2006, 《飛行的奧秘》，貓頭鷹，(Stephen Dalton, 1999)
- [3] Y. H. Fei and J. T. Yang,* 2015 (SEP), "Enhanced thrust and speed revealed in the forward flight of butterflies with transient body translation," *Physical Review E*, Vol. 92, art. No. 033004.
- [4] J. Y. Su and J. T. Yang,* 2013 (DEC), "Analysis of the aerodynamic force in an eye-stabilized flapping flyer," *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 8, art. No. 046010.
- [5] Y. H. Chang, S. C. Ting, J. Y. Su, C. Y. Soong, and J. T. Yang,* 2013 (FEB), "Ventral-clap modes of hovering passerines," *Physical Review E*, Vol. 87, art. No. 022707.
- [6] J. Y. Su, S. C. Ting, Y. H. Chang, and J. T. Yang,* 2012 (JUL), "A passerine spreads its tail to facilitate a rapid recovery of its body posture during hovering," *Journal of Royal Society Interface*, Vol. 9, No. 72, pp. 1674-1684.



仿生研發團隊，左起：侯詞軒、張家瑜、王彥傑、李哲安、楊鏡堂、費約翰。（2016）

楊鏡堂小檔案

成功大學造船系學士及機械研究所碩士，1979年獲 University of Wisconsin-Madison 機械系及能源中心提供之能源獎學金，赴美留學，1983年回到清華大學動機系任教25年，2008-2016年轉任本校機械系，目前也合聘於工科海洋系及生技中心。研發主題聚焦於以流體力學為主軸之跨領域整合型研究，涵蓋能環工程科技與策略，燃燒與推進系統，奈微米尺度熱流系統，生物物理與仿生科技。

曾榮獲國科會傑出研究獎3次、2014年宗倬章先生講座教授、中國工程師學會傑出工程教授獎、中國機械工程師學會傑出工程教授獎、3次國家新創獎、兩次 Green Tech 東元科技創新競賽亞軍暨人氣獎、國家發明獎及7項上銀科技機械碩士論文獎之榮譽，指導學生於2004-2015年期間共同榮獲全球或全國性學術獎項超過90項。

社會服務方面，曾擔任系主任、自強科學中心主任、財團法人車輛研究與測試中心董事、全國奈米人才培育推動辦公室總召集人、熱流學門與航太學門召集人、行政院能源指導小組／國科會能源計劃辦公室主任、國家永續發展委員會委員、能源局年度研究計畫審查總召集人與能源領域績效考評會委員、國家太空中心諮詢委員、臺灣仿生科技暨五生產業發展協會常務理事、第二期能源國家型科技計畫成果追蹤委員會執行秘書暨策略小組召集人。