

「仿生學」在軍事領域的 應用與發展趨勢

Applications and Development Trends of Bionics in Military Field

江炘杓 先生、翟文中 先生

提 要：

- 一、「仿生學」是一門跨學科的科學，透過模仿自然界的生物系統、結構型態和運作功能，為軍事技術創新提供豐富靈感；隨著多學科的深度融合，「仿生學」正進一步向智慧化和自動化的軍事系統發展。
- 二、由於「仿生學」的軍事運用不僅能提升現有裝備的性能，也為未來戰爭型態演變提供新的思路；加上近年來，其在軍事領域的運用已獲得顯著地進展，但仍面臨著技術複雜性、倫理和法律問題，以及對環境可能影響的挑戰，故必須在促進技術創新的同時，思考其發展的可持續性。
- 三、通過對「仿生學」做更進一步的研究和實踐，可望在軍事領域發揮更重要的作用，為國防和安全事業做出更大貢獻。由此可見，「仿生學」正為軍事創新提供一條嶄新的途徑，後續相關發展值得國軍高度關注。

關鍵字：仿生學、軍事運用、生物機制、技術創新、系統整合

Abstract

1. Bionics is an interdisciplinary science that draws inspiration from natural biological systems, structures, and functions to drive innovation in military technology. With the deep integration of multiple disciplines, bionics is advancing toward more intelligent and automated military systems.
2. The military applications of bionics not only enhance the performance of existing equipment but also provide new perspectives on the evolution of future warfare. In recent years, bionics has made significant progress in the military field. However, it also faces challenges such as technical complexity, ethical and legal issues, and potential environmental impacts. Therefore, while promoting technological innovation, it is essential to consider the sustainability of its development.

3. Through further research and practical applications, bionics is expected to play an increasingly vital role in the military domain, contributing to national defense and security. It is evident that military bionics is a promising discipline with immense development potential.

Keywords: bionics, military applications, biological mechanism, technological innovation, system integration

壹、前言

人類學習師法自然已有悠久歷史，然早期科技技術難以將生物機制與工程技術有效整合，且多半時間停留在「知其然不知其所以然」的階段，能實際轉化為技術成果的案例更極其罕見。在這種情況下，從生物機制探索到工程技術模仿的創新途徑，亦無法發展成為一門獨立學科。其後，隨著物理、化學定律在工程領域的運用接近極限，工程界遂開始找尋其他途徑開發新技術，在此一迫切需求的驅動下，「師法自然，向大自然學習」的想法再度受到重視；加上生物科學與工程技術整合理論的發展獲得相當程度進展，在這些因素的交互作用下，促使「仿生學」這門跨領域學門的誕生。¹這門學科起步時間甚晚，由於其在科技創新領域具有巨大的潛力，現已成為全球各主要國家追求科技跨越式成長的重要途徑；軍事部門在生物機制仿生運用上亦獲得豐碩的成果。

為說明「仿生學」在軍事領域的現況

與前景，本文主要區分三個部分進行探討。首先，對「仿生學」的定義、分類與架構進行說明，藉此有助讀者對其具備基本概念、研究範疇與組成架構等內容，能有一較為清晰與全面性的認識。其次，列舉「仿生學」在不同軍事領域的發展運用案例，畢竟這些創新技術正加速武器的研發運用，同時有效地提升部隊的戰力。最後，將對「仿生學」在軍事運用的巨大潛力進行說明，兼論此學科的限制對其軍事領域運用可能形成的制約。期望透過對「仿生學」運用與發展的全盤分析，不僅確認其無所不在的各項運用，以及做為軍事技術革新重要途徑與驅動力的價值；另方面，分析其發展與面對的各項技術挑戰，亦有助讓讀者能深入地瞭解其在軍事領域的發展、運用方向與前景。

貳、「仿生學」定義、分類與組成架構

相較其他科學學門，「仿生學」的發展時間不長，並未受到人們特別關注，直

註1：生物科學與工程技術的結合，受益於美國科學家夏農(Claude Shannon)、維納(Norbert Wiener)兩人分別提出的「資訊論」(The Mathematical Theory of Communication)與「控制論」(Cybernetics)兩種學說，這為仿生學的創建與後續發展奠定了良好基礎。劉福林，〈仿生學發展過程的分析〉，《安徽農業科學》(安徽合肥)，2007年第15期，頁4404。

到最近，其巨大的運用價值才被科學界發掘與重視；惟其定義、分類及組成架構仍待進一步地確立。即令如此，為能對此學科相關議題展開討論，本文援引若干重要的研究機構與學者的觀點與主張，並配合說明內容，以彌補當前「仿生學」整體架構不足之處。分段說明如後：

一、定義

(一)1960年，美國空軍少校史提爾(Jack E. Steele)在俄亥俄州達頓市萊特帕特森(Wright-Patterson)空軍基地的一次會議上，首次提出「仿生學」(bionics)這個名詞，並將其定義為「從自然界複製某些功能或展現自然系統或其類似物特徵的系統科學」。²其後，此領域出現許多意義近似的詞彙，³較為流傳的係隸屬「美國空軍裝備司令部」的科研機構—「空軍研究實驗室」(Air Force Research Laboratory, AFRL)提出的「biomimetics」與美國自然科學研究學者班娜斯(Janine M. Benyus)使用的「biomimicry」，兩者中譯都是「生物仿生學」，惟英文意義卻有不同的界定。

(二)美國「空軍研究實驗室」將其研

究的目標定義為「試圖研究生物日常生活中使用的新奇系統之機制與設計規則，並學習瞭解與控制這些系統的工程流程與運作機制」；⁴至於班娜斯認則為「仿生學」係「透過對自然模式研究並模仿其設計與流程，從而解決人類問題的一門嶄新科學」，她更指出，應將大自然視為一個「模式、標準與導師」，並強調「永續性」(sustainability)是「仿生學」發展的一個重要目標。⁵

(三)由於「仿生學」缺乏一致且嚴謹的操作定義，導致相關術語在實際應用中常有交疊與混用情況出現，不同學者們則從其各自研究方向，選擇不同術語進行論證說明。為使讀者對其定義進行快速理解，可將其描述為「一門以生物機制為研究對象的學科，並將獲得的知識用來改善現有或創造嶄新的工程技術，其係生物科學與工程技術的整合，可用以提升人類的科技水準，並產生巨大的經濟效益」。⁶

二、分類

如同其他科學學門，「仿生學」亦被劃分成若干不同分支，透過分類除可增進人們對其廣度與深度的瞭解，亦有助對其

註2：Julian F. V. Vincent, Olga A. Bogatyreva, Nikolaj R. Bogatyrev, Adrian Bowyer and Anja-Karina Pahl, "Biomimetics: its practice and theory," *Journal of the Royal Society Interface*, Volume 3, Issue 9, 22 August 2006, p.471。

註3：同註2，相關詞彙與片語包括biognosis, biomimesis, biomimetics, biomimicry, biologically inspired design等。

註4：〈AFOSR—Chemistry and Biological〉，Air Force Research Laboratory，<https://www.afrl.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Display/Article/2282132/afosr-chemistry-and-biological-sciences/>，檢索日期：2025年2月12日。

註5：〈Biomimetics〉，Wikipedia，https://en.wikipedia.org/wiki/Biomimetics#cite_note-Benyus_1997-18，檢索日期：2025年2月12日。

註6：李言俊、高陽，〈仿生技術及其應用〉，《安陽工學院學報》(河南安陽)，2005年第1期，頁28。

研究能朝向更為專業與分工的方向發展。當前，「仿生學」依模仿生物的生理機制與群體行為可概分為五類，內容概要如后：

(一)「結構仿生」-係透過對生物體結構的研究，開發結構類似並可模擬其功能的人工機構，例如模仿魚類游動推進機制製成的仿生機器魚。⁷

(二)「功能仿生」-係運用人造機械具有或部分實現高等生物的思維、感知與運動等功能，如用來治療大腦功能受損的仿生晶片，就可代替人體腦部的特定功能區。

(三)「材料仿生」-係對生物體材料構造與形成過程進行模仿設計，使得開發的材料具有更佳的強度、韌性或若干類生物特性，如仿人體皮膚與肌肉製成的仿生皮膚與人造肌肉。

(四)「控制仿生」-主要係透過對昆蟲如何控制身體各部分反應的研究，將昆蟲透過局部動作合成具意義生物的行為方式，運用於機構控制，用以確保其在非結構化環境下的靈活運動。

(五)「群體仿生」-是透過對生物群

體共同行為的研究，將其機制運用於提升整個系統的效率，最顯著例子則是對機器人與無人機的集群操作。⁸

未來，隨著科學家對生物運作機制與原則的探索日深，「仿生學」的研究分支將會相應地成指數性的增長，並讓研究者「目不暇給」。

三、組成架構

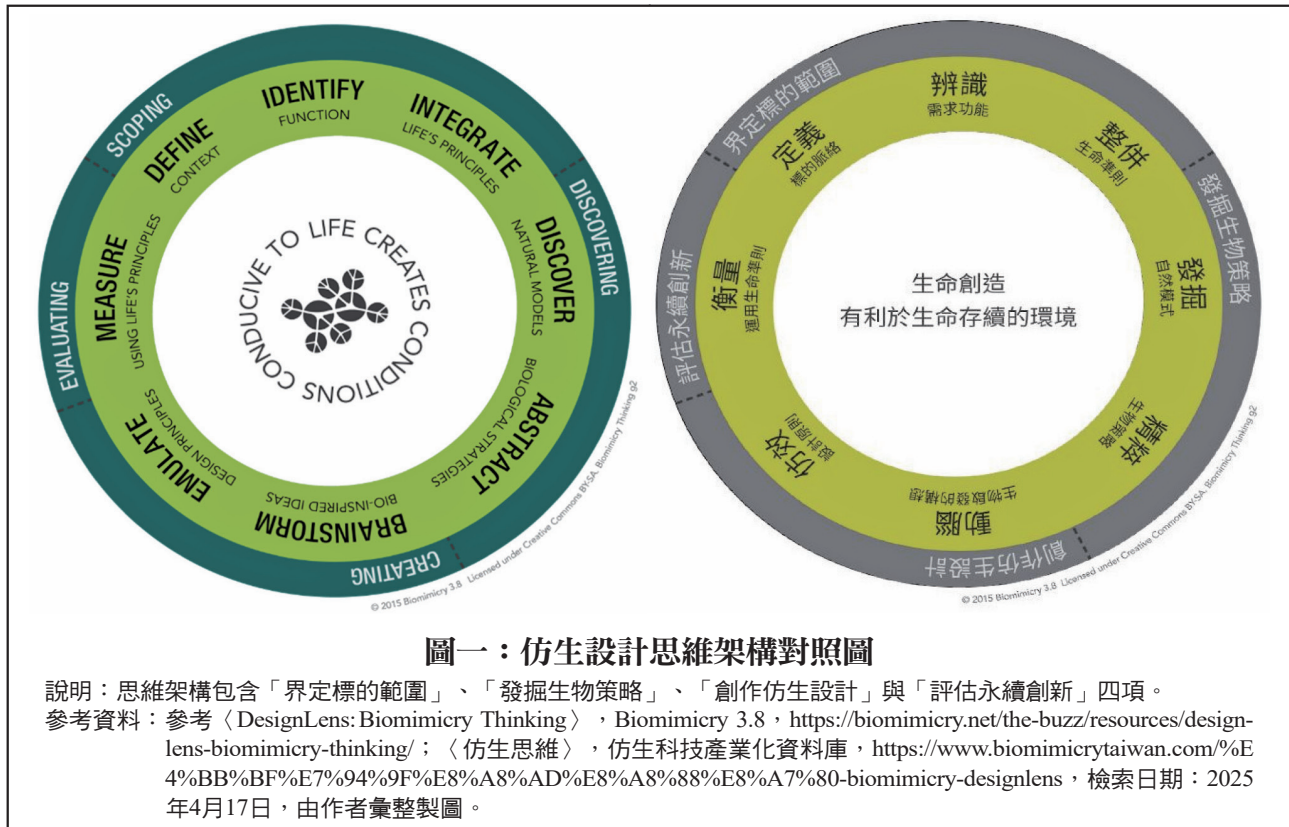
(一)就本質而言，其可視為生物模擬學，係一門介於生物科學與工程科學間的邊緣學科，⁹其雖然不屬於前揭兩個主流學科，惟涉及的專業知識與研究方法，卻含括兩個不同主流學科；因此，兩學科的各分支交叉構成「仿生學」的組成架構。由於涉及的工程技術分支範圍甚廣，包括結構力學、材料科學、生物化學、基因工程、生物化學、機電整合、模式模擬(Modeling and Simulations, M&S)與人工智慧(Artificial Intelligence, AI)等不同的學科；另方面，其在生物科學領域的學門也包羅萬象，計有生物力學、進化生物學、功能型態學、結構生物學、生物物理學與分子生物學等。

(二)兩個看似「南轅北轍」的主流學

註7：喻俊志、陳爾奎、王碩、譚民，〈仿生機器魚研究的進展與分析〉，《控制理論與應用》(廣東廣州)，第20卷，第4期，2003年8月，頁485至491；梁建宏、王田苗、魏洪興，〈水下仿生機器魚的研究進展I—魚類推進機理〉，《機器人》(遼寧瀋陽)，第24卷，第2期，2002年3月，頁107至111。

註8：杜鵬東，〈仿生學及生物力學研究綜述〉，《林業機械與木工設備》(黑龍江哈爾濱)，第41卷，第9期，2013年9月，頁17至19。

註9：鄧愛華，〈從自然界獲取科學創新的靈感——科學家聚焦仿生學〉，《科技文萃》(北京市)，2004年第4期，頁10；楊林靜，〈仿生學離我們越來越近〉，《中國高校科技與產業化》(北京市)，2003年第10期，頁22。



科領域，透過系統論、「控制論」(Cybernetics)¹⁰、資訊論、相似理論與優化理論等學理的協助對接，讓從生物機制研究落實到工程技術的整個流程能順利開展。¹¹由於「仿生學」的執行係將人類的挑戰轉化為生物問題，「發掘生物策略」就成為「仿生設計思維」(Biomimicry Thinking)中最具關鍵性的環節。¹²為能將生物策略轉譯成為人類設計語言，「美國

仿生協會」(Biomimicry Institute)與「仿生3.8公司」(Biomimicry 3.8 Company)結合跨域團隊，並運用模型輔以實際經驗施作後，提出含括四個面向的思維架構(如圖一)，並有助將生物策略成功整合至人類的設計之中，並發展出「生物功能分類表」(Biomimicry Taxonomy)，分類表包括約160個生物功能，分屬八大類群以及30個子類群，¹³這使得該學科的實際運作

註10：〈cybernetics〉，Cambridge University Press & Assessment，<https://dictionary.cambridge.org/zht/%E8%A9%9E%E5%85%B8/%E8%8B%B1%E8%AA%9E-%E6%BC%A2%E8%AA%9E-%E7%B9%81%E9%AB%94/cybernetics>，檢索日期：2025年2月12日。該項理論係現代資訊技術發展的重要支撐，主要研究在機器與電子設備中如何進行訊息傳遞，並將其與人類大腦與神經系統訊息傳遞方式進行比較。

註11：岑海堂、陳五一，〈仿生學概念及其演變〉，《機械設計》(天津市)，第24卷，第7期，2007年7月，頁66。

註12：江佳純，〈新生物經濟時代的原創思維—仿生(Biomimicry)設計思考與研發方法學介紹〉，《農業生技產業季刊》，2018年第55期，2018年9月，頁80。

註13：同註12，頁84。「仿生3.8公司」是一顧問和專業培訓公司，專注於自然積極設計和創新。



圖二：美國微型無人機

資料來源：〈美國陸軍將配備微型無人機，協助士兵偵察任務〉，《北美智權報》，第231期，2019年2月27日，https://www.naipo.com/Portals/1/web_tw/Knowledge_Center/Innovative_Gadgets/IPNC_190227_1801.htm，檢索日期：2025年4月17日。

能有較為明確的設計架構與操作方向。

綜合前述，不難發現「生物功能分類表」較以「分支為基礎」的架構，更能清楚地呈現「仿生學」的組成內涵，且可隨著生物機制的陸續發現，擴大並完善「仿生學」的類群集合與生物功能表。

參、「仿生學」軍事運用的成熟實例

「仿生學」的軍事運用促成「軍事仿生學」(Military Bionics)成為一門新興研究的學科，也是一個重要分支。它主要是模仿生物系統的原理和特異功能，以創造武器裝備、發展戰術技術、提高自動化指揮和後勤保障能力的科學。¹⁴仿生技術幾乎已經融入各個軍事領域，以下援引較

成熟的五項仿生類別(包括結構仿生、功能仿生、材料仿生、控制仿生與群體仿生)的軍事運用實例，並展現「仿生學」運用於軍事領域的巨大潛力，其不僅成功地突破了傳統設計的侷限，更促進了「新一代」武器與載台的發展。分析說明如後：

一、結構仿生(Structural Bionics)

主要是模仿自然界的生物結構，模仿鳥類和昆蟲是比較突出的成果之一，包含有微型和仿生振翅無人機，說明如後：

(一)微型無人機主要模仿蜂鳥或昆蟲的撲翼飛行，其中以美國「國防高等研究計畫局」(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)投資研製的「奈米無人機」(Nano Air Vehicle, NAV)最著名，它可以向後飛、盤旋和旋轉，這些動作都是透過兩隻翅膀的機動性實現結構仿生；由於其隱蔽性甚高，並可在複雜環境中執行偵察任務(如圖二)，被美國《時代週刊》(Times)評為2011年最佳的「40項發明」之一。¹⁵

(二)仿生振翅無人機係通過模仿鳥類翅膀的空氣動力學設計，提升飛行效率和機動性，適用於城鎮戰和反恐作戰的室內偵察。其他酷似生物外型的無人機，如機器蝙蝠(Bat Bot)、機器斑鳩(Dove drone)、機器蜂鳥(Meta fly)、機器貓頭鷹(Owl

註14：趙芳、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/mil/2016/10-26/8044000.shtml>，檢索日期：2025年2月17日。

註15：Lakshmi R Sabbapathy, “Hummingbird’s-Eye View for the US Military,” Leonardo Times, September 2013, p. 8。



機器蝙蝠



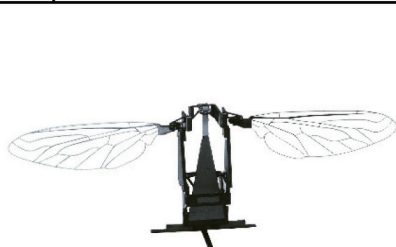
機器斑鳩



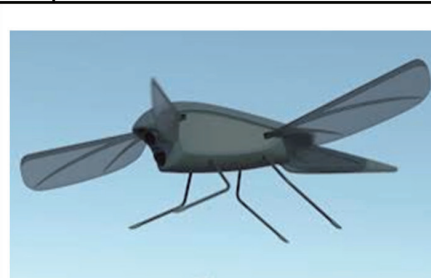
機器蜂鳥



機器貓頭鷹



機器蜂



機器蜻蜓

圖三：酷似生物外型的無人機

資料來源：參考〈中國研發鳥型無人機，用於監控新疆等地區〉，《明日科學》，2018年8月21日，<https://tomorrowsci.com/technology/%E4%B8%AD%E5%9C%8B-%E9%B3%A5%E5%9E%8B%E7%84%A1%E4%BA%BA%E6%A9%9F-%E7%9B%A3%E6%8E%A7-%E6%96%B0%E7%96%86/>；〈蝙蝠機器人：蝙蝠型仿生無人機〉，Device Plus，2019年5月8日，<https://micro.rohm.com/tw/deviceplus/inspire/bat-bot-the-bat-inspired-robot-drone/>；u Design，〈來自法國MetaFly遙控機械蜂鳥降落臺灣，嘖嘖募資正式啟動！〉，《有·設計》，2020年4月8日，<https://pse.is/7dyuft>，檢索日期：2025年4月17日，由作者彙整製圖。

drone)、機器蜂(Robobee)和機械蜻蜓(Skeeter)等亦紛紛出現(如圖三)，這些維妙維肖的迷你型仿生無人機通常被各國特種部隊列為重要的武器裝備清單。¹⁶

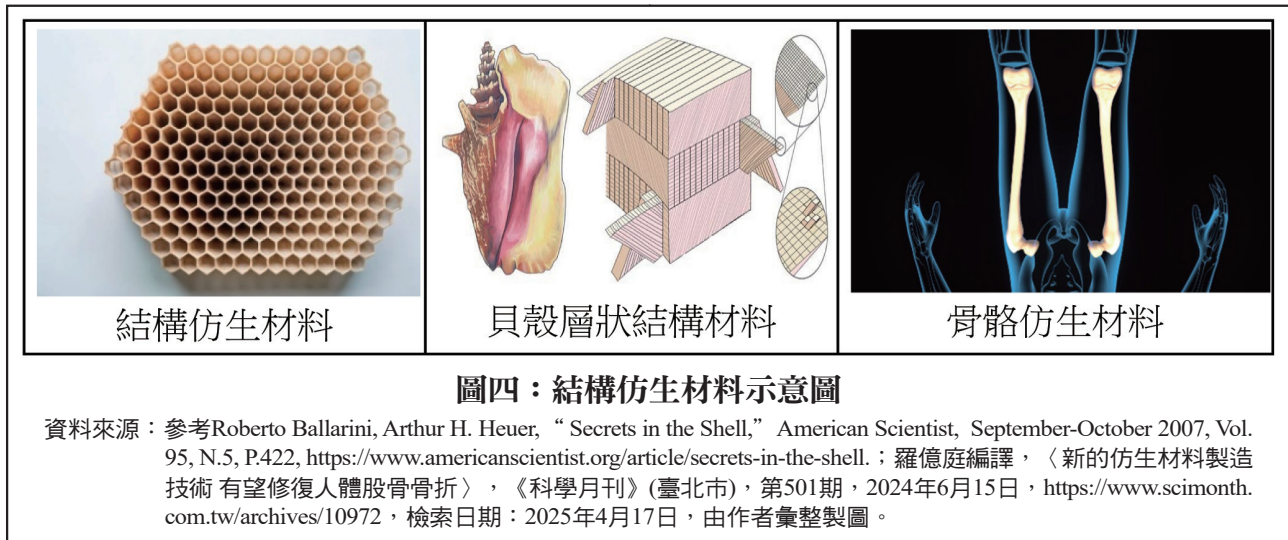
二、功能仿生(Functional Bionics)

主要是模仿生物的能力，以水中生物來說，水母(jellyfish)、烏賊以及魚類能夠在水中優游自在地浮上和浮下，為科

學家帶來啟發。水母具有「浮鰾」(swim bladder)，透過感應細胞控制上下的姿態；烏賊靠著調節體內的水分密度，實現浮上、浮下和前進的作用。¹⁷魚類也有靈巧的魚鰾控制進氣和排氣；因此，能於水中輕鬆自在的活動。根據這些原理，潛艦設計水櫃模仿魚類浮鰾的功能，以充水和排水的方式讓潛艦下潛和上浮；至於毒蛇和

註16：江忻杓，〈仿生技術的軍事應用〉，《2023國防科技趨勢評估報告：國防產業新動力》(臺北市：財團法人國防安全研究院，2023年)，頁56。

註17：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。



飛魚優異的獵食能力，也成為科學家研究功能仿生主要取經的對象。主要產品介紹如下：

(一) 響尾蛇飛彈

美軍響尾蛇飛彈(Sidewinder missile，AIM-9)係根據響尾蛇的「頰鱗窩」(lo-real pit)擁有優異的紅外線搜索與追蹤(infrared search and track，IRST)，精度高達千分之一度溫差的能力，¹⁸只要是絕對溫度大於零度的生物都會散發紅外線，雖然響尾蛇近乎眼盲；然其頰鱗窩仍能輕易感應出細小生物的紅外線訊號，並根據這些跡訊快速捕食。這種感應能力被應用在「響尾蛇飛彈」的研製，並於導引控制單元安裝高靈敏度的紅外線感測器，其

作用類似響尾蛇的「頰鱗窩」，這款飛彈可以偵測和追蹤目標散發出來的紅外線跡訊或熱源進行攻擊。¹⁹

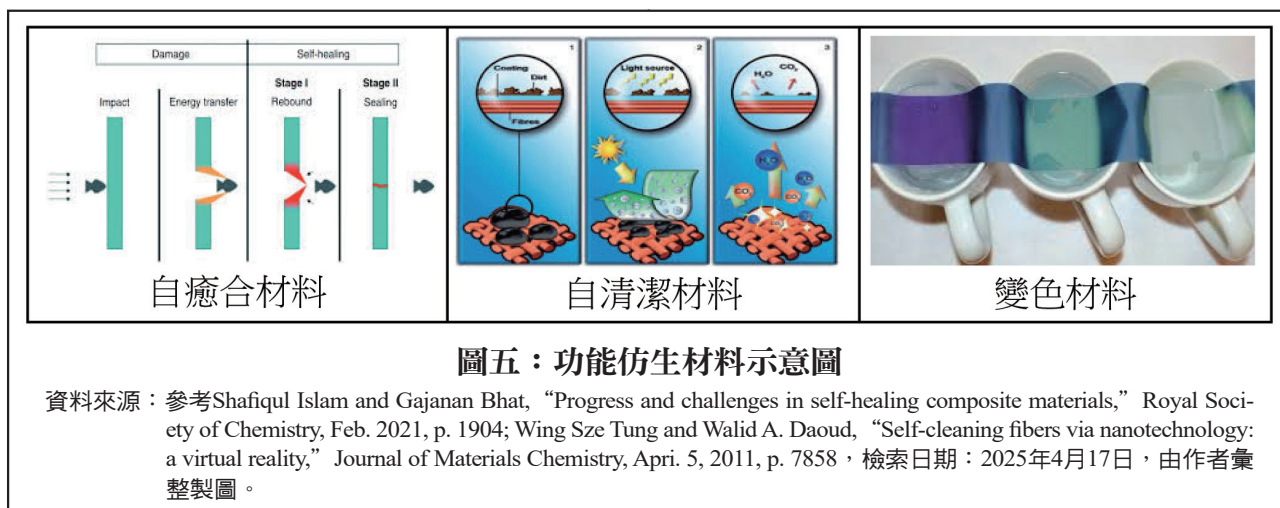
(二) 飛魚飛彈

飛魚會躍出水面8-10公尺，以躲避其他大型魚類追捕，然後以每秒近200公尺的速度滑翔150-200公尺，²⁰再鑽入水中，逃脫天敵的追蹤。「法國航太公司」(Aérospatiale)根據飛魚掠海飛行的特性研製出「飛魚攻船飛彈」(Exocet，AM-39)，其性能與飛魚的飛行軌跡差不多，發射後的巡航高度僅15公尺，進入接戰區時高度下降至2-5公尺，接近至目標區高度再降至0.5-3公尺，完全進入艦載雷達的偵測死角；巡航階段採慣性導引，進入

註18：Elena O. Gracheva, Nicolas T. Ingolia, Yvonne M. Kelly, et al. “Molecular basis of infrared detection by snakes,” Nature, Issue 464, 2010, pp. 1006-1011。

註19：Victor V. Klemas, “Remote sensing and navigation in the animal world: An overview,” Sensor Review, Vol. 33, Issue 1, January 2012, pp. 3-5。

註20：Hyungmin Park, 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。



圖五：功能仿生材料示意圖

資料來源：參考Shafiqul Islam and Gajanan Bhat, “Progress and challenges in self-healing composite materials,” Royal Society of Chemistry, Feb. 2021, p. 1904; Wing Sze Tung and Walid A. Daoud, “Self-cleaning fibers via nanotechnology: a virtual reality,” Journal of Materials Chemistry, Apr. 5, 2011, p. 7858，檢索日期：2025年4月17日，由作者彙整製圖。

目標區後開啟彈鼻雷達尋標器，偵測並攻擊目標。²¹

三、材料仿生 (Material Bionics)

此類材料是模仿生物材料的組成與特性(如蜘蛛絲、植物纖維)，其主要類型可歸納包括結構仿生、功能仿生、高性能仿生材料等三種，概要如後：

(一)結構仿生材料區分為蜂巢結構材料、貝殼層狀結構材料及骨骼仿生材料(如圖四)等，說明如后：

1. 蜂巢結構材料係模仿蜂巢的六邊形結構，具有高強度、輕量化的特點，被普遍運用於運輸、奈米製造、機械、化工、

生醫、建築和航空航太材料。²²

2. 貝殼層狀結構材料係模仿貝殼的層狀結構(無機與有機複合)，具有高韌性和抗衝擊性，運用於防寒衣、防彈衣及防護裝甲製作。²³

3. 骨骼仿生材料則模仿骨骼的多孔結構，使用於骨科植入物(如人工關節、骨修復材料)以及外骨骼技術。²⁴

(二)功能仿生材料可區分為自癒合材料、自清潔材料以及變色材料，這些材料屬於軍民通用技術，可運用在軍事醫療、環保和偽裝(如圖五)，分述如后：

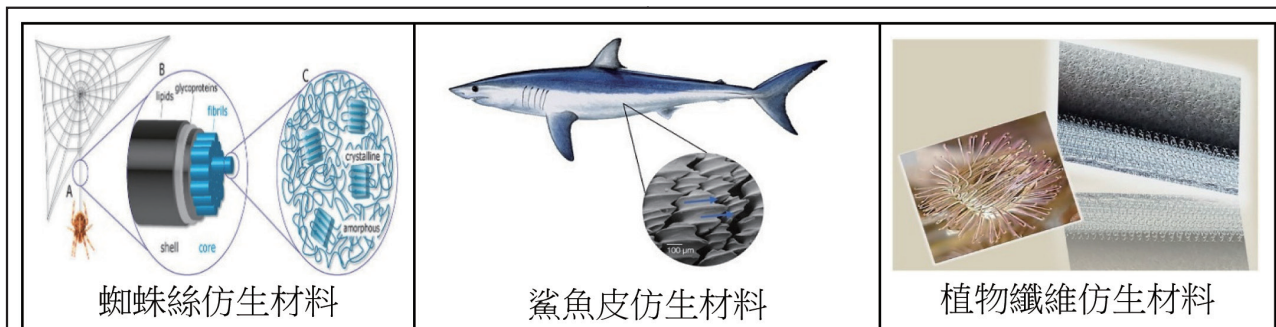
1. 自癒合材料主要模仿生物體的自癒

註21：同註16，頁52。

註22：Wendy Triadji Nugroho, Yu Dong, A. Pramanik, and M. Chithirai Pon Selvan, Zhixiao Zhang, Seeram Ramakrishna, “Additive manufacturing of re-entrant structures: Well-tailored Structures, Unique Properties, Modelling Approaches and Real Applications,” Additive Manufacturing, Vol. 78, Sep. 25, 2020, Issue 10329, p. 2。

註23：Michaela Karhankova, Milan Adamek, Lovre Krstulovic-Opara, Vaclav Mach, Petra Bagavac, Pavel Stoklasek, and Ales Mizera, Composites in Ballistic Applications Focused on Ballistic Vests—A Review,” Journal of Composites Science, Issue 415, August 2024, p. 7 of 17。

註24：Sarah Safavi, Yihang Yu, Dale L. Robinson, Hans A. Gray, David C. Ackland and Peter V. S. Lee, “Additively Manufactured Controlled Porous Orthopedic Joint Replacement Designs to Reduce Bone Stress Shielding: A Systematic Review,” Journal of Orthopaedic Surgery and Research, Vol. 18, Article Number: 42, 2023, p. 2。



圖六：高性能仿生材料示意圖

資料來源：參考Marija Branković, Fatima Zivic, Nenad Grujovic, Ivan Stojadinovic, Strahinja Milenkovic and Nikola Kotorcevic, "Review of Spider Silk Applications in Biomedical and Tissue Engineering," *Biomimetics*, Vol. 9, Issue 3, March 4, 2024, p. 3; Jane Li, "From Shark Skin to Speed," *Illumin Magazine*, March 21, 2017, <https://illumin.usc.edu/from-shark-skin-to-speed/>; Marcela-Elisabeta Barbinta-Patrascu, Bogdan Bitu, and Irina Negut, "From Nature to Technology: Exploring the Potential of Plant-Based Materials and Modified Plants in Biomimetics, Bionics, and Green Innovations," *Biomimetics*, Vol. 9, Issue 7, June 26, 2024, p. 5，由作者彙整製圖。

合能力(如皮膚傷口癒合)，用於修復裂縫或損傷(如混凝土、塗層)。²⁵

2. 自清潔材料如模仿荷葉表面的超疏水結構(即蓮花效應)，用於防污塗料、玻璃。²⁶

3. 變色材料則模仿變色龍的皮膚結構，開發可隨環境變色的材料，用於軍事偽裝或智慧型服裝。²⁷

(三)高性能仿生材料一般區分為三種(如圖六)，簡要說明如后：

1. 蜘蛛絲仿生材料係模仿蜘蛛絲的高強度、高彈性，可應用於防彈衣、手術縫合線等。²⁸

2. 鯊魚皮仿生材料係模仿鯊魚皮的微溝槽(micro-groove)結構，減少水流阻力，應用於游泳衣、潛艦船體塗層等。²⁹

3. 植物纖維仿生材料則模仿竹子或木材的纖維結構，開發輕量化和高強度的複合材料。³⁰

四、控制仿生(Control Bionics)

註25：Mugahed Amran, Ali M. Onaizi, Roman Fediuk, Nikolai Ivanovici Vatin, Raizal Saifulnaz Muhammad Rashid, Hakim Abdelgader, and Togay Ozbakkaloglu, "Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review," *Materials*, Vol. 15, Issue 3214, April 2022, p. 2。

註26：蓮花效應主要是指蓮葉表面具有超疏水(superhydrophobicity)以及自潔(self-cleaning)的特性。Quan Xu1, Wenwen Zhang, Chenbo Dong, Theruvakkattil Sreenivasan Sreeprasad3 and Zhenhai Xia, "Biomimetic Self-cleaning Surfaces: Synthesis, Mechanism and Applications," *The Royal Society*, Vol. 13, Issue 122, Sep. 2016, pp. 1-9。

註27：Huanhuan Li, Tianhang Yang, Lujia Li, Sining Lv, Songjing Li, "A Camouflaged Film Imitating the Chameleon Skin with Color-Changing Microfluidic Systems Based on the Color Information Identification of Background," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 18, Issue 5, October 2021, p. 1137。

註28：Yunqing Gu, Lingzhi Yu, Jiegang Mou, Denghao Wu, Peijian Zhou, and Maosen Xu, "Mechanical Properties and Application Analysis of Spider Silk Bionic Material," *De Gruyter*, Vol. 20, Issue 1, August 24, 2020, pp. 444-446。

註29：Brian Dean and Bharat Bhushan, Shark-skin Surfaces for Fluid-drag Reduction in Turbulent Flow: A Review," *The Royal Society*, Vol. 368, Issue 1929, Oct. 28, 2010, pp. 2-4。

註30：Dandan Xu, Sheng He, Weiqi Leng, Yuhe Chen, and Zaixing Wu, "Replacing Plastic with Bamboo: A Review of the Properties and Green Applications of Bamboo-Fiber-Reinforced Polymer Composites," *Polymers*, Vol. 15, Issue 21, October 31, 2023, p.7。



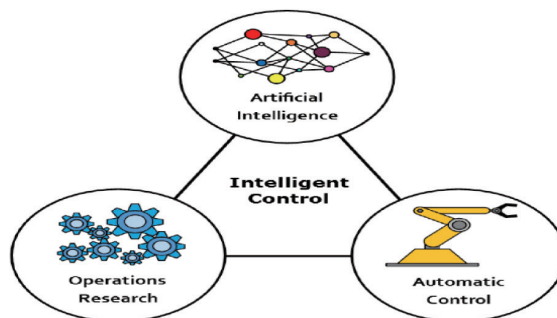
機器人



醫療設備(輔助復健機器人)



航空太空(自動導航和加油)



工業自動化(智慧控制系統)

圖七：控制仿生運用示意圖

資料來源：參考“NAO V6 Robot by Industry,” Robot Lab, <https://www.robotlab.com/en-us/store/nao-power-v6-educator-pack>. Louise Jack, “Robots help guide self-managed rehabilitation for stroke and brain injury survivors,” The National Robotarium, Aug. 20, 2024, <https://thenationalrobotarium.com/robots-help-guide-self-managed-rehabilitation-for-stroke-and-brain-injury-survivors/>. IKE, “Autonomous aerial refueling between UAVs,” Robotpig.net, March 9, 2011, https://robotpig.net/robotics-news/autonomous-aerial-refueling-between-uavs-_2049. “Commercial and Industrial Control Systems & Automation,” S5 System, <https://s5system.com/technology/control-automation/>, 檢索日期：2025年4月17日，由作者彙整製圖。

是一種結合「仿生學」和控制工程的技術，目的是藉由模仿生物結構和功能，設計和優化控制系統。主要運用在機器人、醫療設備、航空太空和工業自動化等項(如圖七)，概要如后：

(一) 機器人如模仿生物運動和行為的機器魚、鳥、狗和人類，更透過人工智慧

的仿生算法(即智慧控制)，提高仿生機器人的自主性和適應性。

(二) 醫療設備如仿生義肢係模仿生物肢體的運動和控制；至於復健機器人則輔助患者進行復健治療。

(三) 航空太空部分如仿生飛行器會模仿鳥類或昆蟲的飛行方式；另自動導航和

加油部分則經由仿生算法提高飛行器自動導航與自動加油能力。

(四)工業自動化包含智慧控制系統會模仿生物的自適應性和進化能力；至於故障診斷則通過仿生算法，自動進行系統故障檢測和診斷。

五、群體仿生(Swarm Bionics)

群體仿生是一種模仿自然界中群體生物(例如，螞蟻、蜜蜂、飛鳥等)行為的技術，目的是透過分布式控制和協同合作實現複雜的任務技術。³¹群體仿生是一種軍民通用的仿生技術，主要運用在以下四個領域，摘列如后。

(一)機器人

運用群體機器人共同合作完成任務，如搜索與救難、環境監測、機器人群體表演等；彼此間通過自動導航，進行協同合作，同時在複雜環境中進行導航和避障。

(二)無人機

模仿鳥群飛行的無人機編隊，既可運用於農業、物流，更可以應用在軍事作戰；另透過無人機的協同合作，俾在複雜環境中進行大範圍的偵察與監測。

(三)智慧交通

如模仿群體行為的自動駕駛車輛編隊，可以提高交通效率和安全性，以及透過分布式控制優化交通流量，減少道路車

輛壅塞情況。

(四)工業自動化

群體機器人透過協同合作進行的貨物搬運和倉儲管理(即智慧型倉儲)，或通過群體仿生技術優化生產線調度和資源配置(即生產線優化)。

肆、「仿生學」軍事運用的前景展望與關鍵挑戰

前揭例子均顯示「仿生學」在軍事領域上已有眾多成功案例，其對軍事效能提升也做出具體的貢獻，隨著生物科技與工程技術的交叉融合，其未來發展極可能呈現指數性躍升。即令如此，由於仿生技術存在著諸多的內在限制，使得「仿生學」的發展仍受到相當程度的侷限。以下就仿生學在軍事運用的前景與挑戰，分別說明如後：

一、前景展望

(一)提供解決複雜軍事問題的創意式途徑

1. 隨著軍事系統整合與網絡化的發展，控制問題就成為一個巨大的挑戰。當前大多數軍事系統採用集中式控制架構組建，其類似複雜的電力網路，這種安排的最大風險在於一處關鍵節點失效，即可能導致整個系統癱瘓；因此，缺乏必要的彈性

註31：Fatima Ezzahra Zaizi, Sara Qassimi, Said Rakrak, "Multi-objective Optimization with Recommender Systems: A Systematic Review," Information Systems, Vol. 117, Issue 102233, July 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306437923000698>, 檢索日期：2025年4月12日。

與韌性。為對電力系統進行精確與可靠的控制，電力系統工程師遂透過「仿生學」運用，將人體控制的「分層遞階結構」(Hierarchical Structure)與「分散自治控制」(Decentralized Autonomous Control)兩項特性引進電力電子系統，期能發展出嶄新的設計思維。透過對人體控制系統的仿生，這套系統的次系統具有各自的控制部件，依據接收到的各項訊息對本身的局部行為進行調整，而其產生的效果皆是用以協助整個系統功能的達成。³²

2. 此外，系統中的各次系統間保持「耦合關係」，因此可充分地交換信息與進行反饋，用以保持整個系統的平衡與正常運作。這種自適應性使得各別次系統一旦發生毀損失能時，亦不會對其他子系統或整個系統的運作造成不利影響。³³這項控制技術若能成功開發運用，將有助於解決軍事系統整合與作戰行動協同等棘手問題，成為解決複雜性軍事問題的一個創新途徑。例如，這項控制技術可運用於無人空中載具執行「蜂群」戰術，具有較當前採用的集中指管模式更佳的戰鬥效能與作戰韌性。

(二) 加速促成技術領域的交叉融合

1. 由於「仿生學」具強烈的跨學科屬性，加上其擁有很強的滲透性，當某項生物機制成功轉化並發展出新技術後，往往引發多個技術領域的革命性變革，³⁴甚至可形成一個嶄新學門。當中最著例子即是「神經工程學」(Neural Engineering)的出現，這門學科的發展來自仿生學與腦科學的整合，透過計算機技術與神經電生理學的運用，工程師實現了人腦與計算機的對接，幫助喪失運動能力但大腦功能健全的殘疾人士，能夠運用自己的思維直接控制義肢活動。³⁵

2. 「控制論」創始人維納(Norbert Wiener)曾指出：「在傳統學科之間的無人地帶，往往孕育著最具潛力的創新」。³⁶這番話精準地道出跨域整合對科學發展的巨大價值，亦符合「仿生學」具有的特殊屬性。證諸神經工程學的發展歷程可知，其不僅促進「神經科學」(Neuroscience)的發展，亦對人類研究大腦與運用思維能力提供了激勵作用，這種發展正如維納所預期，由於「仿生學」具有學門交叉屬性，較其他學門更易在不同領域取得突破性進展。此外，「仿生學」與生物科技存有緊密依存，若能提升生物科技領域

註32：胡磊、何湘寧，〈基於仿生學的電力電子系統分散自治控制〉，《中國電機工程學報》(北京市)，第25卷，第17期，2005年9月，頁21至22。

註33：李冬黎、何湘寧、張晉，〈仿生學在電力電子系統設計中的應用〉，《中國電機工程學報》，第22卷，第8期，2002年8月，頁20。

註34：翟文中、蔡欣容，〈中國仿生學發展現況之研究〉，《中共研究》，第44卷，第3期，2010年3月，頁69。

註35：孫久榮、戴振東，〈仿生學的現狀與未來〉，《生物物理學報》(北京市)，第23卷，第2期，2007年4月，頁111。

註36：同註35，頁113。

能力，對此一學門的開展與進行亦具相當助益。「仿生學」的這些特性為軍事工程注入了全新的活力，亦在當前許多物理與化學定律運用已達極限情況下，為軍事載台與武器系統的開發，提供一個多面向的嶄新途徑。

二、關鍵挑戰

(一) 生物機制難於落實成為工程技術

1. 「仿生學」發展至今雖在各個領域取得了相當程度的進展，惟仍未能如其他自然科學學門般，建構出完善的理論與通用的途徑。就當前作法而言，當人們欲透過「仿生學」開發嶄新技術時，每次必須從頭開始對各種生物系統運作機制進行測試，用以建立「潛在原型」(potential prototype)。生物仿生的價值在於對生物機制進行模仿或相似原理運用，找到嶄新與更經濟可靠的工程技術；³⁷然而，許多生物機制的複雜性遠超出現有工程技術的可行性，例如魚類的游動機制與昆蟲的協同控制機制。故在這個過程中，需進行若干形式的推理或轉移，方能將生物機制成功地運用於工程技術上。

2. 在通常情況下，「技術提取」(technical abstraction)所以成為可能，係因生物學家指出一個有趣或不尋常現象

，並發現形成此功能的普遍性原理(例如蓮花自潔效應)，其後工程師才能將此生物機制運用於工程領域，開發出類似功能的嶄新技術或是仿生產品。³⁸換言之，「仿生學」的深度發展仰賴生物學家與工程人員的高度融合，同時必須引進一套完整理論與共通性規則，這樣一來，「仿生學」除可降低長期以來對「經驗途徑」(empirical approach)的過度依賴，亦可縮短由「生物機能發現」落實至「工程技術運用」耗用的研發時間。³⁹

(二) 生物機制複雜單元仿生仍「力有未逮」

1. 「仿生學」絕非單純對生物外形構造與運動機制進行完全與簡單地模擬，而是深入探索並明瞭其背後原理與規律的創新途徑，從而開發不同於當前的設計方法與工程技術。⁴⁰當前其最大挑戰係生物某一特殊機制可能涉及多個物理原理，例如解釋鯊魚皮微溝槽表面可以增加升力及降低阻力的這項生理機能，係由多個物理理論共同作用形成的綜合效果。意即生物適應自然環境呈現的各種生理機能，不僅是單一因素的個別作用，而是相互依存與彼此影響的多個因素，通過適當機制耦合與協同作用形成的聯合結果。⁴¹

註37：趙金才，〈由航天技術的發展認識仿生科學的價值〉，《中國科學基金》(北京市)，2006年第2期，頁92。

註38：同註2，頁474。

註39：同註2，頁481。

註40：崔爾杰，〈生物運動仿生力學與智能微型飛行器〉，《力學與實踐》(北京市)，第26卷，第2期，2004年4月10日，頁8。

註41：任露泉、梁雲虹，《耦合仿生學》(北京：科學出版社，2011年)，頁18。

2. 在這種情況下，過去工程界普遍採用的單元仿生並不能完全解釋生物的實際運作機制，而被稱為「耦合仿生」(Bionic Coupling)的嶄新學門即應運而生，並成為「仿生學」的重要組成及未來走向。

「耦合仿生」是模仿生物多因素相互耦合與協同作用的仿生，這是「仿生學」的一個嶄新研究領域與思維架構，係一個較單元仿生更貼近生物實際運作的仿生途徑，可有效解決過去單元仿生「只見秋毫、不見輿薪」的偏頗狹隘觀點。⁴²然由於生物耦合蘊含的多樣性、耦合機制的複雜性、耦合仿生的多元交融性，這些錯綜複雜的系統性挑戰，加上大量的問題與技術仍未獲得突破，凸顯生物耦合的建模及其仿生研究，依舊存在著巨大的技術瓶頸，⁴³預判其未來的成熟運用，仍須相當時日的精進與磨合，方能有成。

伍、未來發展-代結語

一、自然界生物經過數千萬甚至上億年的演化，為因應生存環境的嚴苛挑戰與弱肉強食的自然法則，均各自發展出特殊的生理機能與適應能力，使生物體本身就成為一個極具韌性與適應力的有機系統；而這些運作機制與系統整合為人類科技創新提供了一個重要資料庫。「仿生學」的實際軍事運用儘管充滿挑戰，仍然充滿巨

大潛力，通過模仿自然界的生物系統和過程，能夠顯著提升軍事技術的性能和效率。有關「仿生學」在軍事領域的運用非常廣泛，其運用成果正從現在進行式向未來式跨越。未來發展概況，綜整如下：

(一)透過模仿生物材料結構特性，研發更輕、更強、更耐用的軍事裝備；或模仿生物形態和功能，優化武器裝備的設計，提升裝備性能。

(二)利用模仿動物的偽裝機制，開發更有效的隱蔽技術，以提高士兵和裝備生存能力。

(三)模仿生物感知能力，研製更靈敏的偵察和監測設備，提升軍事偵察與監視功能，或是模仿生物對環境變化的適應力，研製能在極端環境使用的軍事裝備，提高環境的適應能力。

(四)運用模仿昆蟲、鳥類等生物移動方式，發展能夠在複雜地形中高效移動的機器人；或學習鳥類和昆蟲飛行機制，製造更靈活、更高效的無人機，從而提高機動性和適應性。

(五)藉模仿群體生物行為，並借鑑生物系統的智慧行為，開發分散式控制和協同合作系統，用於無人機編隊、機器人集群等。

(六)透過模仿人體的運動機制方式，研發出增強士兵力量和耐力的外骨骼裝備

註42：同註41，頁18~20。

註43：同註41，頁ii。

；或為受傷斷肢的士兵提供高性能的仿生義肢，助渠等恢復行動能力，提高士兵整體作戰能力。

(七)憑藉優化軍事系統控制演算法和決策過程，提高軍隊指揮管制能力。

二、未來「仿生學」的進一步發展需要生物學、工程學、材料科學、人工智慧等多學科的深度融合；且其在軍事領域的運用，不僅提升現有技術的性能，亦推動新型武器裝備的研發。未來若再加上透過模仿自然界的智慧，咸信「仿生學」將為軍事技術帶來革命性影響，並繼續在此領域發揮重要的作用。

三、隨著「仿生學」在軍事領域的運用日廣，加上當前其與「人工智慧」(AI)與「量子力學」等新興科技的交叉融合，預期將會推動並催生新一波軍事事務革新。與此同時，我們必須特別關注可能衍生的倫理和法律問題，例如仿生機器人的決策自主所引發的倫理討論、仿生材料開發透過基改，可能導致環境污染或是生物安全風險。前揭問題都必須關注並預擬因應措施，方能確保仿生技術在可控的情況下，運用於軍事科研領域。

隨著傳統工程技術開發手段接近極限，仿生技術已成為各國追求科技突破與產業升級的嶄新途徑，尤以軍事領域為然。當前，國軍已成立「國防創新小組」用以提供各項諮詢與評估方案，確保新科技的可行性。⁴⁴期望國軍能透過運用與引進新興科技，從而提升戰鬥效能與作戰能力。因此，國軍可對仿生技術相關理論與運用進行深入的研究，擷取具建設性的經驗與運用案例，俾為嶄新作戰概念與軍事科技的發展，提供有力的支撐。換言之，「仿生學」正為軍事創新提供一條嶄新的途徑，相關發展的確值得國軍寄予高度關注。⁴⁵

作者簡介：

江忻杓先生，退役海軍上校，海軍軍官學校73年班、美國海軍指揮參謀學院1995年班、國防大學戰爭學院90年班、政治大學外交系法學碩士，現為國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員暨淡江大學國際事務與戰略研究所博士候選人。

翟文中先生，退役海軍上校，海軍軍官學校74年班，淡江大學國際事務與戰略研究所碩士。曾任職國防部參謀本部情報參謀次長室、國防部戰略規劃司、國防部整合評估司與國家安全會議，並擔任美國能源部Sandia國家實驗室訪問學者，現服務於國防安全研究院國防戰略與資源研究所。

註44：涂鉅旻，〈國軍成立「國防創新小組」拚科技建軍 明年赴美參訪DIU取經〉，《自由時報》，2024年9月10日，<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4795456>，檢索日期：2025年5月1日。

