

## 「淡江金探子」拍翼機之研製

楊龍杰

淡江大學機械與機電工程學系教授

ljyang@mail.tku.edu.tw

### 摘要

本文回顧淡江大學自 2003 年以來發展之「淡江金探子」拍翼機研製歷程。「淡江金探子」翼展 20 公分，總質量 10 克以下，拍翼頻率 15Hz 以上，使用可充電式鋰聚合物電池提供電動馬達所需電力，帶動拍翼機構運行，並採用遙控方式改變飛行路徑，一次充電可連續飛行 8 分鐘。「淡江金探子」雖不是世界首創之無人拍翼機，但屬臺灣本土自力研發成功之機種，未來可使用於災防與生態觀測；目前已廣泛適用於航空科普教育活動與創意實作競賽之教具。本文逐一詳細記載「淡江金探子」的計畫發想、概念設計、研發瓶頸、相關學術成果，與航空科普營活動「與金探子共舞」之始末。

關鍵詞：拍翼式微飛行器、金探子、科普教育

## Tamkang's "Golden Snitch": The Development of a Flapping Micro Air Vehicle

Lung-Jieh Yang

Professor, Department of Mechanical and Electromechanical Engineering,

Tamkang University

ljyang@mail.tku.edu.tw

### Abstract

This paper presents the development of Taiwan's ornithopter or flapping micro air vehicle (FMAV) "Golden Snitch" of Tamkang University since 2003. This FMAV has a wing span of 20 cm and the total mass of 10 gram. It can be driven by a poly-lithium ion battery to remotely fly for 8 min without stop with the flapping frequency higher than 15 Hz. This native version of FMAV can be applied as the aviation education toy set at this moment, and as the surveillance platform or the ecological observer in the future. The origin, conceptual design, technical bottle neck, academic finding, and the popular science camp "Fly with Golden Snitch" have all been addressed herein.

Key words: flapping micro air vehicle (FMAV), Golden Snitch, popular science education

### 引言

有關鳥類與昆蟲之飛行，千百年來吸引人們注意；不僅止於詩詞歌詠，更顯於科學工藝。墨子魯問篇曾記載，巧匠魯班「削竹木以為鵠，成而飛之，三日不下 [1]。」其「鵠」應非單純之紙鳶或風箏，可能是仿鳥之飛行器；而希臘神話中，代達洛斯(Daedalus)與伊卡洛斯(Icarus)父子穿戴羽翼，翱翔於愛琴海上空，至終伊卡洛斯翼毀人亡之悲劇，亦代表著古今人們對於研製此類仿生飛行器之熱情。

文藝復興十五世紀，李奧納多·達文西(Leonardo da Vinci)曾手繪一幅拍翼機(ornithopter)草圖[2]，是否曾經問世升空，不得而知。到了 1872 年，法國顧斯塔夫·弗維(Gustave Trouvé)利用火藥作為動力，成功飛行無人拍翼機達 70 秒之久[3]。稍後阿方

斯·佩諾(Alphonse Pénaud)也開發橡皮動力拍翼機[4]。我們緊接著從十九世紀末期許多飛行先驅紀錄影片中，見證了一些冒險家前仆後繼，仿鳥振翼，但並未成功飛行上天。時間來到 1903 年萊特兄弟，其不採拍翼，成功以定翼機飛上藍天，拍翼機也跟著被塵封了數十年。理察·費曼(Richard Feynman)在其 1983 年「微小機械」(Infinitesimal machinery)演講的一段話，是人類實用主義落實於飛行器設計之好註解：「生物總被視為重要之工程設計指引，即便大自然從未發明過輪子；但大自然所造之拍翼，也未用於飛機，因為人們想到了更好的方式(意即定翼機)。」[5]此亦與墨子曾針對魯班造鵲提出之實用批判，異曲同工：「子之為鵲也，不如匠之為車轄，須臾劉三寸之木，而任五十石之重。故所為功利於人謂之巧，不利於人謂之拙。」1990 年之前，有關拍翼機之研發訊息，偶見蹤跡於拍翼機玩具改良[6] 1975 年 4 月 4 日發表公布之日本專利 50-010877 號『飛鳥玩具』，其餘則似無新的進展！

## 拍翼機重現江湖

第一次波灣戰爭後，風水輪轉。當初拍翼機無所用焉於運輸功能之「拙」，突然被美軍看中在超短程匿蹤偵查之「巧」用途，其可大幅彌補定翼式微飛行器(micro air vehicle; MAV)普遍升力不足、航速慢不下來等缺失。MAV 當初的構想，係部署於衛星和軍用偵察機觸及不到或是人員無法涉足的地區，搭配感測器即時傳送偵察資訊，可在城市建築物群中以緩慢的速度飛行，飛抵、甚至停留在建築物內，探測和尋找建築物內部的敵方人員或恐怖分子，因此在未來的城區戰場和反恐軍事行動中深具應用前景。

美國國防先進計畫局(DARPA)自 1999 年起，接連補助加州理工學院(Caltech)、加州大學洛杉磯分校(UCLA)與航境公司(AeroVironment Inc.)等單位，研發手掌大之「拍翼式微飛行器」(flapping MAV; FMAV)。拜資通消費電子產品(3C products)技術之賜，微晶片、微攝影鏡頭、無線通訊、呼叫器小馬達(pager motor)、與鋰聚合物電池(poly lithium battery)等輕薄短小零組件，皆可信手拈來，微拍翼機例如加州理工學院之「微蝙蝠」(Microbat) [7]，以及荷蘭德爾夫特科技大學(TU Delft)之「德爾夫萊」(Delfly) [8]等，相繼問世。飛行時間從幾秒拉長到 20 分鐘以上。同時加上機載微鏡頭，隨時回傳飛行畫面，遙控者如親身坐在拍翼機上飛行。2011 年，美國航境公司在網路上公佈其花費數百萬美元經費之可停懸(hovering)仿蜂鳥奈米拍翼機(nano air vehicle; NAV)[9]，其在室內外均可進出自如；當初美軍夢想每位單兵人手一隻人造蜂鳥，作為巷戰偵蒐之前導，似將成真。

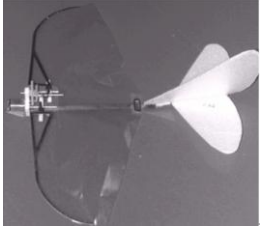

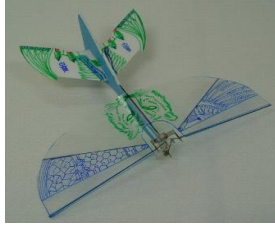
## 臺灣拍翼機發展

臺灣在拍翼機之研究，最早可能是國立成功大學航太系蕭飛賓教授與楊文彬教授等，曾對拍翼之升力特性，進行過風洞的量測。國立臺灣大學楊鏡堂教授、逢甲大學宋齊有教授、國立清華大學葉哲良教授、國防大學郭智賢教授等，2007-2009 年執行國科會前瞻優質生活整合研究計畫，研製「波特蜂」拍翼機，擬應用於室內飛行，以監控老人居家安全。計畫結案時曾展示其 48 公分翼展之原型機，最長滯空飛行 4 分 7 秒。另外國立臺灣大學張建成教授、朱錦洲教授，國立成功大學航太系胡潛濱教授、楊憲東教授，與空軍航空技術學院徐子圭教授等，也都有拍翼相關研究。筆者研究團隊，則在 2003-2008 年間，先後草製「初航者」、「鷹二型」(Eagle-II)[10]、「金探子」(Golden Snitch)等三代之拍翼機，最輕機身質量 5.6 克、最小翼展 20 公分、滯空時間 107 秒[11]，性能諸元參見表 1 [12]。

本研究團隊開發之第一代拍翼式微飛行器，著重傳動系統與拍撲翼之從無到有。第一代拍撲翼的傳動機構，如圖 1(a)，係利用簡易雷射代工之壓克力傳動系統基座，拼組上玩具減速齒輪組，該減速模組為一個四連桿機構，將馬達旋轉改變為拍撲所需的單自由度上下往復運動。拍撲翼則以鈦合金為機翼骨架，經微機電技術(MEMS)蝕刻而成，

機翼製作外觀如圖 1(b)所示。在使用兩顆鋰電池(工作電壓為 7.4V)供電下，拍撲頻率最高可達 14Hz，不過整體機重也達到 14 克(比起下一節鳥類尺度律計算之 11 克，已過重)，故未能搭載遙控裝置，直線自由飛行或滑翔飛行之能力僅 10 公尺遠。

表1.淡江大學2003-2008年間製作之拍翼機性能諸元[12]

拍翼機名稱	初航者	鷹二型	金探子
圖片			
翼展(cm)	18	30	20
最小全機質量(g)	14.2	11	5.6
鋰電池電量	90 mAH × 2	90 mAH	10 mAH
最高拍撲頻率(Hz)	14	16	20
拍撲行程角	54°	42°	38-56°
最長飛行時間(s)	1	10	107
創紀錄日期	2005/06/30	2006/04/04	2008/03/27

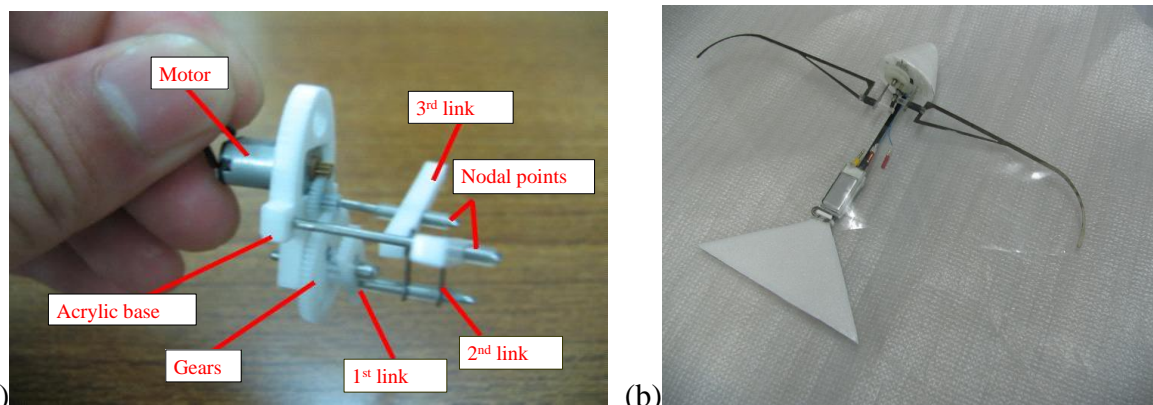


圖 1. 第一代拍翼式飛行器「初航者」：(a)四連桿傳動機構；(b)微飛行器，此機翼之翼展 19cm、翼前緣骨架後端至扣環長度 7cm，paylene 翼膜採連翼構形。

第二代拍翼式微飛行器 Eagle-II 為求輕量化，製作上多使用巴沙木。為加大升力，加長翼展到 30 公分，並改善傳動機構之運轉順暢程度，在僅使用一顆鋰電池之情況下(即 3.7V 工作電壓)，仍具有 16Hz 的拍撲頻率。配合尾翼磁制動器之使用，如圖 2(a)，使 FMAV 具控制方向的功能。即便整合國外公司之遙控模組(圖 2(b))，整體重量也只有 11 克(輕於下一節鳥類尺度律計算之 16 克)，遙控飛行記錄卻一舉延長為 10 秒、30 公尺遠。

第三代拍翼式微飛行器針對前兩代製作方式加以精進，同時配合風洞測試數據尋求較佳之設計參數。在四連桿機構運作上，首重運轉順暢及降低機構運轉時造成之振動與能耗。由於四連桿運轉時，左右兩翼必定存在某種程度的相位差，過大相位差異會造成飛行時不穩定；而拍撲行程角度(flap angle or stroke angle)大小也會影響氣動力表現。故妥善之拍翼機構設計，往往決定拍翼機可否成功飛行。風洞實驗及試飛表現顯示，在此單一自由度拍翼(simple flapping)下，拍撲行程角度為 50-52 度時具有最佳之推進效率。此外，筆者團隊改使用鋁合金材料與放電線切割技術(EDWC) [11]製作傳動機構，以提高零件之加工精密度並大幅度減重。此時最高拍撲頻率在 3.7V 時已達 20Hz 以上。至於

機翼設計，採用聚對二甲苯(parylene)翼膜，翼前緣骨架則改以直徑 0.6mm 之碳纖維棒材，整體拍翼飛行器之重量低於 6 克(仍輕於下一節鳥類尺度律計算之 11 克)，飛行器機構及外觀如圖 3 所示。第三代「金探子」經飛行實測，已可竄升至戶外 10 公尺高，飛行時間更大幅拉長為 107 秒以上[25]，其飛行之連續影像顯示，飛行中之「金探子」遭受附近飛鳥之好奇與就近驅趕，可見「金探子」的飛行性能與特徵已具部分仿生之效。

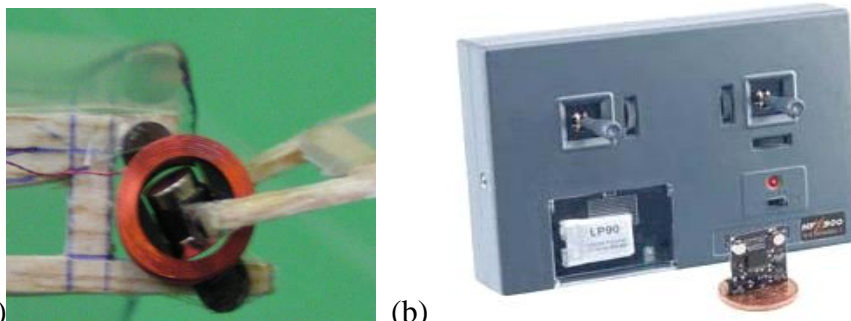


圖 2. 第二代拍翼式飛行器「Eagle-II」：(a) 磁制動器，重量為 1.1 克；(b) 遙控模組，晶片重量為 0.9 克，具接收及控制馬達轉速及磁制動器之功能。

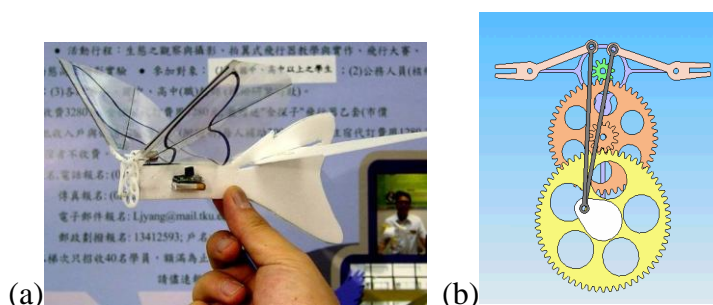


圖 3. 第三代拍翼式飛行器「金探子」：(a)全機；(b)機構設計。

### 「金探子」概念設計—拍翼尺度律

拍翼微飛行器(FMAV)，師法自然，固無疑慮，但如何訴諸工程實務，首先有賴於拍翼之尺度律(scaling laws)指引。該尺度律係由C.H. Greenewalt、J.M.V. Rayner、U.M. Norberg等學者統計大量飛行生物之質量 $m$ 、翼展 $b$ 、拍翼頻率 $f$ 、與展弦比 $AR$ ，歸納發現彼此間存在幾條冪次方關係式(power laws)。舉一般鳥類而言，尺度律關係式[13]如下：

$$b = (1.17) \cdot m^{0.39} \quad (1)$$

$$f = (3.98) \cdot m^{-0.27} \quad (2)$$

$$AR = \frac{b^2}{S} = (8.56) \cdot m^{0.06} \quad (3)$$

假定翼展 $b$ 為0.2米，代入(1)式得質量 $m$ 小於0.011公斤；進一步代入(2)式，知拍翼頻率 $f$ 高於13.45 Hz；再代入(3)式，知拍翼之展弦比 $AR$ 小於6.53，換算翼面積 $S$ 大於61.26cm<sup>2</sup>，這是淡江大學「金探子」FMAV的概念設計參數。同理，若70公斤重之成人要拍翅上天，根據(1)式，翼展得長到6.13米；另依據(2)式，其拍翼頻率1.26Hz並不高，但要成人自力揮動6米多長之拍翼，的確很不容易。就算是FMAV，在全部質量受限於10餘克之下，還得要求每秒十幾次高速拍翅，如此之機械設計規格，也與一般機械設計之經驗值相差極鉅。

進行FMAV的工程實務時，直覺上會先考量拍翼的材質與外形，基本上都從薄膜翼開始設計，使用材質的密度須越小越好，故挑選釐米級外徑的碳纖維作為翼骨與翼肋、數十微米厚之塑膠膜作為翼膜，便順理成章，這些材料不會有過重的問題；而伴隨輕薄材料的可撓特性，也因此無可避免。拍翼結構因共振造成之損傷，當翼展很小時並不嚴

重，果蠅甚至利用共振來高速振翼到200 Hz。故針對小翼展之拍翼，如何挑選其合適的剛性，以同時產生最大的升力與推力，才是該注意的議題。

細較20公分翼展之FMAV質量分配，馬達、電池、控制晶片、機翼機身與傳動機構總合不能超過11克。以目前最輕巧之電動馬達1.6克、電量10 mAh鋰電池約1.2克，控制晶片約1.5克，加起來已4.3克。若再精打細算，保力龍或珍珠板機身加上PET/parylene機翼，各只容許2.5克與1克，則拍翼傳動機構最重不得超過3.2克，這個數值與加州理工學院「微蝙蝠」拍翼機構僅2.8克之事實相符。

概念設計至此，在所有輕巧電子電機零組件皆能外購取得之前提下，發展 FMAV 實務所欠缺之東風，似只剩下這區區 3 克以內之拍翼傳動機構。

### 「金探子」研發瓶頸—拍翼機構

鑒於全世界沒有專門販售拍翼傳動機構之公司行號，因此筆者合作團隊在 2008 年國科會整合計畫之目標之一，便是自力開發塑膠材質的拍翼機構，配合塑膠射出成型(plastic injection molding)之量產技術，大幅降低拍翼飛行系統之技術進入障礙或門檻，盼望任何人在此量產之拍翼機構基礎上，都能方便地完成具個別特色的拍翼飛行器，達到迅速教育推廣的效益。

大自然飛鳥在拍翼的上行程有摺翼(folding)的動作，用以減少負升力。另在行程翻轉(stroke reversal)之際，翼尖會往前伸出捕獲空氣後拋，形成香蕉狀的立體拍翼軌跡；蜂鳥更為誇張，為進行懸停動作，索性拍出水平 8 字立體軌跡。以上之仿生拍翼動作，若要實現於 3 克之輕巧機構，再加上十幾 Hz 的高速拍動頻率，以及拍翼行程角儘可能接近鳥類的 120 度，與雙翼拍動無相位差等需求，幾乎是不可能任務！文獻中不乏多連桿拍翼機構設計，概念上能夠仿鳥立體拍動，但加上 3 克的質量限制之後，成功者鮮見。

筆者團隊憑著單純之信念，”做就對了”，採用傳統的雙套四連桿與減速齒輪，設計出圖 4 的傳動機構。並運用精密塑膠射出模造技術(plastics injection molding)進行製作，最後組裝成之塑膠機構質量只有 1.2 克，遠遠超過 3 克之預期。其具有兩級齒輪減速，減速比 26.7，有效將呼叫器馬達的 24,000 rpm，化為 15 Hz 的拍翼頻率。在賦予四連桿合適之長度之後，搭配出 52.8 度的拍翼行程角，雙翼相位差小於 3 度，雖然仍遠遜於鳥類之 120 度行程角，但實作測試結果顯示，拍翼頻率可順利拉高到 15-23 Hz [14]。

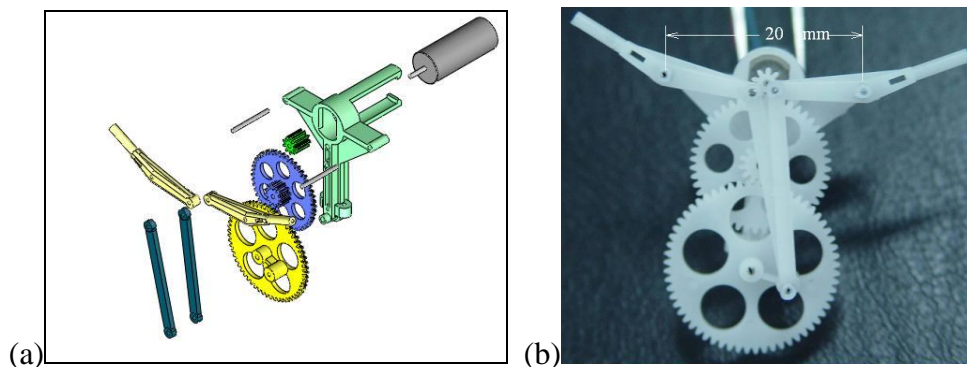


圖 4. 拍翼傳動機構: (a)分解圖; (b)組合完成之塑膠機構

### 「金探子」研發成果

#### (1) PVDF 智慧型機翼現地升力量測

到目前為止，如何準確量測活體飛行生物或拍翼模型之瞬間空氣動力特性，依然是嚴苛的課題。風洞中常見的量測設備有天平式力規(delicate balances)、壓力探頭、應變規、雷射干涉儀等。礙於量測設備的限制，通常假設兩翼拍撲受力相同，因此，研究人員必須用心製造精密且左右完成相同的拍撲機翼，對於 FMAV 的製作而言，無異於增加

難度。筆者團隊曾研製一組智慧型 PVDF 壓電薄膜感測機翼，一則透過微機電技術 MEMS 製作方式精確掌控機翼尺寸形狀(機翼骨架鈦合金)，二則以內嵌 PVDF 感測器方式直接輸出升力訊號。風洞實驗顯示，源自單翼 PVDF 升力訊號與力規升力訊號同步擷取，且波形類似。由於四連桿機構對於左右翼存有相位差，透過刻意的相位差設計，反而可協助微調拍撲式微飛行器之空氣動力輸出，且可提供未來 MAV 機上氣動力回授控制之用[10]。

#### (2) 鋁合金傳動系統輕量化設計

減重是研究 FMAV 關鍵之一。許多自然飛行生物，都具有重量輕、結構強的特點，例如昆蟲的翅膀。2002 年之前最輕的拍撲式微飛行器傳動系統，算是 Caltech 的團隊，其完成之傳動系統 2.8 克。本研究團隊開發之第一代齒輪傳動系統，材料含塑膠、鈦合金及壓克力，重達 7 克，不利飛行。第三代齒輪傳動系統改以非傳統加工之線切割放電加工(EDWC)進行鋁合金基座的製作，再配合市售輕量化的齒輪及中空金屬管，來組合質輕之四連桿機構，質量已小於 2.3 克，突破 Caltech 團隊過去研發之齒輪傳動系統重量[11]。

#### (3) 可撓式機翼誘導之 8 字形拍撲軌跡

發展「淡江金探子」FMAV 過程中發生了有趣的意外收穫：其單一自由度拍翼機構，居然在不是剛體(rigid body)之現實下，於上下高速拍動時突顯出空氣彈力效應(aero-elastic effect)，而出現傾斜 8 字(figure-of-8)立體拍翼軌跡[15]！由相關風洞測力實驗數據得知，具傾斜 8 字拍翼之推力大於無此特徵者；實際飛行紀錄也顯示，此拍翼特徵有利於低速節能巡航。以 75 mAH 充飽電量之鋰電池為例，在驅動電壓 3.7 伏特之下，於 2010 年 3 月創下可連續飛行 8 分鐘不著陸之紀錄。換算為巡航功率，本 20 公分翼展之拍翼機約只需 2.1 瓦特，便能持續滯空。

目前人造拍翼機雖仍不如大自然飛行造物般精巧靈敏，但因屬無人遙控，故無人命風險而能多方嘗試錯誤，是以進展神速，且能進一步探討該拍翼機何以能成功飛行。以本團隊之「金探子」而言，曾置於風洞之中施以煙線流場顯像，明顯觀察到「翼前緣渦漩」(leading edge vortex; LEV)現象，與 1990 年代測定真實飛鳥昆蟲週遭流場實驗之結果定性相仿[16]。筆者也探討有關「淡江金探子」拍翼的機械剛性(stiffness)對微飛行器之升、推力定量影響成果[17]。另外，以高速立體攝影術得到之「金探子」拍翼立體軌跡，成功轉成計算流力(CFD)所需動態網格，模擬出與風洞量測類似之升力數據[26]。換言之，在師法自然的仿生飛行研究路上，「淡江金探子」多少已登堂入室；未來如何更上一層樓，得再累積更多之創新設計、量測資料與比對證據。

#### (4) 產學合作與智財專利

「淡江金探子」在產學智財方面也有成績，前述 8 字拍翼技術，已分別獲准 2011 年 10 月的美國專利[18]與同年 4 月的臺灣發明專利 I-339634 號。2009-2012 年間並委託「飛行達人有限公司」，執行「經濟部工業局九十八年度智慧型機器人產業發展推動計畫-協助業界產品開發」計畫，生產「金探子」微飛行器教育套件組超過 500 套，提供作為青年航空教具之推廣使用(參見下一節描述)。

#### 「金探子」科普營

大眾科普教育部分，圖 4 之塑膠拍翼機構已應用於 2009 年「國科會科學 50 之旅—與金探子共舞」科普營之微拍翼機實作教具，亦支援 2009-2012 年之「臺灣無人飛機設計競賽(Taiwan UAV competition)」[19]電動拍翅翼組之參賽隊伍所需素材[20]。圖 5 為部份參賽隊伍演繹之 FMAV 創意作品，不僅外形變化多端，也都擁有 8 分鐘飛行續航的實力。相關活動均已整理在國科會「科學 50 成就之旅」影片「現代魯班」(圖 6)[21-24]。

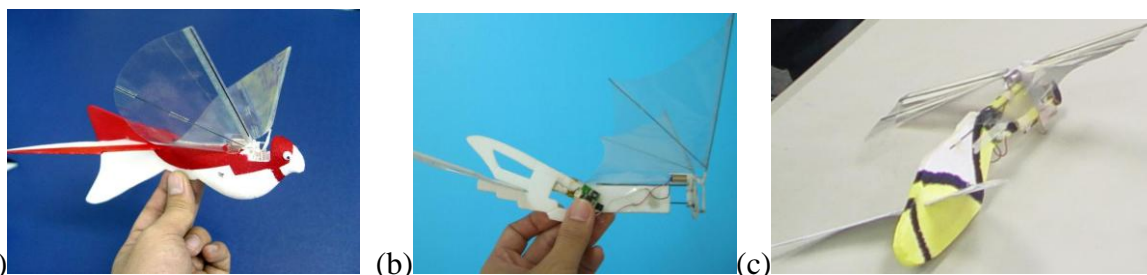


圖 5. 參加「臺灣無人飛機設計競賽」之各校創意拍翼機: (a)淡江大學的燕子造型[20]; (b)國防大學的蝙蝠拍翅造型; (c)永達技術學院的大黃蜂外型。



圖 6. 國科會五十科學成就第六集”現代魯班” DVD 影片之片段[21-24]。

2009 年適逢國家科學委員會成立五十週年，國科會特別徵求「五十科學之旅」科普計畫，針對國內特定族群之民眾設計一系列以科學為主體的參觀行程。筆者以非大都會區大學或高中學生為目標族群，設計主題為「國科會 50 科學之旅－拍出精彩、飛出丰采」之科學營活動，簡稱「與金探子共舞」。其內容涵蓋鳥類飛行生態觀察、「金探子」FMAV 實作試飛、與微觀流體行為表現，盼透過大自然水鳥與人造拍翼機之設計實驗，並經由高速攝影機顯像來呈現自然界物體美妙的一面，讓參與之學員真實體驗生活科學與科技生活，進而激發學員對於科學與技術之創造興趣。透過寓教於樂的科學生活行程讓學員學習基本原理，達到推廣科學教育及培育科技產業之潛在推動來源。

「與金探子共舞」活動共分為三部分如下：

- (1) 「金探子實作試飛」提供學員一人一機的套件組，如同精密的遙控飛行玩具，其中馬達、電池與遙控晶片/遙控器均為購自國內供應商，其餘難度較高之傳動齒輪零件與機身機翼，則由本團隊以塑膠射出成型模造方式製備妥當，參與學生只需掌握 FMAV 之重心位置，參考大自然飛行活物，專注於設計翼形、機身與機尾等之外形即可。淡江大學團隊提供參與學生空氣動力學基本常識、AutoCAD 繪圖軟體、翼膜機身自動切割設施、與試飛調校等必備知識與技巧，使參與學生寓教於樂，親身體驗到 FMAV 之實作樂趣，培育對航太科技有興趣之青年學子，或進一步成為未來全國 FMAV 大賽的參賽隊伍或種子成員。
- (2) 「水鳥觀察」，係於關渡水鳥公園內實施，並聘請「社團法人臺北市野鳥學會」提供專業之導覽與攝影技巧協助。寒假的三天兩夜活動時間較長，安排本分項活動於第一天實施。暑期的單日活動，則只安排於下午。
- (3) 「參訪研究設施」，主要帶領學員參觀風洞與高速攝影等兩類與微拍翼機研究相關之研究設施。寒假的三天兩夜活動時間較長，安排本分項活動於第三天實施，參訪地點安排於國立臺灣大學應用力學研究所。暑期的單日活動，則濃縮於上午的”金探子實作”之前。「與金探子共舞」各梯次參加人數，如表 2。活動照片請參見圖 7。

表 2. 「與金探子共舞」各梯次參加人數

日期	2008/01/20-22	2008/08/05	2008/08/12	2008/08/19	總計
人數	41	11	15	7	74



圖 7. “與金探子共舞”活動照片(自左上到右下): (a)開幕式大合照; (b)部分學員合照; (c)組裝好之”金探子”機群列隊; (d)關渡自然公園水鳥觀察; (e)”金探子”造型評分; (f)飛行比賽; (g)組裝情形; (h)參觀風洞設施; (i)頒獎。

參加「與金探子共舞」學員來自縣市之數量分析，參見圖8之統計，質化描述如下：

- (1) 寒暑假4梯次共吸引來自全國14縣市74名學員參加，中小學學生佔49%。學員中至少有74%以上滿意本活動，更有86%對”金探子”微飛行器組裝試飛表示有興趣。
- (2) 台北市有關科普活動的訊息最為充分，故參加人數最多，許多學員都是父母得知訊息後直接代為報名。
- (3) 花蓮縣居次，主要是因為自強國中自然科教師的熱心鼓勵同學前來參加。
- (4) 北縣第三，自然是因為距離淡水較近，其中大半是淡江大學教職員的子弟。
- (5) 其餘11縣市參加人員均各在1-3人之間，顯見國科會50科學之旅的宣傳已經擴及全省高中小學，只是因為本活動的參加費用稍高(2,500-3,280元)，再加上淡水地處北台灣，南部師生須另花車資，故僅能吸引部分意願較強者前來。

本活動較令人遺憾之處，在於沒有成功吸引任何一位偏遠地區或經濟弱勢的學生前來參加。筆者本有意次年配合「88水災」繼續申請「金探子送愛心」科普計畫，以巡迴列車型態，延伸金探子航空科普活動到偏遠受災地區，不過最後並未續獲國科會科教處補助而作罷。

另按學員學歷與年齡之數量統計如圖9，分析如下：

- (1) 國中國小生佔49%強，與先前計畫應多多推廣到大專高中生的設想不同，顯然在一樣的宣傳密度下，國中國小生較受到父母的關愛，父母對本活動之期待與熱心程度，不亞於參加學員本人，國中國小生之參加層級可謂為”不知而行”，也是未來要再設法擴大影響衝擊面的階層。
- (2) 另一原因可能是大學生平日花在學雜生活開銷負擔已夠重，許多人因此有心但無力再自費參加本活動，這對於未來科普活動推廣之阻礙很大。
- (3) 高中與在職參加人數各與大學生參加人數相近(15-20%)，顯示這三個年齡層對於飛行器的熱愛程度相仿，也是擁有較多數理基本知識的”知而行之”階層人士，未來藉



舉辦比賽進一步輔導，假以時日將可能升級為拍翼機玩家，或進一步成為本領域之科學研究人員。

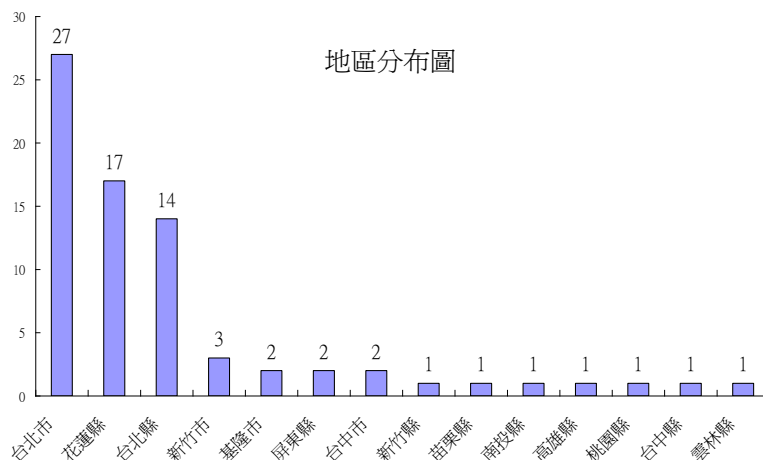


圖8. 學員來自縣市之數量分析

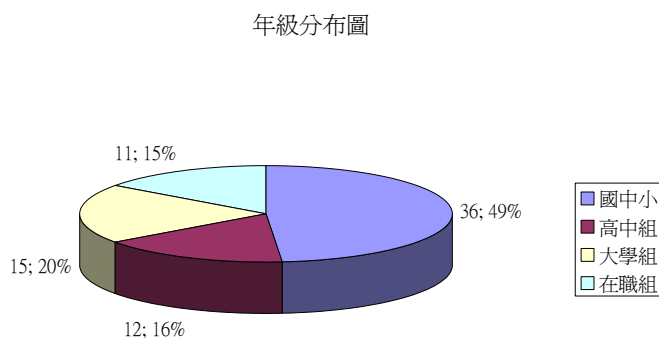


圖 9. 學員學歷與年齡分析

## 結論

筆者小學四年級時，初見線控模型飛機於學校操場上翱翔，怦然不已。限於個人財力與智力均不足，僅能遠觀嚮往之；心想若能有巴掌大小之微飛行器，價格不高，人人皆可優遊駕馭，豈不妙哉？物換星移，筆者有幸與同好者結合航空工程與精密加工技術，開發出本土化「金探子」拍翼機，尺寸只有 20 公分，重量僅 10 克重，且價格低廉、容易上手。未來或甚至經由無線遙控與視覺影像立體定位(stereo vision)之回授控制技術，作出低速小半徑轉彎、定高度迴旋、與近乎懸停的飛行動作，擅場於人類足跡不易到達之場合，例如偵查、救災與生態觀察等，尚未可知...。於今每見青年學子專心操控拍翼機於藍天白雲，多少實現了筆者兒時之夢想；抗懷千古，相信魯班面對墨子實用主義之詰難時，應不在意，因其樂不只在實用，更在乎志趣之成真也。

## 參考書目

- [1] Information on <http://www.sidneyluo.net/h/h03/39.htm>
- [2] Information on <http://img381.imageshack.us/img381/6046/projektmaszynylataj261cejok148.jpg>
- [3] O. Chanute, Progress in Flying Machines. New-York: Dover Publication Inc., 1894.
- [4] T.J. Muller, Introduction to the Design of Fixed-Wing Micro Air Vehicles. Reston: AIAA, Inc., p. 30, 2006.
- [5] R. Feynman, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2(1), pp. 4-14, 1993.

- [6] K. Watanabe, 飛鳥玩具, Japan Patent 50-010877, 1975 (In Japanese)
- [7] T.N. Pornsin-Sirirak, Y.C. Tai, H. Nassef, C.M. Ho, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 89(1-2), pp. 95-103, 2001.
- [8] R. Barrett, R. McMurtry, R. Vos, P. Tiso, R. De Breuker, *Proc. Smart Structures and Materials 2005- Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. San Diego, Mar. 7-9, Proc. of SPIE Vol. 5762, pp. 111-122, 2005.
- [9] Lev Grossman et al., *Time*, Nov. 28, p. 80, 2011.
- [10] L.J. Yang, C.K. Hsu, J.Y. Ho, C.K. Feng, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 139(1-2), pp. 95-103, 2007.
- [11] L.J. Yang, C.K. Hsu, H.C. Han, J.M. Miao, *Journal of Aircraft*, Vol. 46(6), pp. 1866-1874, 2009.
- [12] 徐振貴, 拍翼式微飛行器之設計、製造與測試整合, 淡江大學機械與機電工程學系博士論文, 2008
- [13] U.M. Norberg, *Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution* New-York: Springer, 1990.
- [14] L.J. Yang, C.Y. Kao, C.K. Huang, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 163, pp. 125-132, 2012.
- [15] L.J. Yang, *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 15(3), pp. 197-212, 2012.
- [16] C.P. Ellington, C.D. Van Berg, A.P. Willmott, A.L.R. Thomas, *Nature*, Vol. 384, pp. 626-630, 1996.
- [17] L.J. Yang, A.F. Kao, C.K. Hsu, *Journal of Aircraft*, Vol. 49(2), pp. 423-431, 2012.
- [18] L.J. Yang, "Biomimetic micro-aerial-vehicle with figure-8 flapping trajectory," U.S. Patent 8,033,499 B2, 2011 與民國 100 年 4 月的中華民國發明專利「拍翼軌跡呈 8 字型之仿生微型飛行器」(I-339634)。
- [19] Information on 成功大學航太所賴維祥教授 <http://www.iaa.ncku.edu.tw/~whlai/uav/>
- [20] 高崇瑜, 應用精密模造技術於微飛行器套件組之設計與製造, 淡江大學機械與機電工程學系碩士論文, 2009
- [21] <http://www.youtube.com/watch?v=Ix2v6T4bc98>
- [22] <http://www.youtube.com/watch?v=aqd7ArX5tz8>
- [23] <http://www.youtube.com/watch?v=1VuINfkdlzY>
- [24] 國科會委託東森財經台製作之"五十科學成就之旅"共十三集之"現代魯班"節目 (<http://www.nsc.gov.tw/50th/portal.asp#>), 係針對成大顏鴻森教授與本文作者"金探子"之研究成果進行報導。"金探子"部分, 利用「與金探子共舞」科普計畫暑期活動期間, 完整進行節目拍攝錄製之作業。該節目已於 2009 年 10 月份播出。
- [25] [http://www.youtube.com/watch?v=YkEoxyWGl\\_k](http://www.youtube.com/watch?v=YkEoxyWGl_k)
- [26] L.J. Yang, F.Y. Hsiao, W.T. Tang, and I.C. Huang, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, paper no. 264, 2013.

## 致謝詞

感謝國科會工程處與科教處提供專題研究計畫經費, 感謝美國加州理工學院戴聿昌教授、國立成功大學蕭飛賓教授、國立臺灣科技大學黃榮芳教授、國立臺灣大學王安邦教授之鼓勵與諮詢。感謝國立體育大學湯文慈教授、國立屏東科技大學苗志銘教授、國防大學洪健君教授、臺北醫學大學沈永康教授、龍華科技大學黃進光教授、淡江大學馮朝剛教授、康尚文教授與蕭富元教授等之合作與協助。