

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

拍翼式微型自主飛行系統--總計畫 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 96-2221-E-032-013-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：楊龍杰
共同主持人：翁慶昌、蕭富元、沈永康
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃建博
碩士班研究生-兼任助理人員：高敏維
碩士班研究生-兼任助理人員：廖俊瑋
碩士班研究生-兼任助理人員：許政慶
碩士班研究生-兼任助理人員：高崇瑜
碩士班研究生-兼任助理人員：黃奕澄
碩士班研究生-兼任助理人員：房柏廷
博士班研究生-兼任助理人員：徐振貴

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中華民國 97 年 10 月 03 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

「拍撲式微型飛行系統-總計畫」

計畫編號：NSC-96-2212-E-032-013

執行期間：96 年08 月01 日至 97 年07 月31 日

主持人：楊龍杰

共同主持人：翁慶昌、沈永康、蕭富元

研究助理：徐振貴、高敏維、廖俊璋、黃建博、

許政慶、高崇瑜、黃奕澄、房柏廷

執行機構：淡江大學機械與機電工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、中英文摘要

因應下世代特定影音目標追蹤的需求，具有超越地面行動限制的「自主式小範圍飛行系統」，在諸如群眾運動監控、老幼居家照顧、危險場合之保全監視、與軍事偵察等方面，皆有其潛在應用。

本計畫為一年期整合型計畫，除了以拍撲式微飛行器實際升空飛行為主要研究目標，也不斷改良，包括以下工作細節：(1)飛行器之任務界定。(2)微飛行器尺度律與能量密度之估算。(3)微飛行器系統化設計程序之發展。(4)微飛行器之減重協調工作。本研究已完成以上四項要點，並成功遙控飛行超過2分鐘。

關鍵字：微飛行器、拍撲翼、現地量測、微機電系統

Abstract

Subject to the possible mission of tracking targets with specific image or sonic characteristics in the next decade, the autonomous micro-aerial-vehicle (MAV) has many potential applications accordingly. Excelling on monitoring the strike movement, surveying the home-cares for the elders and children, or even security checking on dangerous and valuable facilities, MAVs would not only show their capabilities in surpassing the physical obstacles on the ground, but also prove their right stuffs on miniaturization and excellent maneuver.

This one-year integrated project is scheduled to fly a flapping MAV in the sky and with long

time duration. And we improve the design and flight performance continuously. Detailed work items includes: (1)Flight mission confirm; (2) Scaling law and power density estimate; (3)System design and developing of MAV; (4)Reducing the weight of MAVs. These four items of work are all finished. In addition, the MAV has successful flight with wireless control more than 2 minutes.

Keywords: MAV, flapping wing, MEMS, piezoelectric, on-site measurement.

二、計畫目標

自1903年萊特兄弟成功發明飛機以來，人類歷史首次靠機械動力順利翱翔天際，此後飛行器具發展無不以最短時間內運送最多的人力、貨物為目的，如DC-3運輸機、波音747機到協和號客機等。到了20世紀末期，隨著高科技電子及MEMS技術蓬勃發展之賜，飛行器的設計開始有小型化、微型化發展的新趨勢，具有體積小、重量輕且成本低廉等優勢。

在軍事應用領域，微型飛行器還可於低空或近距離進行偵察和監視，或是對衛星和軍用偵察機觸及不到的盲區或人員無法涉足的地區進行偵察。同時微飛行器可以被部署到適當的位置，作為固定而隱蔽的地面感測器即時傳送偵察資訊。此外，微型飛行器還可在城市建築物群中以緩慢的速度飛行，可飛抵、甚至停留

在建築物內進行偵察，探測和尋找建築物內部的敵方人員或恐怖分子，因此，它在未來的城區戰場和反恐軍事行動中具有極為廣闊的應用前景。拍撲式微飛行器集合了許多複雜之控制系統及物理系統，其關鍵技術包括下列各點：

1. 拍撲式微型飛行器在機翼尺寸上遠小於一般航空飛行器，其可搭載元件裝備等荷重受到極大的限制，如導航系統、動力源、驅動器、飛行控制器、感應器及訊號傳輸設備，不會有太多的選擇餘地。因此，微飛行器必須採用高強度重量比的材料來減少重量外，其餘飛行裝備也必須以最大程度的微型化來配合，以減輕重量縮小空間。

2. 對於15 cm 翼展之拍撲式微飛行器，由於其尺度小且飛行速度低，雷諾數(Re)僅在 $10^2\sim 10^4$ 左右，非常不利於飛行，此範圍與自然界的小型鳥類及昆蟲相仿，其拍撲特性成功克服低雷諾數所造成升力係數驟降及阻力係數上升的影響，正可做為拍撲式微飛行器借鏡。對於昆蟲拍撲空氣動力學原理及運用，如何成功應用在拍撲式微飛行器裡頭，也是一個關鍵的仿生技術性問題。

3. 在高效力推進裝置方面，其驅動相關裝置是拍撲式微飛行器的關鍵設備，必須在有限的體積及重量內，產生足夠推力供微飛行器上搭載的一切裝備。但研發高功率及高能量密度的驅動裝置或動力源，同樣面臨相當程度的技術問題。

4. 在拍撲式微飛行器自主飛行方面，拍撲式微飛行器的飛行控制技術又較傳統定翼式飛行器複雜許多，需要靠極佳的飛行控制系統協助，還得面臨惡劣天候或陣風的干擾，如何維持固定航向及穩定飛行姿態是自主飛行所存在的一大難題。在自主飛行同時，需要與地面接收站進行聲音或影像等數據傳輸，必須在有限距離、能耗及頻寬下，進行可靠的訊號傳遞，這也是拍撲式微飛行器所面臨的挑戰之一。

本計畫目的除針對上述主要影響拍撲式微飛行器的關鍵技術逐一克服外，還會將理論與

實務結合比對探討，最後研發成果將提供業界或相關單位參考。

三、工作項目與成果

1. 飛行器之任務界定

本世紀以來，人類社會的區域性族群對立衝突有增無減。以國外而言，以色列—巴勒斯坦的流血衝突不斷；許多歐洲國家，也多有少數移民不預期衝突行動發生。再以國內來說，今年九月份起發動的「紅衫軍」以及「天下圍攻」示威行動，由於抗爭與擁扁兩陣營民眾不管在人數與集結位置都極難預測，讓警方在保安警力的調配上傷透了腦筋。

本計畫無意在政治上表達是哪一立場，但在國內政治對立衝突無法在短期內消弭的現實下，盼望對於捉襟見絀的警方，在未來提供一簡便有效的訊息蒐尋工具，協助其執行任務，避免因為不及因應而釀成傷亡悲劇。

本計畫未來(5~10年後)的應用願景或情境，係設想在發生衝突的小型區域(約直徑五公里範圍內)，放出拍翼式微飛行器，使其一邊自主飛行、一邊自行判斷何處是最高亢的群眾音響源(如群眾要求下台的聲響)，或最偏何種特徵的影像源(如紅衫軍之醒目顏色)，並朝該標的移動；到達目標區後，除了立即發出訊息回基地台外，並持續於目標區盤旋監控。短期而言，為儘速使得微飛行器任務單純化，本拍翼式微飛行器將暫定具有追蹤特定紅外線光源(如暴徒縱火焚車)的辨識功能，引導警方儘速前往處理。

由於本計畫擬製作的微飛行器，因結合塑膠模具量產技術，強調低價位與小尺寸，故可以使用後拋棄，不必擔心要如何多次使用與回收。再者因屬於自主飛行，使用者無須事先培訓微飛行器之遙控高超技巧，而只須簡要知曉微飛行器之啟動施放動作，以及詮釋回傳訊號之意義即可。

依據美國國防先進計畫研發處(DARPA)的定義，微飛行器(MAV; Micro aerial vehicle)

在各方向的尺寸限制為15 cm，性能要求為：航程約10 km，飛行速度最高速度約30 英哩/每小時，飛行時間約20 分鐘，若以微飛行器的基礎構型，可將其分為三大類（圖1），分別為定翼式、旋翼式與拍翼式（亦可稱為拍撲翼；flapping wing）。在此之前已有許多國家的軍方單位與學術界都投入相當多的資源，微型飛行器應具有自主飛行、攜帶任務載荷執行特定任務、通信及傳輸資訊等基本特徵。與常規無人飛行器相比，由於微型飛行器具有體積小、隱蔽性好、重量輕、成本低、功能強、攜帶方便、操作簡單等突出特點。

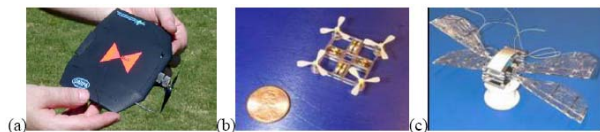


圖1 微飛行器之分類：(a) 定翼式[1]，(b) 旋翼式[2]，(c) 拍翼式[3]

本研究決定採用拍撲式微飛行器來完成任務，而不採用傳統定翼式或旋翼式飛行器，理由列於表一：

表一、定翼式與傳統遙控模型直升機執行任務的缺點

	定翼式飛行器	傳統遙控模型直升機
不適任理由	<ul style="list-style-type: none"> ● 仍需要較長的起降跑道 ● 飛行速度過快 ● 避障半徑較大，可操縱性較差 ● 飛行高度必須夠高，較遠離標的物 ● 不易匿蹤 	<ul style="list-style-type: none"> ● 機身較重 ● 自主飛行控制遠比定翼機或拍翼機困難 ● 通常使用內燃引擎，噪音太大，無法進行音響式追蹤模式的物 ● 不易匿蹤 ● 單價昂貴、無法大量投入先期研發之嘗試錯誤

2. 微飛行器尺度律與能量密度之估算

微飛行器是一結合許多子系統之複雜的智慧型系統，在設計上特別要考慮尺度律 (scaling law) 的效應。例如，就翼展為15 公分且飛行速度在 3~10 m/s 的微飛行器而言，其外觀特徵遠小於一般飛機，其飛行時之雷諾數在 $10^2 \sim 10^5$ 之間，這麼低的雷諾數帶給微飛行器較不利的空氣動力表現（升力係數下降，阻力係數上升，機翼上氣流易分離導致失速臨界攻角降低。隨著尺寸縮小所伴隨問題，巨觀下的理論根據已不敷使用，本研究即針對微飛行器隨尺寸縮小後設計上尺度律問題加以分析探討。基於幾何相似的觀念，可從鳥類、蝙蝠及昆蟲的回歸分析中，預測出MAV 的尺寸大小、整體重量、飛行速度及拍撲頻率等，利用此相關性，再根據

機翼面積飛行速度、展弦比及重量等，便可預測出微飛行器之空氣動力特性。

在1996 年時Tennekes [4]針對目前飛行器、鳥類及昆蟲等整理出相當有趣的關聯性，其製作之”The Great Flight Diagram”涵蓋當時所有飛行物體，呈現重量、機翼負載、省油飛行速度(cruising speed)，圖中陰影部分便是當時MAV 所在範圍。隨著科技進步，MAV 可能會移到左下角的地區。如圖2 所示，從果蠅 (*Drosophila melanogaster*) 到重量大其500 億倍之波音747間，藉由尺度律的關係可輕易預測翼展隨機翼負載的變化。

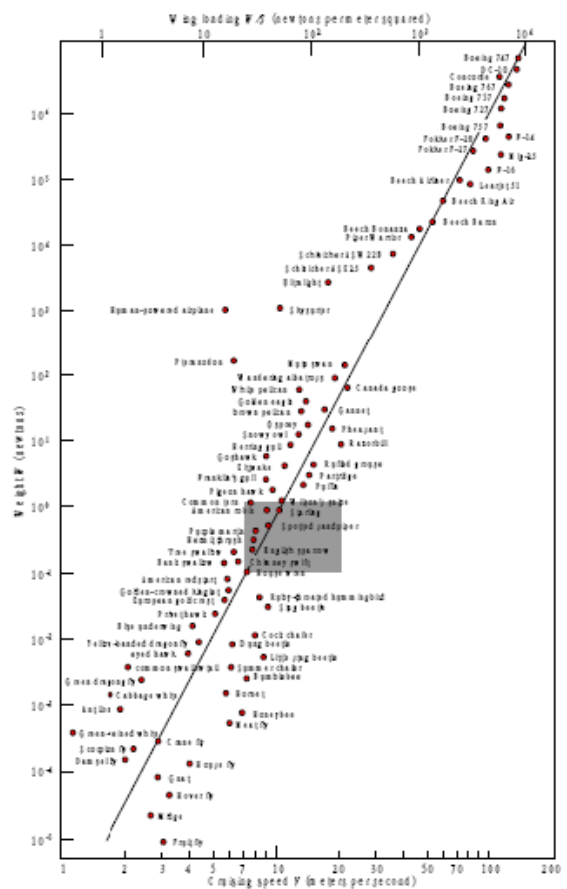


圖2 The great flight diagram [4]

假設在穩定飛行時升力及本身自重是相等的，由 Eqs. (1-2)可知機翼面積 (S)、飛行速度 (V)、空氣密度 (ρ) 及機翼負載 (W/S) 的相互關係，當機翼載重愈大及其飛行速度愈快。

$$L = W = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (1)$$

$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L \quad (2)$$

幾何相似性(Geometric similarity)

鳥類本身自重 (W)、升力 (L) 及質量 (m) 在無加速情況下，可表示為 Eq. (3)，機翼面積 (S) 可表示為 Eq. (4)，機翼負載可表示為 Eq. (5)，也改寫為 Eq. (6)表示，其中 K_1 為常數。圖3 是鳥類自重與機翼負載的關係，其關聯性符合 Eq. (6) 的預期。

$$W=L=mg\sim L^3 \quad (3)$$

$$S\sim L^2 \quad (4)$$

$$W/S=L \quad (5)$$

$$W/S=k_1W^{1/3} \quad (6)$$

翼展 (Wingspan)

在研究具拍撲運動的動物時，各項參數對飛行物體之重量比是相當有趣的課題。翼展與重量之間的關係也可從尺度律的方法來估算，但這種方法並不完全正確，Greenewalt [5] 在1962發現隨著重量增加，鳥類翼展會比尺度律所估算來得大。Norberg [6] 統計一般鳥類之翼展與重量的斜率為0.4，有別於尺度律估算之0.33。隨著種類或家族的不同，斜率也會不同，但對於大部分的鳥類其斜率相當接近約0.28~0.42 (蜂鳥除外)。翼展與重量之回歸分析如圖3所示，蜂鳥的斜率遠較一般鳥類陡峭，意味著蜂鳥相較於大型鳥類其有較短的翼展。

翼面積 (Wing area)

Norberg [6] 研究中說明機翼面積在不同飛行物種間的變化率比翼展還來得大，蜂鳥就是一個明顯特例，在相同翼展下它比其他鳥類有更大的機翼面積;在相同重量下，蜂鳥依然較一般鳥類有較大的機翼面積。Greenewalt [5] 將 Norberg 的研究作更進一步研究，其分類如下:

1. 燕雀類 (Passeriform model):

$$S\sim m^{0.78} \quad (7)$$

2. 岸鳥類 (Shorebird model):

$$S\sim m^{0.71} \quad (8)$$

3. 鴨類 (Duck model):

$$S\sim m^{0.71} \quad (9)$$

機翼負載 (Wing loading)

Greenewalt [5] 研究中將機翼負載與質量的

關係整理如下:

1. 燕雀類 (Passeriform model):

$$\frac{W}{S} \sim 0.03-0.08m^{0.275} \quad (10)$$

2. 岸鳥類 (Shorebird model):

$$\frac{W}{S} \sim 0.044m^{0.4} \quad (11)$$

3. 鴨類 (Duck model):

$$\frac{W}{S} \sim 0.08-0.11m^{0.4} \quad (12)$$

展弦比 (Aspect ratio)

展弦比 (aspect ratio, AR) 也可用來表示飛行動物的飛行特性，其為翼展與翼面積的關係式，定義如下:

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (13)$$

其中 b 為翼展， S 為翼面積。在一般情況下，飛行器的敏捷性與機動能力隨著展弦比的減少而提高，故而一般軍用戰機或特技飛行飛機都比一般傳統飛機的展弦比來得小，在一般飛行動物上也有相同的規律。另外，誘導阻力 (induced drag)，會隨展弦比的增加而減少，同樣地，升阻比也會因展弦比的增加而減少，一般鳥類的展弦比會隨體重的增加而加大，而蜂鳥的展弦比基本上與重量無關。

拍撲頻率 (Wing beat frequency)

飛行動物及昆蟲的翅膀由肌肉、骨骼構成，其強度有限，拍撲頻率因此受到限制。Wei Shyy [7] 研究中指出，透過幾何條件的相似性，拍撲頻率上限為:

$$f \sim L^{-1} \sim m^{-1/3} \quad (14)$$

由上式可知，拍撲頻率隨特徵長度減少而增加。Norberg 針對拍撲頻率與重量關係的統計資料，如圖4所示。大型鳥類以最省力速度飛行時，大部分拍撲頻率都很低，一般而言其翼尖速度低於飛行速度，以滑翔姿態飛行。而小型鳥類或是大型蟲，翼尖速度往往大於飛行速度，有些種類昆蟲還可達100 Hz以上的拍撲頻率。

微飛行器關鍵尺寸設計如翼展、翼面積、

機翼載重、展弦比及拍撲頻率等參數，都可以透過分析自然界中飛行動物的尺度律作為設計主要依據，也可透過尺度律來引導空氣動力等相關實驗，進而製作出高性能、高機動性之仿生拍撲式微飛行器。

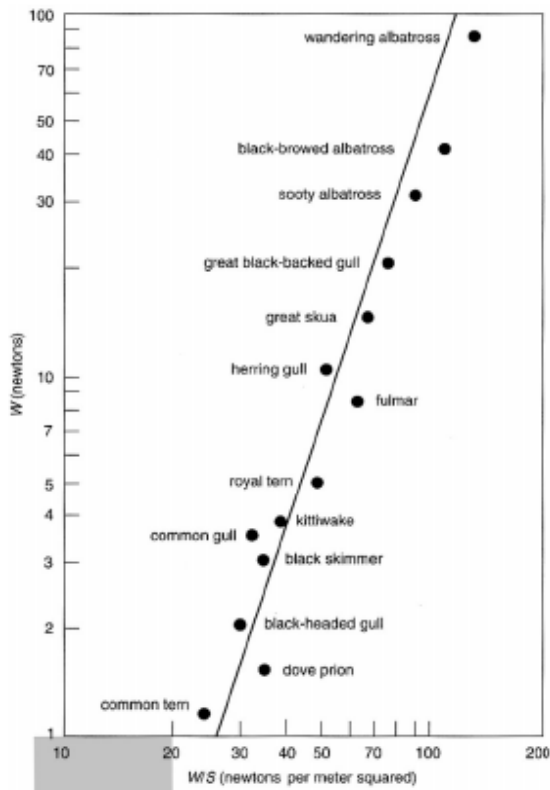


圖3 鳥類本身重量 (W) 與機翼負載 (W/S) 關係，透過幾何相似性規則繪製可得其成正比關係 [4]。

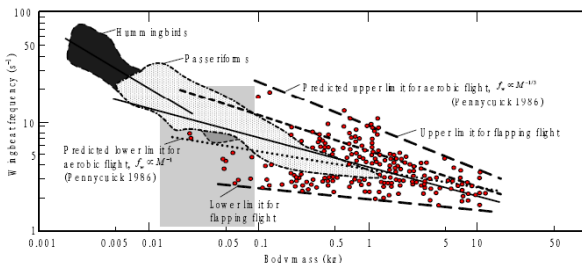


圖4 鳥類拍撲頻率與重量關係圖，陰影部分為 MAV 所相對應的範圍 [6]。

3. 微飛行器系統化設計程序之發展

拍撲式微飛行器是一相當複雜的系統之結合，其飛行及控制系統遠較一般傳統定翼式飛機複雜許多，在開發製造上除尋找高強度重量比的材料外，還得克服翼面積縮小後所衍生之種種問題，此外還必須開發出高效率的拍撲運動機構，並透過微系統製造技術襄助，來開發 MAV 所需高形狀精度機翼。當然在這麼有限的空間裏頭，要承載動力系統、自主飛行控制系統及高分子鋰電池等，並完成目標物追蹤的任

務，的確是一件不容易的事。本研究針對各項難處，一一抽絲剝繭，並整理出一套合適開發流程，並透過各子計畫間相互配合排除萬難，圖 5 即為拍撲式微飛行器的開發流程。

第一階段-任務需求分析

根據微飛行器的系統工程 (systems engineering)，系統工程的第一步即需定義其任務需求分析 (requirement analysis)，其中包括任務剖面 (mission profile) 之規劃以及航程、續航力、速度、飛行高度、空重等規格。

本研究採拍撲式構型設計研發。拍撲翼飛行器之構想是仿效大自然中之飛行動物，諸如各類蟲、鳥等。相對於固定翼，在低速狀態下，可負荷相對較高之重量，例如蜂鳥、昆蟲在滯空盤旋時，其翼尖之 8 字型運動，可提供有效之升力與推力。且拍撲式微飛行器具高機動性，使用幾乎透明的翼膜及其低噪音特性大大增加了拍撲式微飛行器的匿蹤性能，其簡易的操控模式更是旋翼微飛行器難以望其項背的。

第二階段—找尋合適的微推進與能源 (電力) 系統

由於微飛行器體積小無法搭載過重的電力系統，因此要找出適合裝在飛行器上才行，且可以作持久的飛行是我們的首要目標。

MAV 的能源系統必須具備高能源密度及高功率密度的特性，必須提供推進系統 (馬達) 所需之足夠能源。二次電池 (即可充電電池) 在微飛行器中是很重要的，控制系統、影像傳送系統、驅動馬達等都要電力，許多系統也都需要電力才能工作，但是目前電池卻是一大問題。

目前商業化鋰離子電池之能量密度約為 260-270 kWh/m³，是鎳鎘鹼性電池的二倍以上，且鋰電池之動作電壓平均在 3.6-3.7 V，是鎳鎘與鎳氫的三倍 (1.2V)。相較於其他電池，鋰離子電池具有高能量密度、高工作電壓及放電特性平穩等優點。鋰電池是現今使用最為廣泛，但是在拍撲式微飛行器卻只能使用數分鐘而已，距離實際運用階段的滯空時間 1-2 小時

仍有一段差距。

第三階段—氣動力分析與機構設計

良好的氣動力外型可以降低空氣阻力，在飛行中減少不必要的電力消耗，延長微飛行器飛行的時間。

飛行器的雷諾數定義為 $Re=VL/\nu$ ，其中V為飛行速度、L為特徵長度、 ν 為空氣之運動黏度(kinematic viscosity)。假設微飛機的飛行速度 0 km/hr，機翼 15 cm，機翼截面長度 5 cm，推導可得 $Re=47564$ 。跟一般大型飛機相比，微飛行器的速度低、尺度小、雷諾數極低，以 $V=5-20$ m/s， $L=15$ cm 估算，雷諾數約在 10^4-10^5 ，屬於低雷諾數空氣動力學。而微飛行器因體積小、質量輕，其機翼為低展弦比翼，故翼尖渦流 (tip vortices)之三維效應則會導致誘導阻力及下洗阻力 (downwash) 的產生，而更降低了微飛行器機翼的升推比值(L/D)。

氣動力外形需考量主翼、尾翼性能、氣動力係數估算及飛行器外型配置。若拍撲機構設計有磨耗低且運轉順暢特性，可有效降低電池使用量。本研究製作之拍撲式微飛行器，所採用的拍撲機構僅具有簡單4連桿的拍撲運動。利用大量風洞實驗數據來獲取寶貴空氣動力數據，並不斷改進，以求得最佳呈現。

第四階段-風洞量測

在風洞量測的部分，大致可分為下列幾項：

(a)空氣動力量測

對飛行器之風洞測試，主要提供測試模型之空氣動力數據。

(b)流速量測

流場的速度分佈為實驗研究所必需，亦為理論分析所欲知之物理量。目前常用量測風洞流速的儀器設備，主要有皮托管測速儀 (Pitot tube manometer) 及熱線測速儀 (hot wire)。若依實驗需求，皮托管測速儀為實驗最基本流速量測裝備，可提供量測位置的平均流速，唯無法提供瞬時速度。假若瞬間速度的資訊對實驗者而言是重要的話，在紊流情況下，則熱線測速

儀為較佳的選擇。本研究使用的熱線測速儀其精度為 0.1 m/sec。

(c)壓力量測

如前述平均壓力值與擾動壓力信號有助於空氣動力特性的瞭解，亦可間接地推知模型周遭之流體運動現象，乃非常寶貴的資訊。對於平均壓力量測，一般可在模型表面鑽壓力孔以管線連結壓力感測器量測之；而對於擾動壓力的量測而言，最好是將壓力感測器埋在靠近表面量測位置，以避免壓力擾動信號強度的減弱或延遲等問題。近年來發展之微機電壓力感測元件，具有極高的潛力應用在風洞實驗，加上感測器的物理尺度小，且感測器能設計為陣列方式，有助於壓力量測分佈值的空間解析度。

第五階段-穩定飛行測試

飛行穩定與控制系統及試飛部份，一般現有的遙控器都是較基本地由操作者來控制，但微飛行器的大小才6英寸，當它飛行到一百公尺遠的地方，人的肉眼將很難看出MAV操控的方向，甚至連MAV本身都不易找尋，這時MAV便容易發生意外。另外MAV也非常容易受到氣流影響，也許一陣強風，人還來不及反應，MAV就因為氣流不穩定而墜毀。因此快速、高度自主性且自動穩定之控制系統是控制上的一個重要的需求。(此方面的工作，委託子計畫二發展MAV水平穩定飛行所需相關技術。)

對微飛行器而言，飛行穩定與控制系統是相當關鍵的環節，MAV低速、質輕、尺度小、低展弦比、低慣性力矩等因素影響，造成它對飛行環境之變化極為敏感。穩定與控制系統最主要的功能就是穩定與控制微飛行器及提供正確的飛行路線，要能具備快速、高度自主性且自動穩定之控制系統，微飛行器的穩定與控制系統之實現，需要微型感測器(含微加速度計、微陀螺儀之整合)、微致動元件與控制理論技術。

第六階段-飛行任務達成

最後可因飛行任務的需求搭配上遙控、穩定與控制系統、IR影像擷取及傳送系統、導航

系統、微感應器系統等，達到最大的任務需求以進行任務的監控。再透過系統整合概念，使推力與能量、電力動力系統、空氣動力與設計、飛行控制、通訊和視訊各分系統充分的整合與最佳化，這樣才能使微飛行器系統最佳穩定，充分發揮其最佳價值及性能。控制系統，遙控系統包含接收器(receiver)、致動器(actuator)、遙控器(內含transmitter)。接收器的功能將遙控器所傳送來的訊息解碼，再傳送到其他控制原件上，執行遙控器的動作。

通常接收器有三個頻道、四頻道、六頻道，目前也有八頻道的，頻道的多寡就是接收器可控制元件的數目，例如遙控器上控制水平尾翼的左右，就是控制飛行器的左右，這樣就是一個頻道。一般來說微飛行器大約使用三個到六個頻道，可控制方向舵、升降舵、馬達轉速等。現今有接收器可以做到多重控制，可同時控制兩個致動器動作，這樣對於整個微飛機的控制有很大的幫助。

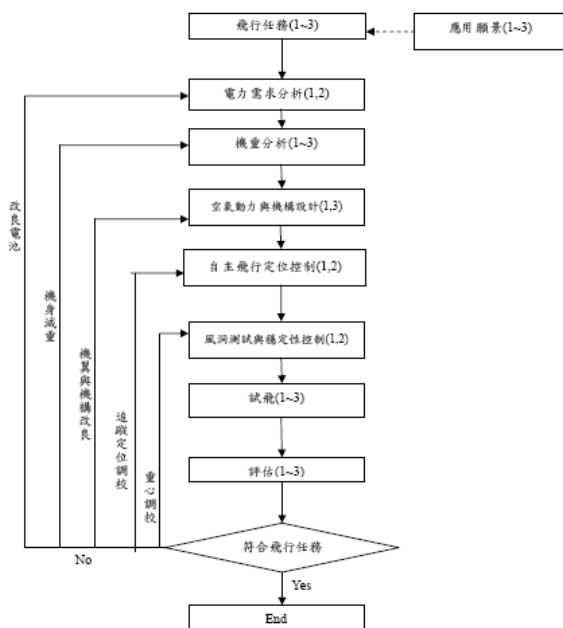


圖5 MAV 開發流程與各計畫分工(圖中數字為子計畫編號)。

4. 微飛行器之減重協調工作

本研究開發至今歷經多次改良，過去之傳動系統基座、連桿組、翼前緣骨架及電池等仍然嫌重，為求20 cm 翼展之拍翼式飛行器可順利升空，本研究決定重新調整四連桿機構尺

寸，並使用廉價又具有高強度重量比之鋁合金 7075，作為傳動系統基座及連桿組材料，企圖大幅減輕機頭部位重量，連桿重量減輕後，可降低機構運轉時之慣性及能量消耗。基座上各齒輪孔位之相對距離非常重要，齒輪間之圓心距過小，馬達電流會因運轉不順暢而升高，圓心距過大則會產生滑齒現象，所以必須取一適當距離才可正常運轉。四連桿尺寸大小，直接影響拍翼角度，及拍翼時左右兩翼之對稱性，錯誤長度設計會導致運轉時有過大振動或無法運轉等情況。為求鋁合金元件有高加工精度及高重現性，特以 CNC 放電線切割方式 (EDWC, electrical discharge wire cutting) 來達成，因鋁合金具高強度重量比的特性，基座及連桿壁厚可盡量削薄以達減重目的。

本研究設計鋁合金基座如圖6所示，並決定採用 DiDEL 公司生產之齒輪，此減速齒輪共3個(如圖7所示)，其齒輪模數皆為0.3，固定於馬達軸心上之小齒輪為 9 齒，中齒輪外部為 48 齒內部為 12 齒，大齒輪外部為 60 齒，所造成之減速比為 26.6。小齒輪與中齒輪圓心距之理論值為 8.55 mm 如式，中齒輪與大齒輪圓心距之理論值為 10.80 mm 式。此理論值過於契合常使得齒輪無法運轉，根據多次組裝經驗，較合適的圓心距離值為 8.58 mm 及 10.82 mm，其分別為圖6 中 d_1 及 d_2 的長度。

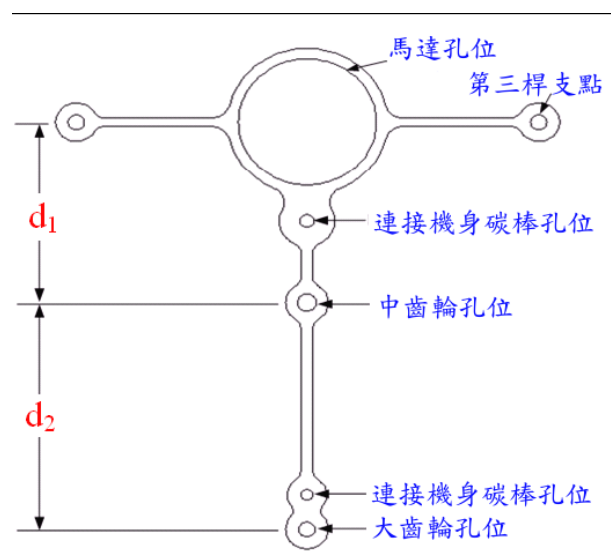


圖6 傳動系統基座，圖中 d_1 、 d_2 分別為小齒輪與中齒輪及中齒輪與大齒輪之圓心距。



圖7 本研究採用DiDEL 公司生產之輕量化齒輪，左至右依序為小齒輪、中齒輪及大齒輪。

鋁合金傳動系統設計如圖7 所示，圖中a、b、c、w 及h 代表第一桿、第二桿、第三桿、寬度及高度。h 即為圖5 中 d_1 及 d_2 長度之和，搭配a、b、c 三桿長度變化，可得出不同拍翼角度，a、b、c 長度對拍翼影響敘述如下：

a：可影響拍翼角度、左右兩翼拍翼對稱性及輸出扭力。a 值越大，拍翼角度 (stroke angle) 越大，左右兩翼拍翼相位差 (phase lag) 也越大，輸出扭力減小。

b：其長短會影響拍翼對稱性、機構運轉時振動現象，需特別注意運轉時第二桿與第三桿的夾角 ($90^\circ \pm \phi^\circ$)，依經驗 ψ 必須維持在 30° 內，機構運轉會較順暢。

c：此長短影響拍翼角度及拍翼對稱性甚鉅，在設計時c 長度必須接近且小於 $0.5w$ ，同時避免第三桿長度太接近 $0.5w$ ，而使運轉時產生桿件相互碰撞。

以基座寬度20 mm 為例，當連桿長度a、b 及c 設定為3.0、20.0 及9.0 mm時，拍翼角度隨第一桿位置變化如圖8 所示，此拍翼行程角度為 38.9° 度，左右兩翼拍翼角度相差 2.0° 度，雖無法避免，但在設計時相位差應盡量降至最低程度。第二與第三桿之夾角隨第一桿位置變化如圖9 所示， ϕ 角變化在 23° 度內。尺寸設計如圖11所示。

本研究試飛及實驗階段，需要大量連桿、基座等相關零件，特以放電線切割方式加工成型。放電線切割機以一條直徑0.25 mm 運行之黃銅線做為電極，移除金屬原理與放電加工 (Electrical discharge machining, EDM) 相同，通常床台移動以CNC (Computer numerical control) 來配合。EDWC 與EDM 同樣是以火花的熱能來移除工件，在加工區域中，電極線及工件隨

時都被介電流體沖刷，介電流體扮演了冷卻劑及迅速沖刷金屬微粒的角色。EDWC 具有NC 能力，可作相當精確的2D 輪廓切削，金屬工件的硬度對EDWC 加工速率沒有影響。以放電線切割製作，除具有高形狀精度的特性外，一套拍翼式微飛行器所需之傳動系統零件，含工件架設之全部加工時間在2 小時內便可完成(圖11(a))。如圖8 所示，第一桿需與大齒輪緊密接合，外型設計類似凸輪形狀，其內部設計一內齒輪輪廓，使其可輕易套在大齒輪之內部齒輪上，此緊密接合可避免運轉時脫落。第二桿則設計為細長型。第三桿須與翼前緣骨架順利接合，特意在末端設計成音叉形狀，待置入碳棒後，以強力瞬間膠來固定。四連桿本質上左右兩翼已存在相位差，飛行時又偶有陣風因素，為減少因此而造成飛行時翻覆現象，故第三桿與碳棒夾角設計 20° 度之上反角，可增加飛行穩定。傳動系統基座及4 連桿詳細尺寸如圖所示，組裝完成後之傳動系統如圖12(b)所示。傳動系統各零件重量如表二所示，

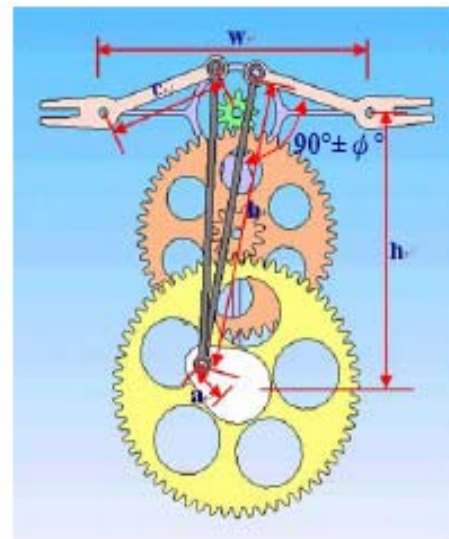


圖7 鋁合金傳動系統設計圖。

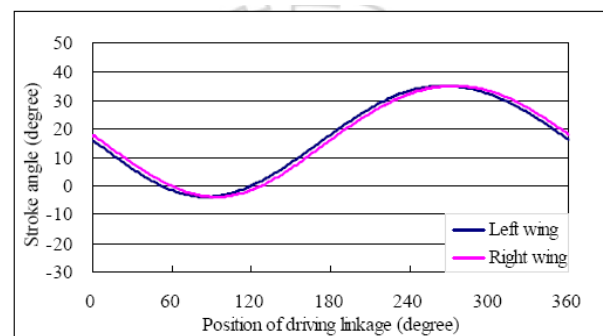


圖9 拍翼角度隨第一桿位置變化關係圖。

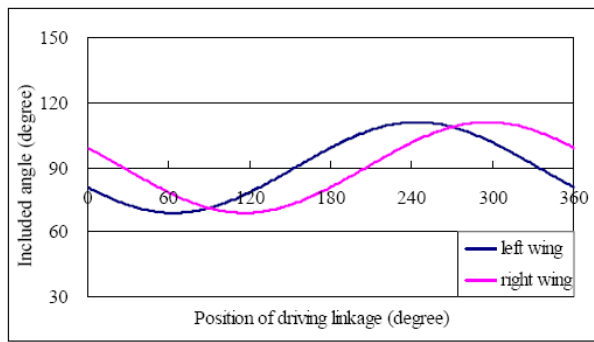


圖10 第二桿與第三桿之夾角隨第一桿位置變化關係圖。

整個傳動系統重量為2.30 克，已輕於加州理工學院Micro Bat 之傳動系統2.8 克 [8]。整個微非行器重量約5.6克，如圖13(a)所示。控制晶片及裡電池如圖13(b)所示。圖14之遙控飛行時間約2分2秒。

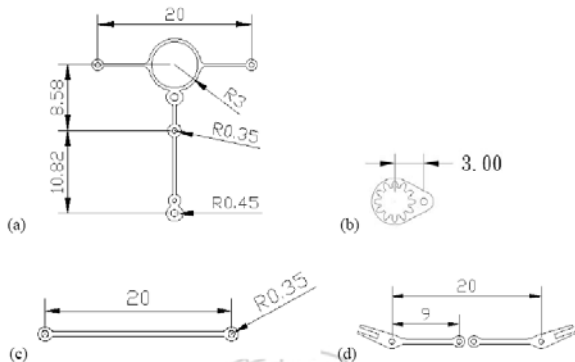


圖11 鋁合金傳動系統組件設計圖：(a)基座；(b)第一桿；(c)第二桿；(d)第三桿(單位：mm)。

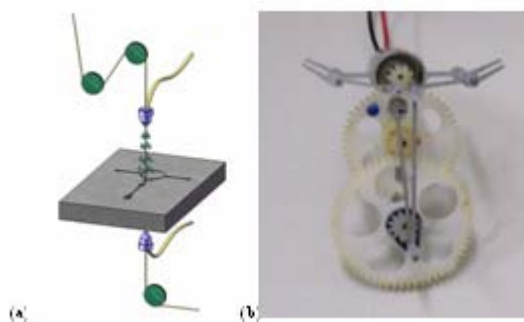


圖12 輕量化鋁合金傳動系統：(a)放電線切割加工示意圖；(b)鋁合金傳動系統。

四、計畫自評與結論

本計畫為一年期計畫，除了以拍撲式微飛行器實際升空飛行為主要研究目標，也不斷改良，包括以下工作細節：(1)飛行器之任務界定。(2)微飛行器尺度律與能量密度之估算。(3)微飛行器系統化設計程序之發展。(4)微飛行器之減重協調工作。已完成以上四項要點，並成功遙控飛行超過2分鐘，執行已達100%。

至於本計畫之研究成果，總計已發表在國際會議論文3篇[9-11](尚有2篇確定在97年度發表)、國際期刊1篇[12](尚有1篇投稿中)、兩岸及國內會議論文6篇[13-18]，完成4位碩士[19-22]及1位博士班[23]研究生學位論文之指導，申請中華民國發明專利1件(美、日、大陸後續申請中)[24]。

表2、傳動系統重量表

Part	Figures	Fig. 11	California Micro Bat (by Penn State)	Tomlinson's Golden Bat
		Other technique		RD/C
Motor holding bars (No. 1)		0.5142	Not available	0.2412
Electrical motor		1.4502		1.3992
Gears (No. 2-4)		0.3732		0.3732
1 st bar (part of No. 4)		0.008		0.0295
2 nd bar (No. 5)		0.3422		0.0407
3 rd bar (No. 4)		0		0.0404
Others (connecti ng pin, axial globe)	Prototype of the 3 rd bar	0.2574		0.0473
	Axis of gear No. 4	0.0905		0.0350
	Axis of gear No. 3	0.0315		0.0210
	End of axis of the 2 nd and the 3 rd bars	0.0444		0.0171
	Connection of 1 st bar	0.0281	0.0100	
	Globe	0.0934	0.0372	
Weight total (g)		3.7555	2.8	2.3018

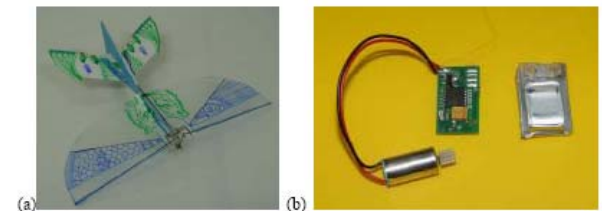


圖13 拍翼式微飛行器：(a)實體圖；(b) 高分子鋰電池(1.15 克)及接收晶片(0.4克)。



圖14 拍翼式微飛行器之飛行軌跡，標示軌跡約飛行4秒，97年3月(合成圖)。

在衍生效益方面：

- 本計畫已受邀在96年11月的國科會航太學

門成果發表會演講介紹研究成果。

- 參與96與97年台北國際發明暨技術交易展國科會創新館的展示(“金探子”微飛行器;相關報導參見[25])。
- 受邀在97年3月全國UAV大賽(地點:空軍官校)中展示拍翼MAV飛行。
- 應邀發表97年3月21日國科會「學門研究成果成功案例專欄報導」,「拍出精彩、飛出丰采」-拍翼式微飛行器之研究--航太學門[26]。
- 本計畫博士畢業生徐振貴博士,獲美國Wright State大學機械材料系邀請,前往擔任博士後研究一年,並將於2009年試圖合作申請美國空軍MAV或NAV計畫。
- 以「“金探子”微飛行器」為主題,申請國科會50科學之旅計畫,獲補助44.1萬元([97-2515-S-032-001-](#))。
- 增加國立臺灣大學應力所精密風洞量測與國防大學機電航太系CFD設計分析等專長,擴大本整合團隊由3個子計畫,增為4個子計畫,並續獲國科會航太學門97年度一年期整合計畫補助,總經費約450萬元。
- 開始與產業界洽談產學合作計畫與技術授權。97年10月並將由淡江大學創育中心輔導先成立公司,經營拍翼飛行器之相關產品銷售。

誌謝

感謝奇鎡公司提供風洞設備,淡江大學儀器實驗中心與工學院提供部份經費補助。

參考文獻

- [1] http://www.avinc.com/ADC_Project_Details.asp?Prodid=48
- [2] Kroo, I. and Kunz, P., “Meso-scale flight and miniature rotorcraft development,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 195, 503-517, 2001.
- [3] Scott, P., “A bug’s lift,” *Scientific American*, 280, no. 4, 1999.

- [4] Tennekes, H., *The Simple Science of Flight (from Insects to Jumbo Jets)*, Boston, MA: MIT Press, 1996.
- [5] Greenewalt, CH., “Dimensional relationships for flying animals,” *Smithson Misc Collect.*, 144:1-46, 1962.
- [6] Norberg, U.M., *Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution*, New York: Springer, 1990.
- [7] Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D., “Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, pp. 455-505, 1999.
- [8] T. N. Pornsin-sirirak et al., “Titanium-alloy MEMS wing technology for a micro aerial vehicle application,” *Sensors and Actuators A: Physical*, 89, 95-103, 2001.
- [9] L.-J. Yang et al, “The micro aerial vehicle (MAV) with flapping wings,” Proc. IEEE ICM/ HIMA conference, 2005/07/07.
- [10] L.-J. Yang et al, ” A flapping MAV (micro aerial vehicle) with PVDF-parylene composite skin”, Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology, Singapore, 2006/06/26.
- [11] L.-J. Yang et al, ” Smart flapping wings with a PVDF sensor to modify aerodynamic performance of a micro UAV”, Transducers & Eurosensors’07, The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France, June 10-14, 2007.
- [12] L.-J. Yang et al, “ Flapping wings with PVDF sensors to modify the aerodynamic forces of a micro aerial vehicle”, *Sensors and Actuators A*, 139, pp. 95-103, 2007
- [13] 楊龍杰等, ”拍撲式微飛行器之設計與製作,” 第四屆海峽兩岸航空航天學術研討會, 南京/上海, 2004/08/28, pp. 36-41.
- [14] 楊龍杰等, ”拍撲式微飛行器製作及 PVDF 機翼現地升力量測研究”, 第五屆海峽兩岸航空航天學術研討會, 淡江大學, 2006/03/14-15, pp. 385-393.
- [15] 楊龍杰等, “拍撲式微飛行器之製作及其現地升力量測研究”, 中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會, 94年11月。
- [16] 楊龍杰等, “拍撲式微飛行器之製作及其現地升力量測研究”, AASRC/CCAS Joint

Conference, 2005。

- [17] 楊龍杰等，“微飛行器用輕量化齒輪傳動系統之研製”，第十一屆奈米工程暨微系統技術研討會。
- [18] 楊龍杰等，“利用智慧型 PVDF 壓電翼膜調校拍撲式微飛行器之空氣動力特性”，第十一屆奈米工程暨微系統技術研討會。
- [19] 何仁揚，「拍撲式微飛行器之製作及其現地升力之量測研究」，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 94 年 6 月。
- [20] 馮國華，「拍撲式微飛行器之製作改良及飛行訊號傳輸之整合」，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 96 年 6 月。
- [21] 施宏明，「結合 PVDF 現地量測之拍撲式微飛行器製作」，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 96 年 6 月。
- [22] 高敏維，「微拍翼機可撓翼之氣動力實驗」，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 97 年 6 月。
- [23] 徐振貴，「拍翼式微飛行器之設計、製造與測試整合」，淡江大學機電工程學系博士論文，民國 97 年 6 月。
- [24] “拍翼軌跡呈 8 字型之仿生微型飛行器”，中華民國發明專利(申請人:淡江大學;發明人:楊龍杰)，97.01.10 申請，案號 96102271。
- [25] “金探子”微飛行器網路新聞報導
<http://tkutimes.tku.edu.tw/New/2006/detail.php?seqno=0000017182> 或
<http://n.yam.com/cna/computer/200709/20070927786316.html> 或
<http://news.epochtimes.com.tw/7/10/5/67224.htm>
- [26] 「拍出精彩、飛出丰采」-拍翼式微飛行器之研究--航太學門研究成果成功案例專欄
報 導
<http://www.nsc.gov.tw/eng/ct.asp?xItem=12752&ctNode=1993>