

### 壹、前言

師法自然，可以找到人類環境難題的解答，<sup>1</sup> 這是仿生學 (Biomimicry) 的精神與目的。向生物學習是軍事仿生學 (Military Biomimicry) 的重要課題，生物的構造和外形、對於環境的適應性和互動性，以及生存智慧等行為能力，往往成為軍事武器設計和戰術戰法借鑑應用的學習對象。<sup>2</sup> 戰爭史中經常可以發現人類的武器裝備和戰術戰法大多是向生物學習總結的產物，特別是生物集體活動的智慧所產生的巨大效益，也成為軍事應用的重點。

生物在長時間的進化過程中，為了生存、競爭、自衛和發展需要，往往會發揮與生俱來的優異本能。禽鳥善於飛行，魚類善於游泳，四足動物善於奔跑，例如，走獸兇猛異常、狐狸狡詐多變、毒蛇奇毒無比等，以達到生存發展的目的。動物的這些本能往往成為兵家模仿和學習的對象，軍事仿生學遂應運而生。

一般將軍事仿生學的發展區分為三個階段：從最早模仿生物結構和外形的「仿形」階段；進展到模仿生物獵食行為能力的「仿性」階段，再進化到模仿生物，特別是模仿生物的感知能力、思維邏輯和判斷能力的人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 廣泛應用的「仿智」階段。<sup>3</sup> 本文首先概述模仿生物特性的武器裝備，接著區分仿生技術的軍事應用類型與成果，然後歸納軍事仿生學面臨的挑戰與發展趨勢，提供國家科工研究發展政策

\* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

1 高宜凡，〈師法自然，可找到人類環境難題的解答〉，《遠見》，第 339 期，2014 年 8 月 26 日，<https://www.gvm.com.tw/article/19556>。

2 江圻杓，〈軍事仿生學：無人載具的群體化應用〉，《青年日報：韜略談兵》，第 97 期，2023 年 5 月 25 日，頁 7。

3 史小敏，〈軍事仿生：由形似到神似〉，《解放軍報》，2022 年 9 月 9 日，頁 11。

參考。

## 貳、模仿生物特性的武器裝備

### 一、來自鳥禽和昆蟲飛行的啟發

人類研究鳥禽和昆蟲，觀察到這些生物除了有翅膀提供飛行之外，都具有輕盈的體態、流線的外型以及剛性的飛行結構。<sup>4</sup> 特別是從信天翁（albatross）的飛行姿態發現，其翅膀的長度為身體的 15 倍，由此揭開翱翔天際的密碼：翅膀的形狀和身體長度比例 —— 展弦比（aspect ratio） —— 是影響飛行升力（force of lift）的關鍵。<sup>5</sup> 經過一系列飛行原理和飛行動力學的研究，促進了人類對飛機的發明和製造。1903 年，萊特兄弟（Wilbur Wright/ Orville Wright）發明世界第一架飛機，終於讓人類上天飛行的夢想成為現實。

科學家觀察蜻蜓（dragonfly），發現其翅膀兩側翼面有厚厚的角質層，它可以抵銷飛行擾流對翅膀產生的阻力和震顫。<sup>6</sup> 依此原理，科學家在飛機兩翼增加重量，解決了飛機容易折翼的問題。同時也從鳥類和昆蟲飛行時將雙腳緊貼下腹，著陸時再伸出雙腳的動作得到啟發，將飛機的設計從雙翼改為單翼，將固定式起落架改為收放式機輪，大幅降低飛行阻力，飛機性能進一步提升，飛機結構得到進一步優化。

飛機優化的過程往往是根據需要所做的一種改變。第一次世界大戰時期的飛機被用來執行偵察任務；二次大戰前夕，美、英、法、德等國紛紛組建航空連或飛機連，並在戰爭期間加入戰鬥。當時的飛機並沒有武裝，飛行員一邊開飛機，一邊拿著手槍射擊；後來又攜帶手榴彈；又經過一段

<sup>4</sup> “How Birds Fly,” *Science Learning Hub*, <https://reurl.cc/kXayQG>.

<sup>5</sup> Nicholas Landell-Mills, “Albatrosses Can Soar Indefinitely into the Wind by Stealing Momentum from the Wind,” *Research Gate*, October 2019, p. 16.

<sup>6</sup> Erfan Salami, Elham Montazer, Thomas A Ward, Nik Nazri Nik Ghazali1, and Irfan Anjum Badruddin, “Aerodynamic Performance of a Dragonfly-Inspired Tandem Wing System for a Biomimetic Micro Air Vehicle,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol 10, Issue 787220, May 18, 2022, p. 2.

時間後，法國率先在機頭加裝機槍，從而促成第一代戰鬥機的誕生。<sup>7</sup> 此後戰鬥機、轟炸機、偵察機……等各種軍用飛機得到廣泛應用，進入 21 世紀以來，無人機的研製和發展則成為一股新興趨勢。

## 二、來自魚類於水中優游的啟發

水母 (jellyfish)、烏賊 (squid) 以及魚類能夠在水中自在上浮和下潛的能力，給予科學家提供靈感。花帽水母 (flower hat jelly) 具備一種非常奇妙的浮鰾 (swim bladder)，通過感應細胞控制上下姿態；烏賊透過調節體內水分的密度，達到上浮、下潛或推進的效果；<sup>8</sup> 魚類則擁有非常精巧的魚鰾，可控制氣體的吸入和排出，使其輕易於水中上下優游。潛艦的設計即係根據這些原理，最初是藉由水櫃的充水和排水，實現潛艇的下潛和上浮。

1776 年，美國布希內爾 (David Bushnell) 研製出全世界第一艘單人潛艇，稱為龜艇 (Turtle)，依靠人力搖動俾葉推進。1800 年，法國富爾頓 (Robert Fulton) 研製出鸚鵡螺號 (Nautilus) 人力潛艇，該潛艇將水面和水下的推進系統分開，允許兩人在水下作業 5 個小時。<sup>9</sup> 隨著科技進展，潛艇的設計獲得很大的提升。例如潛艇的動力從一開始的人力，進展到電動機、柴油機、汽油機，甚至核動力。不過，早期潛艇結構設計不科學，存在速度慢、效率低等問題。

分析發現，海豚 (dolphin) 除了具備流線的體型，還在於其特殊的三層皮膚結構：表皮層、真皮層和底層。真皮層由一系列的乳突構成，乳突

---

<sup>7</sup> Dave Roos, "How Airplanes Were Used in World War I," *History*, February 11, 2022, <https://www.history.com/news/world-war-i-aviation-airplanes>.

<sup>8</sup> Ian K. Bartol, Paul S. Krueger, Joseph T. Thompson, and William J. Stewart, "Swimming Dynamics and Propulsive Efficiency of Squids throughout Ontogeny," paper present at the Annual Meeting of the Society for Integrative and Comparative Biology (San Antonio, Texas: January 2-6, 2008), p. 721.

<sup>9</sup> Evan Andrews, "9 Groundbreaking Early Submarines," *History*, June 1, 2023, <https://www.history.com/news/9-groundbreaking-early-submarines>.

間充滿體液；最下層由彈性纖維組成。<sup>10</sup> 海豚高速游動時，真皮層的乳突型態會凸顯出來，使光滑的表皮變得凹凸不平。這種不規則形態可以改變海豚周圍的流場，將阻力大的湍流（turbulence），改變成阻力小的層流（laminar）。<sup>11</sup> 因此，人類模仿海豚皮的組織，並將其應用於艦船結構，大幅提高船舶的效率和速度。

冷戰（Cold War）時期，美、蘇潛射彈道飛彈（submarine launched ballistic missile, SLBM）射程都不夠遠，但都希望給對方造成核子嚇阻態勢，而北極的厚冰恰恰可以降低對方偵察能力。但潛艦必須突破冰層上浮才能發射飛彈，為了克服破冰上浮的難題，科學家發現鯨魚（whale）在冰層下活動，每隔幾十分鐘就會破冰上浮呼吸空氣，其輕易破冰倚靠的就是其異常堅硬、狀似小山的鯨背。<sup>12</sup> 於是模仿鯨背的設計，特別強化潛艦帆罩（sail）結構，產生奇佳效果。

### 三、借鑑毒蛇與飛魚的能力特性

1947年，美國第一枚導引飛彈——下士飛彈（Corporal missile, MGM-5）——成功試射，1954年服役。<sup>13</sup> 之後擴及地對地、地對空、空對地以及空對空4種飛彈類型，涵蓋洲際彈道飛彈（intercontinental ballistic missile, ICBM）及單兵反坦克飛彈（anti-tank guided missile, ATGM）等數百種。這些飛彈研製的靈感有些直接來自生物，例如響尾蛇飛彈（Sidewinder missile, AIM-9）和飛魚飛彈（Exocet, AM-39），其仿生原理分述如下：

<sup>10</sup> Junhua Ji, Ghulam Nabi, Xianyuan Zeng, Yujiang Hao, and Ding Wang, “Histological Variation in Blubber Morphology of the Endangered East Asian Finless Porpoise (*Neophocaena Asiaorientalis sunameri*) with Ontogeny and Reproductive States,” *Zoological Studies*, Vol. 58, No. 42, 2019, p. 8 of 11.

<sup>11</sup> 海豚是游泳健將，其游速每小時約40至48公里；受驚擾時，時速可以提高到70至100公里。

<sup>12</sup> John C. George, Christopher Clark, Geoff M. Carroll, and William T. Ellison, “Observations on the Ice-Breaking and Ice Navigation Behavior of Migrating Bowhead Whales (*Balaena mysticetus*) Near Point Barrow, Alaska, Spring 1985,” *Arctic*, Vol. 42, No. 1, March 1989, pp. 26-27.

<sup>13</sup> “MGM-5 Corporal,” *GlobalSecurity.org*, <https://www.globalsecurity.org/wmd/systems/corporal.htm>.

### （一）響尾蛇飛彈

響尾蛇（rattlesnake）臉頰兩邊各有一個黃豆大小的凹陷，稱為「頰麟窩」（loreal pit），使其具備優異的紅外線搜索與追蹤（infrared search and track,IRST）能力，精度高達千分之一度的溫差。<sup>14</sup>自然界絕對溫度大於零的生物，都會散發紅外線，因此儘管響尾蛇的視力趨近於零，其頰窩仍可輕易感應出一些小生物的紅外線跡訊，從而很快地捕捉到小兔子和田鼠。

武器專家將這種感應能力和特性應用在響尾蛇飛彈的研製，在其導引控制部裝置靈敏性極高的紅外線偵測器，其功能類似響尾蛇的「頰麟窩」。這款飛彈能夠偵測目標散發出來的紅外線或熱源，透過探測和追蹤空中目標的熱源進行攻擊。<sup>15</sup>響尾蛇飛彈服役以來，具有豐富的作戰經驗，並且擁有輝煌戰績，是一種具有劃時代意義的「空中殺手」。

### （二）飛魚飛彈

早期攻船飛彈（ant-ship missile, ASM）發射後，由於飛得很高，很容易被艦載雷達偵知，並採取反制行動。武器專家思考將飛彈巡航過程的高度降低到 5 公尺以下——雷達偵測的盲區，於是一種飛魚（flying fish）的活動軌跡進入設計者的眼簾。海面上經常可見一些魚在跳躍飛行，以躲避大型魚類的獵捕，這些飛魚為了躲避追捕，會躍出水面 8 至 10 公尺，之後以每秒 200 公尺的速度滑翔 150 至 200 公尺，<sup>16</sup>然後入水，最終逃脫天敵的追蹤。

1970 年代，法國國家航空太空公司（Aérospatiale，簡稱「法國航太」）根據飛魚特性研製飛魚飛彈，其性能與飛魚飛行姿態一樣，發射後

<sup>14</sup> Elena O. Gracheva, Nicolas T. Ingolia, and Yvonne M. Kelly et al., “Molecular Basis of Infrared Detection by Snakes,” *Nature*, Issue 464, 2010, pp. 1006-1011.

<sup>15</sup> Victor V. Klemas, “Remote Sensing and Navigation in the Animal World: An Overview,” *Sensor Review*, Vol. 33, Issue 1, January 2012, pp. 3-5.

<sup>16</sup> Hyungmin Park and Haecheon Choi, “Aerodynamic Characteristics of Flying Fish in Gliding Flight,” *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 213, Issue 19, October 1, 2010, pp. 3269-3279.

巡航高度為 15 公尺，進入接戰區高度下降為 2 至 5 公尺，接近至目標區高度再降至 0.5 至 3 公尺，完全脫離艦載雷達的偵測範圍；其於巡航階段採慣性導引（inertial guidance），進入目標區後開啟彈鼻雷達尋標器（radar seeker），偵測並攻擊目標。1982 年福克蘭戰爭（Falklands War），阿根廷空軍超級軍旗攻擊機（Super Étendard）發射飛魚飛彈擊沉英國雪菲爾號（HMS Sheffield）驅逐艦，<sup>17</sup> 一戰成名，被稱為「海上殺手」。

#### 四、得自貓頭鷹夜視能力的啟迪

貓頭鷹（owl）具有優異的夜視能力，其視力高出人眼的 100 多倍，牠在茫茫的夜裡，能夠清楚看到遠在幾十公尺外的小動物。科學家研究發現，貓頭鷹的瞳孔可以放大 10 幾倍，達到 12 毫米（mini-meter, mm），且其眼睛並不反射光線，而人類和其他的晝行動物都不具備這些特點。<sup>18</sup>

根據貓頭鷹的夜視特性，工程師秉持兩個原則研究微光夜視鏡：一是口徑要盡可能大；二是能夠吸收多波段光線。其原理是吸收自然光加以處理放大，然後顯影顯示圖像，這樣即可於夜間清楚辨識目標動態。<sup>19</sup> 接著再應用眼鏡蛇辨識紅外線的能力，研製出兼具微光和紅外線功能的夜視鏡，並進一步將其體量縮小，成為個人的攜行裝備，軍隊將能夠在無光的夜暗環境中無礙行動。

#### 參、仿生技術軍事應用情況

軍事仿生學是仿生學的一個重要分支，已經有幾千年歷史。它是模仿

<sup>17</sup> “Surface Vessel Weapon System-MM38/AM39/SM39/MM40 Exocet-antiship Missile,” *Seaforces Online – Naval Information*, <https://www.seaforces.org/wpnsys/SURFACE/MM38-Exocet-SSM.htm>.

<sup>18</sup> Rebecca Heisman, “‘Owl’ Be Seeing You: Amazing Facts About Owl Eyes,” *American Birds Conservancy*, March 4, 2022, <https://abcbirds.org/blog/owl-eyes/>.

<sup>19</sup> Julius Orłowski, Wolf Harmening, and Hermann Wagner, “Night Vision in Barn Owls: Visual Acuity and Contrast Sensitivity under Dark Adaptation,” *Journal of Vision*, Vol. 12, No. 13, December 2012, pp. 1-2.

生物系統的原理和特異功能來創造武器裝備、發展戰術技術、提高自動化指揮和後勤保障能力的科學。<sup>20</sup> 人類向生物學習的歷史就是一部生產力發展的歷史，而與生物的「相愛相殺」則是人類掌握戰爭技巧的啟蒙。隨著生物學、物理學及數學等學科的蓬勃發展，軍事仿生學獲得在戰爭中施展拳腳的有力支撐，並跟隨著戰爭實踐的演進而不斷發展，<sup>21</sup> 其於軍事領域的應用充滿生機蓬勃前景。

仿生技術的軍事應用幾乎已經融入各個軍事領域，囿於篇幅限制，本節僅引介較為成熟的仿生材料、仿生機械、仿生武器、仿生偽裝以及仿生後勤等類別的技術應用情況。

## 一、仿生材料

21 世紀以來，新的生物材料（biomaterial）朝向強固、質輕和奈米化發展。各國科學家利用蠶絲（mulberry silkworm）製造出與蜘蛛絲（spider silk）一樣強，甚至更強韌的奈米纖維（nanofibril）。<sup>22</sup> 美國海軍利用鷹嘴魚（hagfish，鰻魚的一種）黏液製造堪比凱夫勒纖維（kevlar fiber）的防護材料，用來強化艦艇防彈、防火、防污、防魚雷以及人員防鯊魚攻擊等能力，<sup>23</sup> 並可廣泛應用於國防與民生領域。

根據材料的拓撲結構（topography）原理，在次波長範圍內與空氣混合的材料，表面會呈現抗反射的特性。例如，多細孔或紋理的表面。研究人員在葉蟬（cicada）的複眼或翅膀上得到應用特定次波長結構（sub-wavelength structures, SWS），設計能夠吸收各種頻率抗反射塗料

<sup>20</sup> 趙方、遠洋，〈仿生武器或顛覆未來戰爭？〉，《北京日報》，2016 年 10 月 26 日，<https://www.chinanews.com.cn/m/mil/2016/10-26/8044000.shtml>。

<sup>21</sup> 石海明、劉一鳴，〈生物逆襲戰：軍事仿生技術顛覆戰爭格局〉，《每日頭條》，2020 年 4 月 29 日，<https://kknews.cc/zh-tw/military/6rnqk5p.html>。

<sup>22</sup> Jiatian Li, Sitong Li, Jiayi Huang, Abdul Qadeer Khan, Baigang An, Xiang Zhou, Zunfeng Liu, and Meifang Zhu, "Spider Silk-Inspired Artificial Fibers," *Advanced Science*, Vol. 9, Issue 5, February 2022, pp. 2103965 2-4 of 20.

<sup>23</sup> "The US Navy is Synthesizing Hagfish Slime to Defend Against Torpedoes and Sharks," *Interesting Engineering*, July 10, 2017, <https://interestingengineering.com/innovation/us-navy-synthesizing-hagfish-slime-defend-against-torpedoes-and-sharks>.

(antireflection coating, ARC) 的靈感。<sup>24</sup> 這種抗反射塗料可以提高載台的匿蹤性，降低被偵測率。

美國麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 和耶魯—新加坡大學文理學院 (Yale-NUS College) 從蝴蝶 (butterfly) 翅膀的特殊結構得到靈感，製造出吸收效果更好的三維 (three-dimensional, 3D) 列印太陽能電池板，<sup>25</sup> 不僅可提高太陽能光伏 (photovoltaics) 的發電效率，亦可應用於利用太陽能產生動力的無人載具。例如，無人艇、高空偵察氣球、衛星及太空站。

加拿大麥吉爾大學 (McGill University) 教授巴特拉 (François Barthelat) 等學者受到魚鱗 (fish scale, FS) 保護能力的啟發，嘗試複製動物的鱗片所具備的保護力和靈活性。<sup>26</sup> 沈銘原等多位台灣學者的研究證實，魚鱗可以增強瀝青的附著力、黏彈性、溫度敏感性和對永久變形的抵抗力。<sup>27</sup> 魚鱗是已知最堅韌的膠原蛋白基材料 (collagen-based material)，這些研究都證明了魚鱗具備製作仿生防護材料的應用潛力。例如，可以用來製造具有抗穿刺性能力的防護手套。

麻省理工學院研究團隊成功研製出仿海螺殼 (conch shell) 的抗衝擊複合材料 (composite material，簡稱「複材」)，其性能較傳統的複材提高 70%，較硬質材料提高 80%，可製造性能更好的防護裝甲，<sup>28</sup> 提高防彈衣和防彈鋼板的抗衝擊能力，使人員和裝備的安全防護得到更高的保障。

<sup>24</sup> Natarajan Shanmugam, Rishi Pugazhendhi, Rajvikram Madurai Elavarasan, Pitchandi Kasiviswanathan, and Narottam Das, “Anti-Reflective Coating Materials: A Holistic Review from PV Perspective,” *Energies*, Vol. 13, Issue 2631, May 21, 2020, p. 13 of 93.

<sup>25</sup> Angela Chen, “Butterfly Wings Inspire A Better Way to Absorb Light in Solar Panels,” *The Verge*, October 20, 2017, <https://www.theverge.com/2017/10/19/16503258/butterfly-wings-engineering-solar-cell-energy-biomimicry>.

<sup>26</sup> Katherine Gombay, “Protective Wear Inspired by Fish Scales,” *McGill*, January 19, 2017, <https://www.mcgill.ca/newsroom/article/protective-wear-inspired-fish-scales>.

<sup>27</sup> Shang-Hao Liu, Ming-Yuan Shen, Cheng-You Yang, and Chin-Lung Chiang, “A Study on Circular Economy Material Using Fish Scales as a Natural Flame Retardant and the Properties of Its Composite Materials,” *Polymers*, Vol. 13, Issue 2446, 2021, p. 2 of 15.

<sup>28</sup> Grace X. Gu, Mahdi Takaffolil, and Markus J. Buehler, *Hierarchically-enhanced impact resistance of bioinspired Composites* (Weinheim, Germany: Wiley VCH, 2017), p. 9.



## 二、仿生機械

利用仿生學原理研製出性能更強、外觀更多樣、運作更高效的仿生機械是仿生領域基礎和應用研究的重點。<sup>29</sup> 仿生機械以仿生機器人（bionic robot）和仿生無人載具（bionic drone）較具成效，分述如下：

### （一）仿生機器人

仿生機器人有別於傳統的機器人，傳統機器人的表面結構過於剛性，無法表現出類人體（humanlike）皮膚的柔軟度，若在較複雜的地形活動往往有其侷限，或需更大的體量以彌補其不足。仿生機器人則能夠提高在複雜地形的移動能力，結合人工智慧的應用，其擬人化的仿真度將更為細緻，達到幾乎難以分辨其真偽的程度。

美國賓州大學（University of Pennsylvania）機械工程教授皮克爾（James H. Pikul）將矽膠埃入纖維網中，製作出一種類似章魚和烏賊皮膚的二維（two-dimensional, 2D）材料，可以透過充氣拉成各種複雜紋理的3D結構。這種矽膠纖維材質和頭足類動物（Cephalopod，又稱「無脊椎動物」）一樣柔軟，在軟性材料中添加無彈性織物環（un-stretchy fabric rings）模仿頭足類動物的肌肉結構，最終很有可能製造出軟體機器人。<sup>30</sup>

### （二）仿生無人載具

無人載具的研發、製造與應用於上世紀末興起，進入本世紀大行其道。無人載具的靈感主要來自模仿禽鳥和動物的形狀和特性（仿形與仿性），隨著科技的進展，研究人員漸漸能夠賦予無人載具一定程度的「智力」，提高其算力（power of algorithms），使仿生載具邁入「仿智」的階

<sup>29</sup> 王磊、刁天喜、張音、劉術、魏曉青、樓鐵柱、李長芹、李鵬、王靜雪、王小理，〈2017年國防生物與醫學領域科技發展綜述〉，李向陽主編，《國防科技發展報告（綜合卷）》（北京：國防工業出版社，2018年），頁159。

<sup>30</sup> J. H. Pikul, S. Li, H. Bai, R. T. Hanlon, I. Cohen, and R. F. Shepherd, "Stretchable Surfaces with Programmable 3D Texture Morphing for Synthetic Camouflaging Skins," *Science*, Vol. 358, Issue 6360, October 13, 2017, pp. 210-211.

段。科學家顯然不以此為足，秉持精益求精的態度，將「仿形」、「仿性」和「仿智」三者進一步融合，研發出與禽鳥、昆蟲與魚類性狀相同的仿生無人載具及其群體應用。

仿生無人載具依照空中、陸地、水面以及水下的功能，可區分為無人空中載具（unmanned aerial vehicle, UAV，俗稱「無人機」）、無人車（unmanned vehicle, UV）、無人水面載具（unmanned surface vehicle, USV，通稱「無人艇」）和無人潛航器（unmanned underwater vehicle, UUV）。然而這些無人載具與禽鳥、昆蟲或魚類的外形相較，相去甚遠，鮮少真正能夠達到「仿形」的擬真目標，這當然是因為受到技術和材料的限制使然。

### 1. 無人機

在這些無人載台當中，無人機的發展最早，始於 1917 年，後在第二次世界大戰期間，美國和德國將其當作無人靶機（pilotless target aircraft, PTA）使用；<sup>31</sup> 1990 年代初，波斯灣戰爭（Gulf War）之後，以色列將其發揚光大，讓無人機從偵察型向打擊型轉變；從此受到各國軍方廣泛重視，並列入軍火庫清單中的重要儲備項目之一。

目前具備擬真外形的仿生無人機有機械蝙蝠（Bat Bot）、機器斑鳩（Dove Drone）、機器蜂鳥（Meta Fly）、機器貓頭鷹（Owl Drone）、機器蜂（Robobee）和機械蜻蜓（Skeeter）等，這些迷你型仿生無人機通常被各國特種部隊列為重要的武器清單。

受制於技術與成本效益考量，與禽鳥外形相似度較高者以小型和微型仿生空中無人載具為主。例如，斑鳩無人機（dove drone，如圖 3-1），是一種偽裝很好的微型偵察無人載具。<sup>32</sup> 測試時甚至出現鳥群伴飛的情況，可見其仿生度極高。無人機群體化應用即為「蜂群」或「鳥群」（swarm），

<sup>31</sup> 〈飛機的學生兄弟 —— 無人機，從 1917 年的發展歷史〉，《無人機玩家》，<https://reurl.cc/ZWWAYg>。

<sup>32</sup> Robert Skopec, "China's Robotic Spy Birds Take Surveillance to New Heights," *Scientific Research and Community/ Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research*, Vol. 2, Issue 3, No. 113, August 15, 2020, p. 2 of 5.

以色列在 2021 年 5 月對巴勒斯坦激進組織哈瑪斯（Hamas）的作戰中，開啟了無人機蜂群實戰化應用的先河。<sup>33</sup>



圖 3-1 斑鳩無人機

資料來源：Robert Skopec, “China’s Robotic Spy Birds Take Surveillance to New Heights,” *Scientific Research and Community/ Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research*, Vol. 2, Issue 3, No. 113, August 15, 2020, p. 2 of 5.

## 2. 無人車

無人車的發展起步相對較晚，主要得力於「智慧移動」（E-Mobility）概念的興起和發展。早期無人車結合機械手臂功能，發展出拆彈機器人（Bomb Disposal Robot）；後期克服無人車模組和次系統的操作安全性，<sup>34</sup>發展出蟻群優化算法（ant colony optimization algorithm, ACO algorithm），有效降低運輸成本，提高工作效率，為後勤保障做出巨大貢

<sup>33</sup> 江忻杓，〈軍事仿生學：無人載具的群體化應用〉，《青年日報：韜略談兵》，第 97 期，頁 6。

<sup>34</sup> Mark V. Mamchenko, Mariya A. Romanova, and Peter M. Trefilov, “Defining the Critical Characteristics of Unmanned Vehicles in a Smart City,” *IFAC Papers Online*, Vol. 54, No. 13, 2021, p. 490.

獻。儘管無人車於軍事領域的應用已經實現，仍然以能夠節約運輸成本的無人車蟻群物流保障為主。

### 3. 無人艇

隨著空中和地面無人載具的蓬勃發展，仿生無人艇的研發也急起直追。現階段無人艇的發展區分為水面無人艇（無人水面載具）和無人潛航器（無人潛艇）。

#### （1）水面無人艇

水面無人艇的發展雖亦始於第二次世界大戰，大行其道卻要到 1990 年代以後，即便是在近幾年，相關國家都還在持續測試其系統的穩定性和可操作性。美國海軍第三艦隊所屬四艘原型無人艇在 2022 年環太平洋演習（Rim of the Pacific Exercise, RIMPAC Ex）中進行測試，它們攜帶酬載物資、蒐集情報，<sup>35</sup> 驗證與載人艦艇作戰的協同性和分工性，以確定其於大規模艦隊中扮演的角色。

#### （2）無人潛航器

嚴格而論，水下潛航器（UUV）的發展早於無人艇（USV），UUV 的形狀通常會根據其運輸載台的吊放空間或投射能力來設計。例如，由水面艦船搭載的 UUV，其外觀多為類似魚雷的柱狀形，並附有掛環以利吊放和回收；由潛艦投射的 UUV，其尺寸大小近似於魚雷的外形，如此設計可以於通過魚雷發射管（torpedo tube）投射和回收；大型 UUV 的外形設計則近似沒有帆罩的潛艦，其性能直追載人柴電潛艦。

## 四、仿生武器

英國皇家海軍研究未來潛艦概念，靈感來自海洋生物，例如，發展一種形狀像魷魚（manta ray）的載人母艦，配備偵測器莢艙的鰻魚無人艇，這些莢艙可根據需要分散（dissolve）以避免被敵人發現，而魚形魚雷則

<sup>35</sup> Naval News staff, “Four Prototype USVs Are Participating in RIMPAC 2022,” *Naval News*, July 26, 2022, <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/four-prototype-usvs-are-participating-in-rimpac-2022/>.

可執行魚群攻擊敵艦，這些概念可望在未來 50 年內徹底改變水下作戰方式。<sup>36</sup>

在追求仿生無人載具的綜合能力下，英國披露的未來潛艦概念以「仿生」為發展重點，包括「鸚鵡螺 100」（Nautilus 100）仿生潛艦、「鰻魚」仿生無人潛航器以及仿生武器，如圖 3-2、3-3、3-4、3-5。這些概念的靈感都是來自海洋生物，有望在未來 50 年內顛覆水下作戰方式。

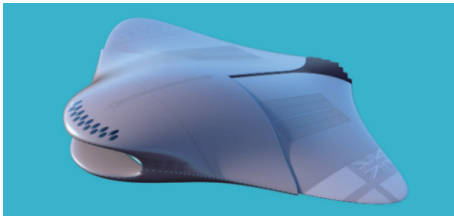


圖 3-2 鸚鵡螺 100 仿生潛艦



圖 3-3 潛射飛魚群

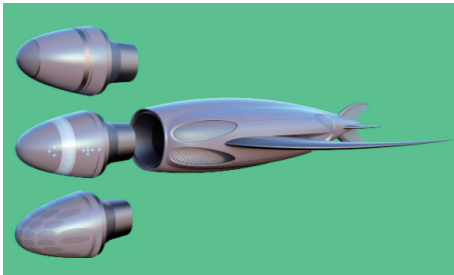


圖 3-4 潛射飛魚武器

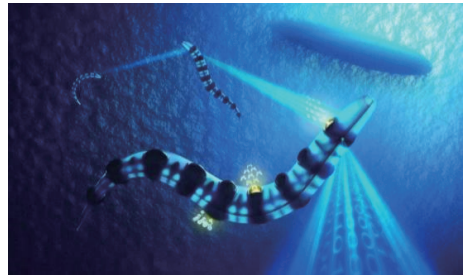


圖 3-5 鰻魚無人潛航器

資料來源：Matt Burgess, “These Futuristic Royal Navy Submarine Concepts Look and Act Like Fish,” *Wired*, August 28, 2017, <https://www.wired.co.uk/gallery/royal-navy-submarine-concepts>.

<sup>36</sup> “Royal Navy Unveils Radical Future Submarine Concepts,” *Royal Navy*, August 28, 2017, <https://www.royalnavy.mod.uk/news-and-latest-activity/news/2017/august/28/170828-royal-navy-unveils-radical-future-submarine-concepts>.

## 五、仿生偽裝技術

仿生偽裝體現在陸戰領域，主要是利用生物根據外部環境變化而改變體表顏色的原理，尋求變色偽裝技術的提升。《國際分子科學期刊》（*International Journal of Molecular Sciences*）2022年12月號，有篇論文探討魷魚、章魚和墨魚等頭足類動物皮膚細胞的反光蛋白具備改變皮膚顏色或調節其反射光的特性，可以藉由調整其皮膚的色素、虹彩、透明度和光散射，融入或出現在周圍的環境中，堪稱是動物界的偽裝大師。<sup>37</sup> 這種反光蛋白應用在軍服，可以擾亂紅外線偵測效果。

皮克爾也根據頭足類動物的變色特性，研究能夠在幾秒內融入環境形狀和顏色的偽裝技術，牠們可以在幾毫秒內從其皮膚上投射出分層結構，形成廣泛的紋理偽裝。研究人員據以研發一種合成的組織，允許將二維的可拉伸表面轉變為三維樣貌，模仿自然界的石頭和植物形狀，並改變自身的顏色，融入其背景環境當中，<sup>38</sup> 形成極佳的偽裝效果。

美國哈佛大學約翰·保爾森（Harvard John A. Paulson）工程與應用科學學院（School of Engineering and Applied Sciences, SEAS）的研究人員與沙烏地阿拉伯阿布杜拉國王科技大學（King Abdullah University of Science and Technology）合作，在鳥類羽毛的結構色（structural color）的基礎上，研發出一種仿生的無序多孔角蛋白網狀奈米結構（disordered and porous nanonetwork of keratin），不僅可以防刮傷，還可以提高車輛在可見光之下的匿蹤效果。<sup>39</sup>

<sup>37</sup> Junyi Song, Baoshan Li, Ling Zeng, Zonghuang Ye, Wenjian Wu, and Biru Hu, “A Mini-Review on Reflectins, from Biochemical Properties to Bio-Inspired Applications,” *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 23, Issue 15679, December 10, 2022, p. 1.

<sup>38</sup> J. H. Pikul et al., “Stretchable Surfaces with Programmable 3D Texture Morphing for Synthetic Camouflaging Skins,” *Science*, Vol. 358, Issue 6360, p. 210.

<sup>39</sup> Leah Burrows, “Disordered Nanonetwork Produces Robust and Vibrant Colors for Vehicles, Biomimetic Tissues and Camouflage,” *PHYS.ORG*, November 28, 2016, <https://phys.org/news/2016-11-disordered-nanonetwork-robust-vibrant-vehicles.html>.

## 六、仿生後勤

美國陸軍納蒂克研究發展與工程中心（Army Natick Research, Development and Engineering Center）早於 1990 年代即著手進行「強化戰力的食品成分：提升戰鬥口糧的食品成分評估」（Food Components to Enhance Performance: An Evaluation of Potential Performance-Enhancing Food Components for Operational Rations），運用生物技術對天然食品進行生化製作，研製可在高原、沙漠、熱帶雨林和嚴寒地帶等特殊作戰環境使用的口糧食品。<sup>40</sup>

## 肆、仿生技術應用的挑戰與發展趨勢

美國陸軍利用仿生學，製造能夠在飛行途中改變形狀的無人機，<sup>41</sup> 這種兼具「變色龍」和「變形蟲」的作用，可造成雷達上的回跡大小不斷變化，將對操作手的判斷造成混淆，偽裝欺敵的效果十足，這一偽裝技術將對未來的軍事行動產生革命性的影響。

美國哈佛大學（Harvard University）和耶魯大學（Yale University）教授合作研發水下機器人（underwater robot），觀察各種魚類的游動特徵、生活習性和動作特點，發現金槍魚（tuna）具備平滑的線條，極快的游動速度以及其於水中的高度靈敏性，<sup>42</sup> 因此成為新一代無人水下潛航器，或稱水下機器人設計參考模仿的對象。

早期的無人水下潛航器以從事海底調查、水下目標探測及獵除水雷為主，但由光纖電纜（fiber optic cable）控制，存在作業距離有限、電纜

<sup>40</sup> Irwin A. Taub, "Optimizing the Design of Combat Rations," in Bernadette M. Marriott, ed., *Food Components to Enhance Performance: An Evaluation of Potential Performance-Enhancing Food Components for Operational Rations* (Washington, D.C.: National Academy Press, 1994), p. 77.

<sup>41</sup> U.S. Army Research Laboratory, "Research Leads to Drones That Can Change Shape Mid-Flight," *Lab Manager*, June 22, 2020, <https://www.labmanager.com/research-leads-to-drones-that-can-change-shape-mid-flight-23069>.

<sup>42</sup> Dylan K. Wainwright and George V. Lauder, "Tunas as A High-performance Fish Platform for Inspiring the Next 4 Generation of Autonomous Underwater Vehicles," *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, pp. 7-8 of 34.

防護力脆弱、作業母船運轉力受限制等缺點；後期朝大型自航式 UUV 發展，使其功能大增，但其技術難題尤甚，因此目前僅中、小型 UUV 納入一些國家海軍的戰鬥序列，儘管迄今尚未有足數軍事應用的大型 UUV 服役，不過為期不會太遠。

因應未來海軍作戰任務需要，必須讓無人潛艇更加聰明，強化措施包括：一、以指揮與管制（command and control, C2）系統將 UUV 與其他水面艦船連結。二、整合最新的水下偵測技術 —— 運用先進聲納系統。以及三、充分應用機器學習（machine learning）和人工智慧演算法（algorithms）。<sup>43</sup> 受到潛艦投射和回收無人潛航器的限制，UUV 在過去 30 年來與水面艦船的連結非常高，基於 UUV 的運用潛力巨大，美國海軍正加緊測試驗證，讓超大型無人潛航器（extra-large unmanned underwater vehicle, XLUUV）加入戰鬥序列。

無人車是一種「智慧移動」的概念，透過人工智慧、物聯網（Internet of Things, IoT）和 5G 的結合而實現，瑞士意法半導體公司（ST Microelectronics）亞太區副總裁暨台灣區總經理伊佐（Giuseppe Izzo）預估，由於迄今為止尚未有任何一個國家對無人車制定完善的安全規則或立法，大量無人車上路還需至少 10 年的時間。<sup>44</sup>

美國海軍發展聯合軍種爆裂物處理無人系統（Joint Service EOD, JSEOD）計畫，其中先進爆裂物處理機器人系統（Advanced Explosive Ordnance Disposal Robotic System, AEODRS）的模組化開放式爆裂物處理機器人系統能夠提高不同系統之間的互操作性（interoperability）。<sup>45</sup> 模組化設計的好處是能夠節約成本和一體適用，也是無人操作系統的發展趨勢。

由於自然界生物結構存在複雜性，材料工程對仿生應用的發展非常重要。具體而言，裝置需具有低表面摩擦或具有高強度及靈活性，偵測器材

<sup>43</sup> “Unmanned Underwater Vehicles,” *General Dynamics*, <https://gdmissionsystems.com/underwater-vehicles>.

<sup>44</sup> 任立萍，〈智慧移動是生活更是新經濟！〉，《產業特輯》，2019 年 5 月，頁 15-16。

<sup>45</sup> Mark A. Hinton, Michael J. Zeher, Matthew V. Kozlowski, and Matthew S. Johannes, “Advanced Explosive Ordnance Disposal Robotic System (AEODRS): A Common Architecture Revolution,” *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 30, No. 3, 2011, p. 257.



料必須耐腐蝕、耐高壓且不會阻礙訊號傳輸，因此材料特性是關鍵角色。此外，為了模仿生物的複雜表面結構，能夠製作複雜幾何特性的材料製程也是一大挑戰。<sup>46</sup>而操作複雜載具的控制技術則是另一項必須克服的難關，一旦單機操控自如，則群體化軍事應用將可水到渠成。

## 伍、小結

儘管一般對軍事仿生學發展階段認知係始於「仿形」，繼而「仿性」，然後進入「仿智」階段。然經研究發現，軍事仿生學三個模仿階段殆無疑義，惟實際順序應該是先從模仿動物攻擊與防衛能力的「仿性」階段開始；接著為了提高自主化與自動化能力，加入人工智慧，而進入「仿智」階段；然後為了滿足偽裝的需要，更精緻的「仿形」工程乃應運而生。

人類進化只有 500 萬年，而生命進化已經歷 35 億年的歷史。<sup>47</sup>武器裝備的發展模仿自然的潛力和機會無窮。但並非針對某些生物的某些特殊結構或特殊機能進行簡單的複製和模仿，而是透過對生物系統的優異技能和特殊本領的研究得到啟示，再藉由人類的聰明才智，創造出生物系統無法比擬的武器裝備。換言之，仿生技術的軍事應用暨要「源於生物」，更要「高於生物」。

軍事仿生要達到栩栩如生，兼具「仿性」、「仿智」和「仿形」於一身的仿真程度，「材料科技」和「裝備控制」是仿生科技發展的關鍵因素，此二者亦是未來具有發展潛力的研究領域。無人載具的群體化應用已經愈來愈成熟，包括空中飛的蜂群、陸地跑的蟻群以及海面或海下游的狼群，國防科工應積極著力於軍事仿生學的研究領域，俾利滿足軍事應用需要。

<sup>46</sup> 賴渝翔、林有駿、林佑叡、楊鏡堂，〈仿生機制與運用介紹——向海洋生物學習〉，《農業生技產業季刊》，第 61 期，2020 年，頁 69-70。

<sup>47</sup> 易馳科技，〈恐龍滅絕到人類出現，歷經 6000 萬年，這段時間什麼生物主宰了地球〉，《人人焦點》，2021 年 1 月 8 日，<https://ppfocus.com/0/pe4620f7c.html>。

